

**תכנית הלימודים בפיזיקה
לחטיבה העליונה**

רמה מוגברת - 5 יחידות לימוד

**משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
האגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים**

**ירושלים תשס"ח
עדכון אחרון - שבט תשע"ט**

התכנית הוכנה על-ידי חברי ועדת המקצוע לפיזיקה וועדת התכנית לפיזיקה לרמה המוגברת בחטיבה העליונה, בשנת תשס"ח :

פרופ' בת שבע אלון	המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות, יו"ר הוועדה (עד שנת תשס"ז)
ד"ר דוד סלע	מפמ"ר הוראת הפיזיקה ומפקח תחום באגף לתכ"ל, משרד החינוך ירושלים, מרכז הוועדה
ד"ר אסתר בגנו ד"ר נדב בצר יוכבד ברסטל	מנהלת המרכז הארצי למורי הפיזיקה, מכון ויצמן למדע, רחובות מפמ"ר מכונות, המינהל למדע ולטכנולוגיה, משרד החינוך, ירושלים מפקחת המדעים ברשת אמי"ת ומורה לפיזיקה בביה"ס אמי"ת, רחובות
פרופ' יגאל גלילי ד"ר חוסאם דיאב ד"ר חנה ויניק	ראש החוג להוראת המדעים, האוניברסיטה העברית בירושלים מפקח המדעים במגזר הערבי, משרד החינוך, ירושלים מפמ"ר מו"ט בביה"ס היסודי ובחטה"ב, ומ"מ מנהלת המינהל למדע וטכנולוגיה, משרד החינוך, ירושלים
פרופ' יצחק טוכמן פרופ' חיים טייטלבוים פרופ' מאיר מידב ד"ר יצחק מילגרום	מכון רקח לפיזיקה, האוניברסיטה העברית בירושלים המחלקה לפיזיקה, אוניברסיטת בר-אילן, רמת-גן ביה"ס לחינוך, אוניברסיטת תל אביב המרכז להוראת המדעים, האוניברסיטה העברית בירושלים ומכללת הדסה, ירושלים
ד"ר טאהא מסאלחה פרופ' בנימין סבטיצקי מיכאל סבין דגנית סורוקר פרופ' משה קוגלר זאב קרקובר	המכללה למורים ערבים בחיפה ומורה לפיזיקה בתיכון דבוריה ביה"ס לפיזיקה ואסטרונומיה, אוניברסיטת תל אביב מורה לפיזיקה בתיכון רוטברג, רמת השרון מורה לפיזיקה בתיכון אוסטרובסקי, רעננה המחלקה לפיזיקה, מכון ויצמן למדע, רחובות המכינה הקדם-אקדמית, האוניברסיטה העברית בירושלים ומורה לפיזיקה בתיכון למדעים ולאמנויות, ירושלים
עדי רוזן	המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות, והפיקוח על הוראת הפיזיקה, משרד החינוך, ירושלים
ד"ר אלי רז משה רייך	המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים, הטכניון, חיפה, ומכללת אורט בראודה, כרמיאל מורה לפיזיקה בביה"ס האיזורי מנור-כברי, הגליל המערבי

פירוט התוכנית, כולל ההערות הדידקטיות, נכתב על-ידי צוותים הבאים :

מכניקה : ראש הצוות – עדי רוזן
חברי הצוות – זאב קרקובר, צבי אריכא

אלקטרומגנטיות : ראש הצוות - אסתר בגנו
חברי הצוות – צבי גלר, שלמה רוזנפלד, הניה וילף, צבי אריכא

קרינה וחומר : ראש הצוות - עדי רוזן
חברי הצוות – זאב קרקובר, דורותי לנגלי, צבי אריכא

כתיבת המבואות הכלליים לתכנית ולנושאי החובה : עדי רוזן, זאב קרקובר ודוד סלע.

עריכה והבאה לדפוס : צבי אריכא

עריכת לשון : ליאורה הרציג

היזמה לתכנית ושלבי הפעילות הראשוניים התבצעו על-ידי חברי ועדות המקצוע והתכנית שפרשו במהלך שנות הפעילות :

מכון רקח לפיזיקה, האוניברסיטה העברית בירושלים	פרופ' יששכר אונא
מפקח המדעים, רשת עמל	עמירם ארליך
מרכז לימודי הפיזיקה, תיכון אוסטרובסקי, רעננה	מרדכי בן צוק
מרכזת לימודי הפיזיקה, אורט יד-גיורא, הרצליה	תלמה בר מאיר
מרכזת לימודי הפיזיקה, הגימנסיה העברית, ירושלים	רחל ברדה
ראש המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות	פרופ' אורי גניאל
המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות	צבי גלר
מרכז לימודי הפיזיקה, התיכון שליד האוניברסיטה, ירושלים, ומקיף ד', באר-שבע	ורדין פנחס
המחלקה לפיזיקה, אוניברסיטת בר-אילן ומורה לשעבר במדרשיית נועם, פרדס חנה	פרופ' שלמה מנצור
ראש המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים, הטכניון, חיפה, ומורה לפיזיקה בקריית חינוך אורט, קריית ביאליק	פרופ' מנחם פיינגולד ז"ל
מורה לפיזיקה בביה"ס המקיף א', אשדוד	אילן פנחס

מרכז לימודי הפיזיקה, תיכון ליאו-בק, חיפה, ומורה לפיזיקה	שלום פרמינגר
בביה"ס האזורי מנור-כברי, הגליל המערבי	
האוניברסיטה הפתוחה, רמת אביב, תל אביב	פרופ' יורם קירש
מרכז לימודי הפיזיקה, תיכון בליך, רמת גן	אמנון רוזן
מרכז לימודי הפיזיקה, התיכון האורתודוקסי, חיפה	שחאדה שחאדה

בהכנת פרקים בתכנית השתתפו גם המנחים והמורים הבאים, במסגרת מערכת ההנחיה של הפיקוח על הוראת הפיזיקה, המרכז הארצי של מורי הפיזיקה והמחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע:

מדריך ארצי לפיזיקה ומורה לפיזיקה, תיכון הרטמן, ירושלים	צבי אריכא
מדריכה מחוזית לפיזיקה ומרכזת הפיזיקה, ביה"ס להנדסאים שליד אוניברסיטת תל אביב	חנה ברגר
מדריך מחוזי לפיזיקה ומרכז הפיזיקה, קרית חינוך אורט, קריית ביאליק	פרנסיס דרקסלר
מדריכה ארצית לפיזיקה ומרכזת לימודי הפיזיקה, ביה"ס כצנלסון, כפר סבא	הניה וילף
המרכז הארצי של מורי הפיזיקה, ומורה לפיזיקה, תיכון דה-שליט, רחובות	אירינה ויסמן
המרכז הארצי של מורי הפיזיקה, ומרכזת הפיזיקה, תיכון הדריס, הוד השרון	סמדר לוי
המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות, ומורה לפיזיקה, הגמנסיה הריאלית, ראשון לציון	דורותי לנגלי
המרכז הארצי של מורי הפיזיקה, ומרכזת הפיזיקה, ביה"ס היובל, הרצליה	אסתר מגן
המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות, ומורה לפיזיקה בחמד"ע, תל אביב	שלמה רוזנפלד

תודתנו לצוותי הפיתוח ולמורים הרבים שהשתתפו בדיונים ובהערות על תכנית זו.

עמוד	תוכן העניינים
9	רקע
10	תרשים מבנה תוכנית הלימודים
11	חלק א – מבוא לתכנית
12	התפיסה הרעיונית של התכנית
12	מבנה הדעת של הפיזיקה וכיצד הוא מתבטא בתכנים
14	מטרות התכנית ועקרונותיה
14	מטרות על
14	מטרות התכנית
16	עקרונות פדגוגיים להפעלת התכנית
18	דרכי הוראה ולמידה
19	הרחבה והעמקה
19	פתרון בעיות בהוראת הפיזיקה
20	ההדגמה והניסוי בהוראת הפיזיקה
23	השימוש במחשב
23	הקשר למקצועות אחרים
25	דרכי הערכה ומשוב
26	כלי הערכה
27	הערכת פרויקטים
29	בחינות הבגרות
30	הוראת הפיזיקה בכיתה י'
31	חלק ב' - פירוט נושאי החובה
32	מכניקה
32	הקדמה למכניקה
35	חלוקה לפרקים ושעות מומלצות
	פרק 1: קינמטיקה
36	טבלת הנושאים
37	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
39	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

	פרק 2: דינמיקה
44	טבלת הנושאים
45	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
48	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
	פרק 3: התנע ושימורו
56	טבלת הנושאים
57	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
58	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
	פרק 4: אנרגיה מכנית ושימורה
63	טבלת הנושאים
64	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
66	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
	פרק 5: מודל הגז האידיאלי
70	טבלת הנושאים
71	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
72	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
	פרק 6: תנועה הרמונית פשוטה
75	טבלת הנושאים
76	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
77	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
	פרק 7: כבידה
81	טבלת הנושאים
82	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
83	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
87	מכניקה – בעיות ותרגילים לדוגמה
104	מכניקה – הרחבה והעמקה
	אלקטרומגנטיות
110	הקדמה לאלקטרומגנטיות
110	חלוקה לפרקים ושעות מומלצות
114	פרק 1: חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי

115	טבלת הנושאים
116	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
117	פירוט, דגשים, הערות דיסקטיות
	פרק 2: פוטנציאל חשמלי, קיבול וקבלים
125	טבלת הנושאים
126	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
127	פירוט, דגשים, הערות דיסקטיות
	פרק 3: מעגלי זרם ישר
130	טבלת הנושאים
131	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
133	פירוט, דגשים, הערות דיסקטיות
	פרק 4: השדה המגנטי
137	טבלת הנושאים
138	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
139	פירוט, דגשים, הערות דיסקטיות
	פרק 5: השראה אלקטרומגנטית
143	טבלת הנושאים
144	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
145	פירוט, דגשים, הערות דיסקטיות
149	אלקטרומגנטיות – בעיות ותרגילים לדוגמה
161	אלקטרומגנטיות – הרחבה והעמקה
169	קרינה וחומר
169	הקדמה לקרינה וחומר
173	חלוקה לפרקים ושעות מומלצות
	פרק 1: תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים
174	טבלת הנושאים
175	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
177	פירוט, דגשים, הערות דיסקטיות
	פרק 2: המושג "מודל", תפקידיו, המודל החלקיקי של האור

187	טבלת הנושאים
188	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
189	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
	פרק 3: גלים מכניים ואלקטרומגנטיים
191	טבלת הנושאים
192	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
195	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
	פרק 4: מבוא לתורת הקוונטים – המודל הדואלי של האור
208	טבלת הנושאים
209	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
210	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
	פרק 5: מבנה האטום
214	טבלת הנושאים
215	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
217	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
	פרק 6: מבוא לתורת הקוונטים – דואליות החומר
222	טבלת הנושאים
223	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
224	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
	פרק 7: הגרעין ומבוא לחלקיקים יסודיים
226	טבלת הנושאים
227	טבלת נושאי משנה, נוסחאות, פעילויות, שעות מומלצות
228	פירוט, דגשים, הערות דידקטיות
233	קרינה וחומר – בעיות ותרגילים לדוגמה
253	קרינה וחומר – הרחבה והעמקה

רקע

תכנית הלימודים בפיזיקה ברמה המוגברת (בהיקף של 5 יח"ל) מיועדת לתלמידי כיתות י' - י"ב בנתיב **העיוני והטכנולוגי** בכל המגזרים: **כללי-דתי, עברי-ערבי-דרוזי-בדואי**. תוכני הפיזיקה הבסיסית לא השתנו, אך מערכת החינוך עברה בשנים האחרונות שינוי בתפיסת מבנה מסמך תכנית הלימודים ובדגשים המופיעים בו, נוסף להתפתחויות שחלו בדרכי ההוראה, הלמידה וההערכה ובאמצעי ההוראה. לפיכך, התכנית מתבססת על המחקרים בתחום הפדגוגיה והפסיכולוגיה ההתפתחותית ועל החידושים הטכנולוגיים והדידקטיים בהוראת הפיזיקה והטכנולוגיה.

קובץ זה כולל את המבוא ופירוט נושאי החובה בתכנית ל-5 יח"ל. התכנית הנוכחית כוללת התייחסות לעקרונות כלליים, הצעת מערך הוראה מפורט, הבחנה בין סעיפי חובה לסעיפי הרחבה והעמקה, הערות דידקטיות מקיפות, הצעות להדגמות ולניסויים, שאלות המצביעות על הרמה וההיקף הנדרשים והמלצות על דרכי הוראה והערכה. המערך המורחב של פירוט התכנים, הטבלאות וההערות הדידקטיות בכל אחד מהתחומים הופכים את הסילבוס למסמך המסייע באופן מקיף למורים בתכנון ההוראה.

התכנית כוללת לימודים עיוניים ולימודי התנסות במעבדת הפיזיקה בשלושה נושאי חובה: **מכניקה, אלקטרומגנטיות, קרינה וחומר**. שעות המעבדה ישתלבו בלימודים העיוניים של הנושאים השונים.

להשגת מטרות התכנית רצוי להתחיל בהוראתה כבר בכיתה י' ובהיקף של לפחות 3 ש"ש. היקף השעות בכיתות י"א ו-י"ב יהיה לא פחות מ- 6 ש"ש, ובסך הכול, מסגרת התכנית בשלמותה מיועדת להילמד בהיקף של 15 ש"ש.

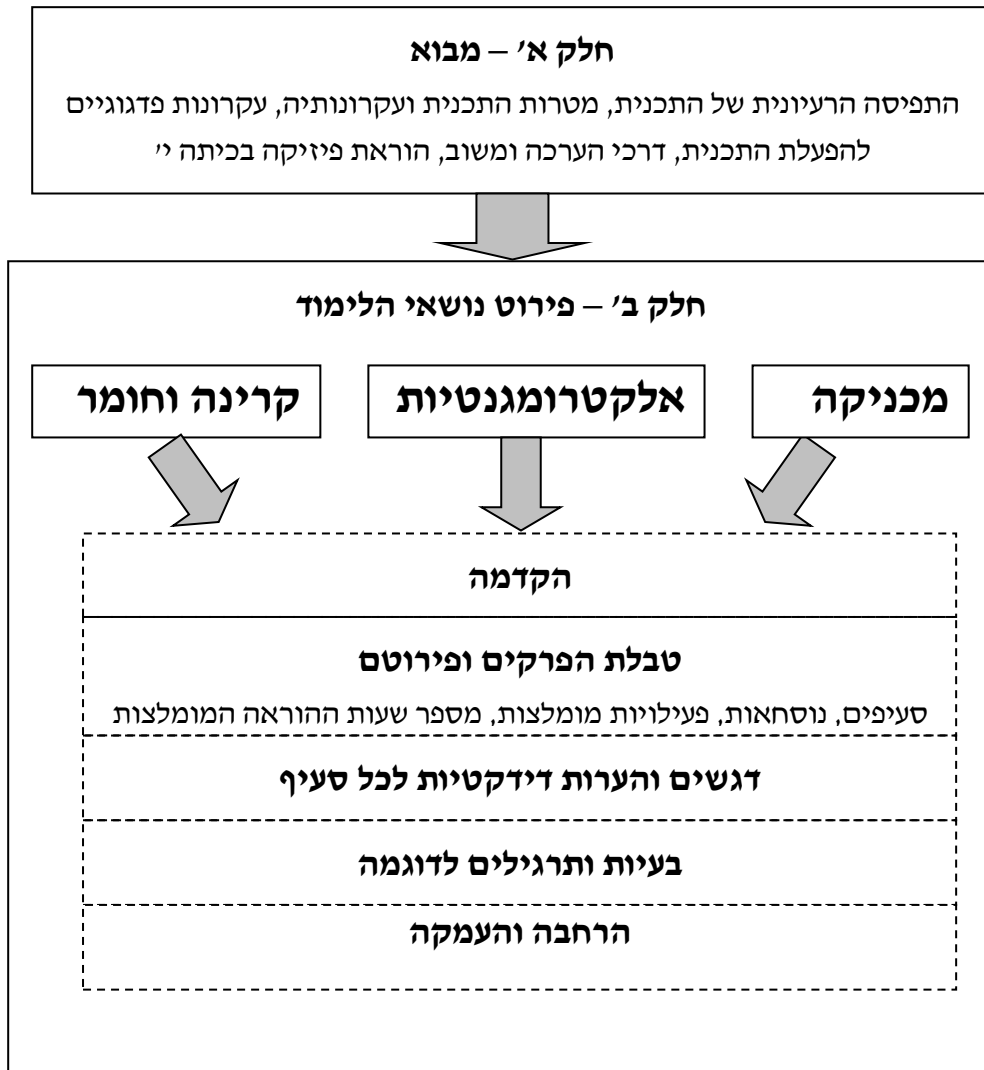
ועדת התכנית וועדת המקצוע לפיזיקה החליטו במכוון לא לחלק את נושאי הלימוד על פי שנות לימוד. אמנם הסילבוס ערוך על פי רצף הוראה מסוים ומציין את מספר השעות המומלץ לכל נושא, אולם אלה אינם מחייבים את המורים. ניתן לבחור רצפי הוראה אחרים ולהקציב שעות לימוד לפי מפתח אחר, בתנאי שסך כל השעות לא יפחת מ-15 ש"ש. ייתכנו אפשרויות וצירופים שונים של מרכיבי התכנית בהתאם לאופי בית הספר, מגמת הלימודים והיקף השעות.

בתכנית זו מפורטים גם תוכני הרחבה והעמקה לכל אחד מנושאי החובה. **סעיפים אלו אינם כלולים בחומר החובה לבחינות הבגרות**. מורים יכולים ללמד אותם על פי הבנתם, שיקול דעתם, הזמן העומד לרשותם ואוכלוסיית תלמידיהם.

למרות ההתפתחות הטכנולוגית הרבה והשלכותיה על שיטות ההוראה והלמידה (המאפשרות למידה מרחוק או קורסי mooc) ועל האמצעים לביצוע ניסויים (שגולת הכותרת שלהם היא המעבדה הממוחשבת), עדיין רבה תרומתו של המורה לפיזיקה בכיתה, ומכאן גם הדרישות הגבוהות בכל

הקשור להכשרתו. מורה לפיזיקה ברמה המוגברת צריך לעמוד בתנאי רישיון להוראת פיזיקה כפי שמפורסם בחוזרי מנכ"ל. כדי לשמור על רמת ידע תוכני ופדגוגי מתאים על המורה להקפיד ולהתעדכן במקצוע על-ידי קריאה שוטפת של ספרות, קבלת מידע מעודכן מהאינטרנט ומאתרים שבהם מופיעים חידושים בפיזיקה ובהוראתה והשתתפות בהשתלמויות במהלך ההוראה. התעדכנות שוטפת תיעשה גם על-ידי ביקור תכוף באתר המרכז הארצי למורי הפיזיקה ובאתר המפמ"ר.

תרשים מבנה תוכנית הלימודים



חלק א

מבוא לתכנית

התפיסה הרעיונית של התכנית

מדעי הטבע נותנים בידינו כלים להסתכל על העולם ולהבין תופעות בדרך הניסוי והחקר תוך שימוש בכלים כמותיים ובחשיבה ביקורתית. לימודי הפיזיקה, מקצוע כמותי ביסודו, מאפשרים ללומדים להכיר את החוקיות הקיימת בעולם הסובב אותנו ולהסביר תופעות טבע הקשורות לעולם החומר. כמו כן היא מהווה בסיס למקצועות מדעיים אחרים. תכנית הלימודים אמורה להציג בפני התלמידים תמונה של דיסציפלינה מדעית, שהיא תרבות בפני עצמה, מהיבטיה השונים. לימודי פיזיקה הם נכס לכל תלמיד ותלמידה שיבקשו להמשיך בלימודים אקדמיים, גם אם אינם מתעתדים לעסוק בפיזיקה, במדעים או בטכנולוגיה. לפיכך, מטרתה של הוראת הפיזיקה בחטיבה העליונה היא לתת תשתית השכלתית כללית לאזרח המחר ולאזרח דווקא להוות "מכינה" ללימודים אקדמיים.

ועדת התכנית ביקשה להשיג איזון שבין הרחבת היריעה על-ידי הכללת מספר רב של נושאים, לבין העמקה במספר קטן של נושאים. מטבע הדברים יש פרקי יסוד בפיזיקה שיש להעמיק בהם, ואחרים הראויים לדיון ברמה תיאורית בלבד.

תקופתנו מתאפיינת בקצב שינויים מהיר בתחומים שונים ולכן חשוב מאוד לטפח אוריינות מדעית ומיומנויות למידה וחשיבה אשר יאפשרו ללומדים ללמוד באופן עצמאי. לפיכך, בתהליך פיתוח תכנית לימודים, כמו גם בתהליך ההוראה, נדרשו חברי הוועדה לא רק לשאלה מה לומדים, אלא גם לשאלה איך לומדים. משמעות זו תפורט בהמשך כשנדון בפרק הכישורים והמיומנויות. חברי הוועדה מצאו לנכון לשוב ולציין כי מתפקידו של המורה לפתח אצל התלמידים כישורים אורייניים בתחום הפיזיקה שיאפשרו להם לעקוב אחר שינויים וחיידושים בתחום בכוחות עצמם.

מבנה הדעת של הפיזיקה וכיצד הוא מתבטא בתכנים

תכנית הלימודים כוללת שלושה נושאי חובה - מכניקה, אלקטרומגנטיות וקרינה וחומר. אלו הם נכסי צאן ברזל של הפיזיקה הקלאסית והמודרנית, והמטרה היא להקנות ללומדים ראייה כוללת, רחבה ועדכנית של המקצוע.

ההיקף הרחב של נושאי החובה אינו נובע מן הצורך ללמד את "כל הפיזיקה"; אנו מוותרים במודע על פרקי לימוד חשובים. התלמידים אינם נדרשים להכיר את המכניקה של הנוזלים (לרבות חוקי ארכימדס וברנולי), או פרקים בעלי חשיבות עקרונית כתרמודינמיקה ויחסות. מטרת הבחירה בנושאי לימוד מסוימים היא, כאמור, הרצון להקנות תמונה עדכנית ומאוזנת של הפיזיקה הקלאסית ושל הפיזיקה המודרנית ובמקביל לפתח אוריינות פיזיקלית כללית.

שלושת נושאי החובה

- א. **מכניקה** – נושא זה הוא התשתית למדע הפיזיקה ובמידה רבה לדיון מדעי בכלל. המכניקה היא דוגמה לתאוריה מדעית סדורה. מבחינת התפתחות הדיסציפלינה, המכניקה הניוטונית היא אבן דרך. במהותה זוהי תאוריה שהייתה אמורה לכלול את כל הפיזיקה - כך תפס אותה ניוטון. ואכן מושגים קלאסיים רבים מוסברים עד היום באמצעות עקרונות המכניקה הניוטונית (לדוגמה: חום). יתר על כן, התפתחויות בתחומי פיזיקה אחרים (לדוגמה: המושג "שדה", תורת היחסות ותורת הקוונטים) נבנו תוך התייחסות למכניקה הניוטונית הקלאסית.
- בלימודי המכניקה רוכשים התלמידים לראשונה מושגים פיזיקליים רבים (מקום וזמן, השתנות ותנועה, תנע ואנרגיה, אינטראקציה, מסה ועוד). מכניקה היא גם תחום שבו הגופים הנידונים נראים היטב לעין וניתן לנתח תופעות במגוון גדול של דרכי צפייה ומדידה. כמו כן, הדרישות המתמטיות אינן גבוהות, וניתן אפוא להגיע לדיון מעמיק ומורכב במערכות מסוימות ולהתוודע לתפקיד המתמטיקה במדע הפיזיקה.
- ב. **אלקטרומגנטיות** – תחום זה הוא בעל חשיבות עיונית ומעשית. מבחינה עיונית הוא מהווה הרחבה ויישום של עקרונות המכניקה הניוטונית לצד חריגה משמעותית מהם בנושא המגנטיות. האלקטרומגנטיות עתירת תופעות ויישומים ומזמנת שפע אפשרויות בתחום הניסויי. כיום לא ניתן להפעיל מעבדה, בפיזיקה בפרט ובמדעים בכלל, ללא ידע בסיסי באלקטרומגנטיות.
- ג. **קרינה וחומר** – במסגרת נושא זה ילמדו התלמידים מושגים מעולם הפיזיקה המודרנית, ובפרט היבטים על אופיה הלא-קלאסי. התלמידים יכירו את האופי הדואלי של הקרינה ושל החומר ואת המשתמע מכך, ילמדו על האופי ההסתברותי של הרדיואקטיביות וכן על ההבדל בינה לבין הדטרמיניזם של המכניקה הניוטונית.

מטרות התכנית ועקרונותיה

מטרות על

מטרות-העל של התכנית כוללות ארבעה היבטים :

- התוודעות מקיפה לעולם הפיזיקה ותכניה.
- פיתוח האוריינות המדעית בתחום הפיזיקה – הלומדים יתוודעו לעקרונות החשובים של התחום וידעו ליישם בחיי היום-יום, בשיחת רעים או בקריאת מאמר מדעי פופולרי. אוריינות פיזיקלית היא חלק מהתרבות האנושית והיא מטען חיוני לאזרח משכיל ואמצעי חשוב להבנת העולם. על כן, בצד התכנים ניתן דגש למגוון רחב של **מיומנויות חשיבה ולמידה**.
- יצירת עניין והתלהבות אצל התלמידים בלימודי הפיזיקה.
- פיתוח תשתית פיזיקלית להמשך לימודים אקדמיים, מדעיים וטכנולוגיים.

מטרות התכנית

מטרות התכנית, המנוסחות להלן, מחולקות לשלושה תחומים :

א. מטרות בתחום הידע התוכני, הבאות לידי ביטוי בהכרה והבנה של מושגים, עקרונות, תופעות ורעיונות מרכזיים של הפיזיקה בשלושת התחומים – מכניקה, אלקטרומגנטיות וקרינה וחומר :

1. הכרה והבנה של מושגי היסוד, העקרונות והרעיונות המרכזיים של המכניקה הניוטונית ויכולת ליישם בשני התחומים הנוספים – אלקטרומגנטיות וקרינה וחומר.
2. יישום עקרונות הדינמיקה הניוטונית בנושאי המכניקה והאלקטרומגנטיות, תוך הרחבה והעמקה במושגי יסוד כמו "שימור" ו"שדה".
3. שימוש בעקרונות פיזיקליים בשלושת תחומי היסוד להסבר תופעות בחיי היום יום.
4. פיתוח יכולת לניתוח מצבים פיזיקליים באמצעות כלים מתמטיים בסיסיים (כגון וקטורים, תיאורים גרפיים ועוד).
5. הבנת השוני בין העקרונות הדטרמיניסטיים כפי שהם מוצגים על-ידי המכניקה הניוטונית לבין מושגי הקרינה והחומר, כמו האופי הדואלי של הקרינה והחומר והאופי ההסתברותי של הרדיואקטיביות.

ב. מטרות בתחום מהות המדע כפי שהן באות לידי ביטוי בשלושת התחומים :

1. הבנת האופן שבו נבנה ומתפתח ידע מדעי והכרת נקודות ציון בהתפתחות הידע הפיזיקלי.
2. מודעות לאופי הזמני והלא מוחלט של הידע המדעי.

3. הבנת היכולות והמגבלות של המדע בכלל ושל הפיזיקה בפרט.
4. הבנת תופעות וייצוגן באמצעות מודלים מדעיים תוך היכרות עם יתרונותיו ומגבלותיו של המודל.
5. הבנת קשרי הגומלין שבין התאוריה והניסוי.
6. הכרת והבנת קשרי גומלין בין הפיזיקה לבין המדעים האחרים, הטכנולוגיה והחברה.

ג. מטרות בתחום פיתוח כשרים ושליטה במיומנויות:

1. יכולת שילוב היבטים כמותיים בתהליכי פתרון בעיות פיזיקליות.
2. רכישה ושימוש במיומנויות חקר בתהליך הלמידה.
3. מיומנויות בתחום האוריינות המידענית (זיהוי, איתור, ארגון ועיבוד מידע, כולל מיומנויות שימוש במחשב של עיבוד תוצאות ניסויים והצגתם).

פירוט המיומנויות שעניינן היבטים **כמותיים** של הפיזיקה:

- א. פתרון בעיות בגישה כמותית.
 - ב. זיהוי יחסים בין משתנים.
 - ג. שימוש נכון ביחידות ובסדרי גודל.
- פירוט מיומנויות ה**חקר** בפיזיקה (המשותפות רובן לכל המדעים הדיסציפלינריים):
- א. שאילת שאלות והשערת השערות (זיהוי או ניסוח של שאלה, הבחנה בין עובדה להשערה).
 - ב. ביצוע של ניסוי על פי תדריך: ניסוי-חקר או ניסוי-אישור.
 - ג. ניתוח נתונים וייצוגם (ארגון מידע, הצגת מידע בייצוגים שונים – טבלה, גרף וכו').
 - ד. הסקת מסקנות (ביסוס טיעון על מידע מדעי, בחינת תקפותה של מסקנה על סמך נתונים וכו').
 - ה. דיווח שלם וממצה של ניסוי ותוצאותיו.
 - ו. מציאת קשר בין ניסוי ובין תאוריה.
 - ז. פיתוח מיומנויות עבודה במעבדה (שימוש נכון בכלים, במכשירי מדידה ובחומרים, שמירה על כללי בטיחות, ארגון עבודה, ביצוע מדויק של הוראות, עבודת צוות).

פירוט מיומנויות ה**שימוש במחשב**:

- א. הפעלת ניסוי ממוחשב (ניסוי מעבדה או הדמיה).

- ב. איסוף, עיבוד וניתוח ממוחשב של תוצאות ניסוי.
- ג. דיווח והצגה של ניסוי או פרויקט באמצעות מחשב.

פירוט של המיומנויות הנדרשות (נוסף לשימוש במחשב) בתחום האוריינות המידענית :

- א. איתור מידע.
- ב. פענוח מידע בטקסט, בטבלאות, בגרפים, בתרשימים ובמודלים.
- ג. ארגון מידע וייצוגו בייצוגים שונים (טבלאות, גרפים, תיאורים מילוליים וכו').

פיתוח עמדות והיבטים ערכיים אצל התלמידים, המשותפים לכל המדעים. הערכים (המשותפים לכל המדעים) אשר יודגשו במסגרת לימודי הפיזיקה הם :

- א. יושרה מדעית, אתיקה והגינות (למשל: דיווח אמת על ממצאים, יושרה בשימוש בידע וציטוט מקורותיו).
- ב. מגבלות המדע, והפיזיקה במיוחד (למשל: עקרון הספק, הרעיון כי אין אמת מוחלטת במדע, מגבלות המדע במתן מענה לכל שאלה).
- ג. סובלנות ופתיחות (למשל: עבודה בצוות, קבלת האחר והשונה, פתיחות לדעות שונות, סובלנות לטעויות ולחידושים, סקרנות).
- ד. אחריות חברתית המבוססת על ידע מדעי (למשל: מודעות לנזקי קרינה רדיואקטיבית ונשק גרעיני, פיתוח וניצול של מקורות אנרגיה תוך מזעור הנזק הסביבתי).

עקרונות פדגוגיים בהפעלת התכנית

דרכים להשגת המטרות

את מטרות ההוראה נשיג באמצעות תהליכי למידה שבהם יכירו התלמידים עקרונות פיזיקליים ויבינו אותם. להשגת הבנה זו אין צורך להתמחות דווקא במערכות מסוימות. לדוגמה: העיסוק במישור המשופע יהיה בעיקר לשם השגת המטרות הגלומות בו (כגון, פירוק וקטורים לרכיבים). בסיום כל פרק וכל יחידת לימוד ייעשה מאמץ להעמיד תמונה שתציג את מקום הפרק או היחידה במסגרת כוללת.

הבלטת העקרונות הפיזיקליים תיעשה בכל שלבי הלימוד ובכל ההיבטים. בשלב הראשון חשוב להרבות בפעילויות שהעיקרון הפיזיקלי משתקף בהן בבהירות מרבית, למשל ניסויים פשוטים ו"שקופים" המדגימים עקרונות. הוראת העקרונות ולמידתם אמורים להשתקף גם בשלבי ההערכה - למשל: הבחינות יכללו שאלות הנוגעות ל"סעיפי עיקרון ישירים" וכך ייעשה גם בהערכת המעבדה.

כדי לעודד תפיסה זו של הוראת עקרונות, ראוי לגוון את פעילויות התלמידים (בשלבי ההוראה ובשלבי ההערכה) ולכלול פעילויות בעלות אופי בין-תחומי (לדוגמה: הצגת שאלות המצריכות השוואה בין תופעות שבאופן מסורתי נלמדו בתחומי פיזיקה שונים).

במסגרת תהליכי הלמידה לקראת השגת המטרות בתחום מהות המדע, התלמידים אמורים להכיר **מודלים מדעיים**, להבין באמצעותם תופעות שונות, לעסוק בהיבטים של **תאוריה וניסוי** ובקשרי הגומלין שביניהם. כמו כן עלינו לשאוף שהתלמידים יוכלו לראות תמונה כוללת של קשרי רוחב בין ענפי פיזיקה שונים ואף ללמוד מעט על קשרי הגומלין עם מדעים אחרים - טכנולוגיה, הומניסטיקה, מוסר וחברה.

פיתוח כישורי חשיבה ולמידה היא מטרת הוראה מרכזית בכל תחום דעת הנלמד במערכת החינוך. ואכן, רוב הכישורים והמיומנויות שתוארו לעיל מהווים חלק מתכניות הלימודים של המקצועות המדעיים כולם ומהווים תשתית השכלתית משותפת לכלל תלמידי החטיבה העליונה. עם זאת, מיומנויות מסוימות מודגשות יותר בלימודי הפיזיקה, למשל השימוש בכלים מתמטיים להצגת חוקי הפיזיקה, או מיומנויות החקר שתוארו לעיל. מיומנויות אלו נרכשות בשלבים שונים של לימודי הפיזיקה - מראשית חטיבת הביניים ועד לסוף החטיבה העליונה, וצריכות לקבל ביטוי בדרכי ההוראה השונות של הפיזיקה: קריאת טקסטים, פעילות במעבדה, פתרון בעיות, טיעון טיעונים, יישומים של הפיזיקה בחיי היום-יום ושימושים טכנולוגיים. יתר על כן, על התלמידים לדעת להשתמש במגוון ייצוגים של מידע וידע (כגון: גרפים, נוסחאות וכד') ולהכיר את יתרונותיהם היחסיים, להתוודע לשימוש במתמטיקה, במחשב ובטכנולוגיה המודרנית במסגרת הפיזיקה ולהתמודד עם ניתוח תרחישים פיזיקליים שונים.

הקנייה משמעותית של הכישורים והמיומנויות ופיתוחם תתבצע אך ורק במהלך הוראת התכנים. מומלץ ללמד מיומנות באופן ספירלי, כמה פעמים, תוך הגדלת המורכבות של היישום. כדי לשפר את רכישת המיומנויות, יש לשלבן בתכנים חוזרים ובהקשרים מגוונים. לכן, מיומנויות אלה תירכשנה באופן בסיסי יותר בכיתה י' ואף לפני כן, בחטיבת הביניים, ותבואנה שוב לידי ביטוי בכיתות החטיבה העליונה וברמת העמקה המתאימה ל-5 יח"ל. התכנית ממליצה בפני המורים להדגיש את הערכים המפורטים לעיל **במהלך הלימוד השוטף** של התכנים והמיומנויות **ולא באופן מיוחד**.

עד כאן עסקנו למעשה בעקרונות הפדגוגיים להשגת מטרות ההוראה. להלן נעסוק בעיקר בפדגוגיה הקשורה באופן ישיר בהפעלת התכנית.

סדר הנושאים בתכנית אינו מחייב. המורה רשאי לבחור רצף הוראה כרצונו. יחד עם זאת עליו לתכנן את ההוראה כך שתיצור תמונה מושגית על הקשר של הנושא עם המסגרת הכוללת של מבנה הדעת של הפיזיקה.

לימודי הפיזיקה בחטיבה העליונה מושתתים על תכנית הלימודים "מדע וטכנולוגיה בחטיבת הביניים", האמורה לתת לתלמידים בסיס של ידע ומיומנויות החופף בחלקו את המפורט לעיל. כדי לחזק אצל התלמידים את הרגשת הרציפות בהוראה ראוי לבדוק בתחילת כיתה י' את רמת השליטה של התלמידים הן בתחום התוכן והן בתחום המיומנויות. בדיקה כזאת תחסוך זמן ותמנע חזרות מיותרות או יצירת פערים.

דרכי הוראה ולמידה

לימודי הפיזיקה חושפים את התלמידים לתופעות טבע המוצגות בדרכים מגוונות והמדגישות במקביל היבטים עיוניים והיבטים יישומיים של תחום הדעת.

רצוי שדרכי ההוראה והלמידה ישלבו דיונים והפעלת שיקולי דעת ביקורתיים במסגרת יחידנית, קבוצתית או כיתתית. בין דרכי ההוראה והלמידה המוצעות: הרצאות, טיעון מבוסס, דיון ורב-שית, פתרון בעיות, הדגמות, סיורים, פעילות מעבדתית, צפייה בסרטים ותמונות, ניתוח סרטים ועיבודם באמצעות מחשב, עיבוד נתונים בעזרת מחשב, הדמיות מחשב ואיסוף מידע ממקורות ספריים ומתקשבים. על החשובות שבהן נרחיב בהמשך.

הפעילות המעבדתית היא אבן יסוד בהוראת הפיזיקה, ולפיכך תשולב באופן שוטף וקבוע בלמידה ותהיה חלק בלתי נפרד ממנה. לשעות ההוראה המומלצות, המצוינות בטבלאות של סעיפי התוכן השונים, תתווספנה אפוא שעות מעבדה עד להיקף של 15 ש"ש בסך הכול.

השימוש במחשבים ייעשה במשולב עם ההוראה בכל מקום שבו למחשב תרומה ייחודית ויתרון יחסי על אמצעים אחרים, כמו: עיבוד נתונים והצגתם תוך שימוש בגיליון אלקטרוני ובתוכנות ליצירת מצגות, שימוש באמצעי מדידה ממוחשבים ובאוגרי נתונים (מעבדה ממוחשבת), שימוש במאגרי מידע ודליה ביקורתית של מידע מאתרי אינטרנט, הכנת דוחות בסיוע מחשב.

ההערות הדידקטיות המלוות כל סעיף בתכנית יסייעו למורה בתכנון תכנית ההוראה. בעזרתן ייערך כהלכה להשגת המטרות ולביצוע המשימות תוך מודעות לקשיי התלמידים ולאפשרויות הדידקטיות העומדות לרשותו בכל שלב ושלב בתהליך הלמידה.

הרחבה והעמקה

בכל אחד מנושאי החובה של תכנית הלימודים מופיעים גם סעיפים של "הרחבה והעמקה". סעיפים אלה הם הצעה לתוספת הוראה למורים המעוניינים בכך. חלק ניכר מהם נלמדו בעבר במסגרת נושאי

החובה או פרקי הבחירה. עיון בסעיפים אלה מצביע על הנושאים החורגים מחומר החובה ומאפשר לדעת היכן מסתיימת החובה ומתחילה ההרחבה. לא ערכנו הבחנה בין סעיפים המהווים **העמקה**, כגון תנועת חלקיק בתווך צמיג, לבין סעיפים שהם בגדר **הרחבה** בלבד, כגון מכשירי מדידה או יישומים של תופעת ההחזרה המלאה.

מסגרת הזמן המוצעת לסעיפים אלה נבנתה על-פי תכנית הלימודים הקודמת ובהתאם להחלטות ועדת המקצוע בעבר. אף שצוין היקף שעות ההוראה לכל סעיף, ההחלטה על מסגרת הזמן היא להכרעתם הבלעדית של המורים הבוחרים ללמדו, ובלבד שהיעד העיקרי, הוראת נושאי החובה, לא ייפגע. נזכיר, כי בדומה לתוכני החובה, גם בנוגע לסעיפים אלו יש להביא בחשבון את שעות פעילות המעבדה.

רוב חומרי הלמידה להוראת הסעיפים המוצעים כאן, ובעיקר אלו שנלמדו בעבר, הם זמינים. עם זאת, למספר סעיפים, כגון חלקיקים יסודיים, קשה למצוא חומרי למידה עדכניים המתאימים לתלמידים ויש אפוא להיעזר באתרי אינטרנט או במאמרים בעיתונות המדעית.

פתרון בעיות בהוראת הפיזיקה

פיזיקה היא דיסציפלינה המתבססת במידה רבה על חישובים כמותיים, ולפיכך חשוב מאוד לפתור בעיות כמותיות במהלך ההוראה והלימוד. פתרון בעיות הדורשות הצבה בנוסחאות גרידא הפך במשך השנים, ללא הצדקה, לחלק מרכזי במסורת ובתרבות של הוראת הפיזיקה. סיבה אפשרית לכך היא שמדובר במשימה המשלבת היבטים שונים של ידע ומיומנות. התלמיד נדרש להבין תרחיש המתואר מילולית, לתכנן אסטרטגיית פתרון, לתרגם את הבעיה לכלי המתמטי, לפתור אותה מתמטית, לפרש את התוצאות, לבחון את סבירותן ולהבין את התהליך המורכב. תהליך זה של פתרון בעיות דורש הבנה מעמיקה וחשיבה מסדר גבוה ולעתים כרוך הדבר באסטרטגיה רב-שלבית. המורים מניחים כי לא ייתכן שתלמידים יוכלו לפתור את הבעיה אם העקרונות אינם נהירים להם היטב. זו הסיבה שרבים מאמינים שפתרון הבעיות מאפשר השגת מטרות הוראה מעבר לפתרון עצמו.

עם זאת, יש לזכור את מגבלותיו של פתרון בעיות ככלי כמעט יחיד המשמש לתרגול. מתברר כי אפשר ללמוד לפתור באופן טכני סוגים שונים של בעיות, תוך מציאת הנוסחה המתאימה והצבה בה, ועם זאת לא להבין הבנה של ממש את עקרונות הפיזיקה ומהותה. העיסוק המתמיד בפתרון "טכני" בלבד של בעיות פיזיקליות מנוון פנים אחרות של הפעילות בפיזיקה. כתוצאה מכך תלמידים מתקשים לענות על "שאלות הבנה" שנדרשת בהן תשובה מילולית, מתקשים בניסוח תשובות ובמקרים רבים אינם מצליחים ליישם במצבים חדשים סוג בעיות שכבר תורגל, מה שמעמיד בספק את רמת הבנתם את הנושא הנלמד.

מכאן שראוי לגוון את פעילויות התלמידים ולהקטין במידה מסוימת את ההתמקדות בטכניקה של פתרון בעיות, ואכן בשנים האחרונות גדל שיעור סעיפי ה"הבנה" בשאלות מבחני הבגרות בפיזיקה, וזוהי מגמה חשובה ומבורכת. הכנסת פעילויות נוספות התומכות ב"ביצועי הבנה" של התלמידים מתבצעת באיטיות בגלל היעדר ניסיון בכיוון זה והצורך לבנות דרכי הערכה לפעילויות הללו. חלק מהפעילויות הן מורכבות ומצריכות חקירה (לעתים מתמשכת) ויכולת ניסוח, חלקן מצריכות שימוש במחשב ועוד.

יש לזכור כי מטרתנו היא להביא את התלמיד להבנת עקרונות מדע הפיזיקה, לבניית תפיסות רחבות ולהכרת דרכי החשיבה והפעולה המאפיינות את הדיסציפלינה, כמו למשל דרך החקר. אין להסתפק אפוא בשינון פרוצדורות ואסטרטגיות, שהן אמצעי בלבד. לכן כאשר התלמידים פותרים בעיה, גם אם לכאורה היא שגרתית, עליהם להיות מודעים להיבטים השונים שנמנו כאן: הסבר מילולי של שלב המעבר מן הבעיה אל המשוואות, פרשנות מילולית של התוצאות (לדוגמה: מהם הפתרונות הרלוונטיים לבעיה הפיזיקלית), בדיקת הסבירות של התוצאה (לדוגמה: בדיקת סבירות של סדרי גודל ויחידות, בדיקת מקרים פרטיים/גבוליים) ותיאורה באופן מילולי. רצוי לחזק אצל התלמידים תרבות של דיון שעיקרו התבוננות בחלופות שונות לפתרון הבעיה (לדוגמה: אנלוגיה למקרים אחרים, הכללה מתבקשת) והצדקת הדרך שנבחרה. פתרון בעיה הוא הזדמנות לחשוב ולהתלבט בטבע העולם הגשמי, וברוח זאת - תכלית ההוראה אינה להגיע ל"תוצאת החישוב שבסוף הספר", אלא להבין את המציאות הגשמית ולהכיר את הדיסציפלינה העוסקת בחקירתה ובהבנתה.

ההדגמה והניסוי בהוראת הפיזיקה

ההדגמה והניסוי הם מדרכי ההוראה הבסיסיות של הפיזיקה ויש להקצות להם מקום במהלך הלמידה. הפעילות במעבדה תלווה את הלימוד לכל אורכו, גם אם משקלה בבחינת הבגרות מהווה רק יחידה אחת מ-5 יחידות הלימוד של הפיזיקה ברמה המוגברת.

תלמידים אמורים להבין שאם מהות מדע הפיזיקה היא **חקר** תופעות הטבע, עליהם להכיר את המציאות הגשמית שהם חוקרים. בדרך כלל נחוצה **חקירה** מעמיקה, מעבר לתצפית בטבע, המצריכה ניסויים יזומים. עם זאת, לעתים (מטעמי חיסכון בזמן, בטיחות וכד') אפשר להסתמך על דיווחים של ניסויים שביצעו מומחים, ולנתח את התוצאות. אלא שאין זו המטרה העיקרית. על התלמידים להתנסות בעצמם בדרכי החקר ולנתח תרחישים בדרך ניסויית "במו ידיהם".

הוראה משולבת, ניסויית-עיונית, במערכת מסוימת היא חשובה מאוד. בדרך הוראה זו אפשר לזהות את קשרי הגומלין בין תאוריה לניסוי, לזהות דפוסי התנהגות של מערכת, להכליל הכללות שהן בגדר השערות, להעמיד את ההכללות במבחן הניסוי, ולחזור לשכלל את התאוריה במידת הצורך. במקרה

שבו יש לכאורה סתירה בין תיאוריה לניסוי, הדיון המשולב חשוב מאוד. מצד אחד, ברור שהתאוריה כפופה לניסוי, שהרי היא אמורה לתאר ולשקף את המציאות, ומצד שני אפשר גם לטעות בפרשנות הניסוי. בנקודה חשובה זו של המדע אין מרבית לעסוק בבית הספר, והיא מחייבת חיזוק ניכר. לא ניתן לדון על פרשנות של ניסוי ללא התנסות מרובה בדרך החקר במעבדה, שבאמצעותה מתוודעים למכלול הבעיות הנלוות לביצוע ניסוי. לכן חשוב להכניס "תרבות של ניסוי" לכיתה: הניסוי חייב להיות חלק אינטגרלי של ההוראה השוטפת ולא כלי שמקציבים לו שעות מעטות ובנפרד מן ההוראה.

אחת הטענות נגד עריכת ניסויים רבים היא שקשה להשיג ניסוי "נקי" שבו התופעה הנחקרת תבודד היטב מ"רעשים". עקב כך, הדיון בניסויים רבים הוא מסובך, וחמור מכך - הניסוי עלול לערער את אמון התלמידים בדיסציפלינה. בעניין זה יש חדשות טובות: **המעבדה הממוחשבת** הפכה את הקערה על פיה, ובניסויים רבים קל מאוד להשיג תוצאות מדויקות. בדרך זו גם אפשר למדוד תופעות בכל קצב רצוי, לאגור נתונים ולנתחם בזמן אמיתי, לראות את התוצאות מידית על המסך ולשפר את הניסוי בו-במקום, לשלוט בניסוי בעזרת המחשב ולחולל תהליכי משוב. יתרונות אלה מאפשרים לבצע ניסויים מדויקים למדי בתחומים נרחבים, והודות להם ניתן לקיים דיון אינטליגנטי בתוצאות. המחשב חולל מהפכה בניתוח תוצאות הניסוי: שוב אין מעבירים את הקו הטוב ביותר "לפי העין". מכאן ואילך אפשר לדבר על ממוצעים, סטיות תקן, שגיאות מדידה, שיפועים ורגרסיות וכיוצא בזה. כך מתאפשרים חקירה ודיון אמיתיים לצד חיזוק אמון של התלמידים בדיסציפלינה.

עם זאת יש לציין מגבלות אחדות בניסויים הממוחשבים: ניסויים אלו עלולים לגרום ל"הקטנת ראש" אצל התלמידים היות וניתן לקבל את התוצאות ואת הגרפים "מן המוכן". אמצעי מדידה או מערכות משוכללות מדי נתפסים על-ידי חלק מהתלמידים כ"קופסה שחורה" בעוד בניסויים "קלסיים" הם חייבים להבין מהם התהליכים המתרחשים בהם. לכן יש למצוא את האיזון הנכון בין ניסויים קלסיים באמצעים פשוטים לבין ניסויים במערכות ממוחשבות.

שימוש בהדמיה מהווה גם הוא סוג של ניסוי ממוחשב המאפשר לקבל מציאות יותר "נקייה" ומהווה גשר בין התאוריה ובין הניסוי האמיתי. יש מקום להוסיף הדמיות גם כאשר לא ניתן לבצע את הניסויים מסיבות טכניות. עם זאת מומלץ להעדיף את הניסוי האמיתי על ההדמיה המתאימה.

מה עדיף - **הדגמה או ניסוי** שהתלמידים מבצעים? יש לשקול זאת דיסקטית בכל מקרה לגופו על פי האמצעים ולוח הזמנים. ברוב המקרים, עדיף שהתלמידים יתנסו בעצמם. הדגמות צריכות להצטמצם למקרים שבהם מחירה (בכסף או בזמן) של פעילות יחידנית גבוה מדי, או כאשר הדבר ממש מתבקש ממהלך הצגת הדברים (במקרה כזה, אפשר שהתלמידים יחזרו אחר כך על ההדגמה בעצמם).

מה עדיף - ניסוי "גילוי" או ניסוי "אישור"? לכאורה עדיף, זה ה"מגלה", החוקר את הטבע בצורה פתוחה ללא דעות קדומות, לעומת זה ה"מאשר", שעלול להיות מוטה לטובת ההשערה שהוא מבקש לבחון. מצד שני, ידוע כי גילויים מסוימים התעכבו אלפי שנים, הרבה מעבר ללוח הזמנים של בית הספר. לפיכך, כאשר בוחרים להשתמש בשיטת ה"גילוי", מומלץ להיעזר בגישה של "גילוי מודרך", כי שיטת הגילוי "הפתוחה" עלולה להיות בלתי יעילה.

לניסוי בכיתה יש להתייחס כמו לניסוי במעבדת המחקר – כלומר, עם קשר גומלין מתמיד עם התאוריה. לעתים נפתח בניסוי וננסה למצוא דפוסי התנהגות ולהכליל, לעתים נשתמש בתיאוריה שכבר התבססה אצל התלמידים וניגש לניסוי כדי לבחון יישום שלה, ולעתים נתחיל מן הניסוי ונגיע לתאוריה ולאחר מכן נשוב לניסוי. העיקר הוא להתנסות התנסות מרובה ביחסי הגומלין שבין התאוריה ובין הניסוי, התנסות שתוביל מצדה להבנה מעמיקה של הנושא הנלמד.

חשוב להדגיש במהלך ההוראה את העקרונות הדידקטיים הבאים :

1. לפני שיודגמו/יבוצעו ניסויים ממוחשבים (הנעזרים בחיישנים) יש לבצע ניסויים באמצעים פשוטים (כגון שימוש ברשם-זמן).
2. לפני שמסרטים גרפים באמצעות הגיליון האלקטרוני, יש להקנות את המיומנות הידנית של סרטוט גרף על נייר מילימטרי, תוך התייחסות למשתנה התלוי ולמשתנה הבלתי תלוי, לקנה המידה של צירי הגרף וליחידותיהם.
3. הצורך ב-:
 - מדידות מדויקות והתייחסות לשגיאות מוחלטות ושגיאות יחסיות.
 - הבחנה בין המשתנה הבלתי תלוי למשתנה התלוי והתעלמות ממשתנים לא רלוונטיים.
 - הבנת המשמעות הפיזיקלית של התוצאות (הייצוג המספרי והגרפי).
 - התאמת ביטוי מתמטי לגרף של המדידות.
 - כתיבת ספרות משמעותיות ויחידות מתאימות.
 - בדיקת סדרי גודל של הפתרון הכמותי.
 - הסקת מסקנות מהניסוי.

השימוש במחשב

המחשב הוא כיום חלק אינטגרלי של הדיסציפלינה המדעית "פיזיקה" כמו גם של מדעים נוספים. הוא כלי נוח ויעיל להצגת תאוריה, לבנייה ולהרצה של ניסויים ולעיבוד נתונים, והוא אף מאפשר פריצת דרך ויצירת תחומי פיזיקה חדשים (לדוגמה: כאוס). פיזיקה היא, כנראה, הדיסציפלינה

שלגביה השימוש במחשב הוא הטבעי ביותר. השימושים בו אינם מאולצים, אלא מתבקשים מאליהם עד כי הצגה של הפיזיקה ללא מחשב תהיה סטרילית ובלתי מייצגת. המחשב מאפשר לפתור את משוואות ההתפתחות בזמן של מערכות שונות גם במקרים ש"פתרונות בית הספר" אינם קיימים. השימוש במחשב מאפשר לבנות מודלים ולהריץ הדמיות המאפשרות בניית אינטואיציה פיזיקלית.

נוסף לכך, באמצעות המחשב ניתן לעבד נתונים בדרך יעילה, והודות ליכולתו הגרפית ניתן להציג שלל ייצוגים גרפיים בעלי ערך מדעי ודידקטי רב. מגוון האפשרויות של המחשב מאפשר קיצור משך הביצוע של הניסויים במעבדה, מאפשר פרויקטים מתמשכים ודרכי הפעלה שונות של תלמידים - יחידנית, קבוצתית ופרונטלית. כפי שנאמר לעיל, המחשב חולל מהפכה גם בנייתוח תוצאות הניסוי: שוב אין מעבירים את הקו הטוב ביותר "לפי העין". מכאן ואילך אפשר לדבר על ממוצעים, סטיות תקן, שגיאות מדידה, שיפועים ורגרסיות וכיוצא בזה. כך מתאפשרים חקירה ודיון אמיתיים לצד חיזוק אמונם של התלמידים בדיסציפלינה.

על המעבדה הממוחשבת כבר הרחבנו את הדיון בסעיף המתייחס להדגמה ולניסוי.

הקשר למקצועות אחרים

פיזיקה ומתמטיקה

מדעי החומר, ובייחוד פיזיקה, הם תשתית מדעית לכל מדעי הטבע וההנדסה. היות והפיזיקה היא מדע כמותי, יש קשר הדוק בינה לבין המתמטיקה. הפיזיקה נעזרת במתמטיקה יותר מאשר בכל דיסציפלינה מדעית אחרת. זהו מאפיין בולט ומהותי של הדיסציפלינה, ולפיכך חלק ניכר מהוראת הפיזיקה קשור במתמטיקה ואי-אפשר להעמיק בפיזיקה ללא ידע מתמטי מתאים. כאשר תלמידים פותרים בעיה, לרוב עליהם לייצג אותה בצורה מתמטית ולהבין את משמעות התוצאה שקיבלו. מדובר כאן בפעולה מדעית מרכזית של בניית מודל. לעתים אין הדבר נאמר מפורשות, ומציגים את הנושא לתלמידים כחיפוש אחרי אלגוריתם ששוין היטב, אולם מומלץ להציג את "הבעיה" כתרחיש מן המציאות, ואת תרגומה לשפה המתמטית - כבניית מודל. פרשנות התוצאות אפשרית כאשר ברור לתלמידים הקשר בין התרחיש למודל. נדגיש כי מטרת פתרון הבעיות אינה הכשרה להתמודדות עם קבוצה של תרחישים ספציפיים (שהם מוגבלים ממילא בגלל אילוצים של רקע מתמטי), אלא הכשרה כללית לשימוש בכלי המתמטי לבניית מודלים שבאמצעותם אפשר לדון בהתנהגות מערכת כלשהי.

לעיתים הידע המתמטי של התלמידים מגביל את הדיון לתרחישים ולתכנים שאפשר לתארם רק בעזרת משוואות ליניאריות או ריבועיות ועל-ידי טריגונומטריה בסיסית. לדוגמה: בהוראת הפיזיקה עוסקים בכוחות קבועים וליניאריים בלבד (פרט לחוק הריבוע ההפוך) מפני שאפשר לפתור אותם

בדרך המתמטית המוכרת לתלמידים, תוך ויתור על דיון בתופעות חשובות ומעניינות. משוואות ההתפתחות בזמן הן משוואות דיפרנציאליות, ובכיתה נלמדים רק מקרים שבהם אפשר להמיר משוואות אלה למשוואות אלגבריות (או טריגונומטריות) פשוטות. ניתן להתגבר על מגבלות הידע המתמטי של התלמידים באמצעות המחשב שפותר באופן נומרי את משוואות ההתפתחות בזמן. חשוב לתרגל שימוש בפתרון נומרי משום שזהו כלי מחקר מרכזי.

במהלך ההוראה רצוי לדון בבעיות בעלות אופי פרמטרי, שהתשובה עליהן היא ביטוי ולא מספר. במקרים רבים כדאי לפתור בעיות באופן פרמטרי, ורק לאחר מכן להציב מספרים. התלמידים אמורים להבין כי פתרון של בעיה באופן פרמטרי הוא פתרון של אין-סוף בעיות בעת ובעונה אחת. מהביטוי שנתקבל אפשר להבין את ההשפעה האיכותית של שינוי כל אחד מן הפרמטרים. במובן זה, הפתרון המתמטי אינו סוגר את הדיון אלא פותח אותו. פתרון פרמטרי מאפשר גם איתור קל יותר של שגיאות בתהליך הפתרון המתמטי. עם זאת, חשוב לזכור כי בתחילת דרכם, התלמידים מתקשים בנינוח פרמטרים ומתמודדים ביתר קלות עם שאלות הדורשות פתרון נומרי קונקרטי.

מומלץ כי בפתרון שאלות שבהן נדרש להביע גודל באמצעות נתוני השאלה, התלמידים יונחו למצוא ביטוי מתמטי-פרמטרי, ובמידת הצורך להשתמש בקבועים בסיסיים (כמו g – תאוצת הנפילה) ורק לאחר מכן להציב את הנתונים הכמותיים של הבעיה.

תצוגה גרפית של ההצגה המתמטית היא אמצעי יעיל מאוד, ובעידן המחשב זמינותה גדלה מאוד. קריאת גרפים, הצגה גרפית של תרחיש וניתוחו – את כל אלה אמור התלמידים ליישם לפי הצורך.

מספר התרחישים הפיזיקליים שהתלמידים יכולים להביא לכלל פתרון מדויק (ללא מחשב) הוא קטן למדי, ולפיכך ראוי להכשירם לבצע אומדנים. לעתים, דומה שאנו "משדרים" לתלמידים שכל מה שהוא פחות מפתרון מדויק אין בו לגיטימיות מדעית, בעוד שעלינו ל"שדר" להם שעריכת אומדנים הוא תהליך המתבקש כמעט בכל שלב של הדיון הפיזיקלי.

אין תכנית זו מגדירה באופן מחייב את רמת המתמטיקה הנדרשת ללימודי הפיזיקה ברמה המוגברת. אכן ניתן להמליץ על רמה של 5 יח"ל, אולם גם תלמידים מצטיינים ב-4 יח"ל יכולים להתמודד בהצלחה עם הפיזיקה של תכנית זו.

פיזיקה וכימיה

במהלך הלימודים, ובעיקר במסגרת הפרק של קרינה וחומר התלמידים נפגשים עם מושגי יסוד שנלמדו בחטיבת הביניים. הרחבה והעמקה של מושגים (כמו: יסוד, אטום, אלקטרון, יון, איזוטופ, מספר אטומי, גרעין ועוד) נעשית גם במסגרת לימודי הכימיה. אפשר לנצל זאת כדי להאיר מושגים אלה מנקודות מבט אחדות ומכיוונים שונים, תוך הדגשת ההבדלים ביניהם מצד אחד והעובדה שמדובר באותו מושג עצמו מצד שני.

דרכי הערכה ומשוב

דרכי ההערכה שזורות וקשורות בדרכי ההוראה והלמידה ואינן רק פועל יוצא שלהן. דרכי ההערכה צריכות להיות מגוונות, מותאמות לדרכי ההוראה ומלוות במשוב מתמיד ובדיאלוג בין התלמידים למורים. דרכים אלו חשובות להערכת הישגים ולקבלת משוב שוטף על ההוראה והלמידה בהתאם לתכנית זו.

הערכת ההישגים תיעשה לאורך כל תהליך הלמידה (הערכה מעצבת) תוך מתן משוב מפורט לשם **קידום** הלמידה ולשם **שיפור** ההוראה. עם זאת, יש כמובן משקל לא מבוטל לבחינות הבגרות בכתב ובמעבדה (הערכה מסכמת).

תהליך הערכה לשם למידה (ה"ל"), שאנו מאמצים, כולל כמה מהלכים מרכזיים, שהמורה והלומדים שותפים בהם:

- מתכננים את מהלכי ההוראה והלמידה.
- מציבים יעדים שאת מידת השגתם מבקשים להעריך.
- מעצבים מטלות וקובעים קריטריונים שלפיהם יוערך ביצוע כל מטלה.
- מעריכים את הביצוע תוך הפקת משוב בונה.
- מאתרים נקודות חוזק בצד קשיים וכשלים ומתכננים מחדש את המהלכים הנחוצים.

בתהליך הערכה זה אמורים הלומדים **להבין מראש** מה מצופה מהם בתחום התכנים ובתחום מיומנויות הלמידה והחשיבה: לאן הם אמורים להגיע ובאלו דרכים יוכלו להשיג את היעדים שהיו שותפים בהצבתם. הלומדים יהיו שותפים פעילים במהלך הלמידה וישפרו בתוך כך את ביצועי ההבנה שלהם בחומר הנלמד.

מתוך תפיסה זו של מהות ההערכה, מוצע להתייחס להיבטים הבאים:

- שמירה על הקשר בין תהליכי ההוראה, הלמידה וההערכה.
- ההערכה תתייחס לביצועי ההבנה של הלומדים הן בתחום התוכן והן בתחום כישורי החשיבה והלמידה.

- ההערכה תתרחש במסגרת **זיאלוג מתמשך בין המורים לתלמידים** להוכחת המסוגלות וההבנות שלהם בחומר הנלמד ובתהליכי הלמידה (כולל הערכה עצמית והערכת עמיתים).
- ההערכה תכלול **מטלות** משמעותיות ומאתגרות, שתתבצענה בסביבות למידה מגוונות (מעבדה, מחשב, אינטרנט ועוד).

מכאן שמומלץ לא להסתפק בהערכה המפיקה ציון מספרי מסכם בלבד. ככל שיאומצו דרכי הערכה איכותיות לאורך תהליך הלמידה כולו, תהווה ההערכה יסוד בונה בתהליכי הלמידה ותגבר ההיענות לצורכי התלמידים השונים: ליכולותיהם, לאינטליגנציות ולסגנונות הלמידה השונים שלהם.

כאמור, הצגת קריטריונים להערכה בפני התלמידים לפני ביצוע המטלות השונות עשויה להגדיל את אחריותם ללמידה ולהישגי הלמידה. בין הקריטריונים שמציבים מראש, יש לכלול קריטריונים המתאיחים גם לעריכת החומר הכתוב בדרך נבונה, תוך הקפדה על ניסוח מובן ובהיר (משפטים נכונים ומשמעותיים המקושרים זה לזה בדרך לוגית, היעדר שגיאות דקדוק וכתוב וכדו'). דרישה זו מופיעה בכל תכניות הלימודים, בכל הגילים ובכל המקצועות. קידום יכולת הביטוי המושכל היא אחת המשימות המוטלות על בית הספר, ולא ניתן להגיע אליה רק בשיעורי ההבעה המועטים המוקצים לכך במערכת השעות. על כן, מומלץ שצוות מורי הפיזיקה וצוות מורי ההבעה יעבדו במשותף על הנחיית התלמידים בכתיבה: מפתרונות לשיעורי הבית, ועד תשובות לשאלות במטלות הערכה, בבחנים או במבחנים.

כלי הערכה

ברמת ההתמחות של התכנית הנוכחית נשתמש **במטלות הערכה מגוונות** בצד **בחנים ומבחנים**. להערכת העבודה הניסיונית במעבדה מומלץ להשתמש **בתיקי עבודות** או **בדוחות ביצוע**. המטלות, הבחנים והמבחנים יהיו בכתב או בעל-פה בזמן מוגדר, על יחידת חומר מוגדרת, לעתים בעזרת דפי נוסחאות, לעתים בעזרת ספר פתוח או בשימוש מושכל בחומרי עזר (כולל חומרים רלוונטיים מהאינטרנט).

מבחנים בכתב, המשמשים אמצעי נפוץ להערכת הישגים, יכולים גם הם לשקף הוראה מגוונת. המבחנים יינתנו בכיתה או כמבחן-בית. המבחנים יכללו מטלות ושאלות מסוגים שונים, שיבדקו תפקודים שכליים שונים וברמות שונות, החל בידיע ובהבנה וכלה בתפקודים שכליים גבוהים (הסבר, השוואה, טיעונים, נימוקים בעד ונגד, ניתוח, הערכה וכדומה). מבחנים אלו צריכים לאפשר לכל תלמיד ותלמידה להראות את הישגיהם ולבטא את כישוריהם ויכולתם בדרכים מגוונות וברמה המתאימה. ההערכה עליהם תהיה באמצעות מחוון שיפתח המורה בשיתוף עם התלמידים, שממדיו מתייחסים ליעדים שהוצבו. ההערכה תכלול משוב מפורט, בהתאם ליעדים שהציבו המורים למהלך

הלמידה, ולא רק באמצעות ציון מספרי מסכם. המחווה הוא כלי ציינון (מתן ציון) המארגן קריטריונים וציוני דרך לביצוע מטלות. הצבת הקריטריונים מראש מאפשרת לתלמידים לדעת מה מצופה מהם בביצוע המטלה וכיצד יוערכו. פריטים מבחינת הברורות בפיזיקה יכולים לשמש דוגמה להערכה מגוונת באמצעות מבחני הישגים.

הערכת פרויקטים

תכנית הלימודים מעודדת ביצוע פרויקטים ניסויים, שהם עבודות חקר מתמשכות, כחלק מתהליך הלמידה. הערכת פרויקט ניסויי בפיזיקה אינה פשוטה וחלק מהותי בה הוא התהליך שהתלמידים עוברים תוך התקדמותם במשימה. בסיום התהליך תתבצע הערכת הפרויקט על בסיס הדוח של התלמידים ובאמצעות בחינה בעל-פה על ה"תוצר". לפני תחילת הפרויקט ראוי לפתח מחווה כך שהתלמידים ידעו מראש מהם הקריטריונים להערכת עבודותיהם. להלן דוגמה למחווה כזו.

במהלך קריאת דוח הפרויקט יש להתייחס לממדים הבאים:

נימוקים לציון	ציון	פירוט לדוגמה	הנושא והניקוד
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ איסוף וארגון החומר התאורטי. ▪ שאלת המחקר (והעלאת השערות לתוצאות או לתשובה לשאלת החקר). ▪ תיאור תכנית הניסוי: <ul style="list-style-type: none"> • ההנחות עליהם הניסוי מבוסס. • הפרמטרים והמשתנים שנבדקו. • הציוד ושיטות המדידה. 	רקע תאורטי, תכנון הניסוי 20%
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ תיאור מבנה מערכת הניסוי. ▪ תיאור תהליך ביצוע המדידות ובידוד משתנים. ▪ תיעוד התוצאות. ▪ עיבוד התוצאות: <ul style="list-style-type: none"> • יצירת משתנים מורכבים. • הצגתם בייצוגים מתאימים: גרף, טבלה, תרשים וקטורי. • ביצוע חישובים. 	מבנה המערכת, ביצוע המדידות ועיבוד תוצאות 30%
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ הצגת הקשר בין ממצאי הניסוי לבין החומר התאורטי הקשור לניסוי (במודלים ממוחשבים, ההצגה תתייחס להבדל בין המודל למציאות). ▪ התחשבות בתוצאות תאורטיות אפשריות של הניסוי 	ניתוח התוצאות ודיון במסקנות

		<ul style="list-style-type: none"> ובאילוצים. ▪ רלוונטיות לנושאים נוספים (חיי היום-יום, תחומים נוספים). ▪ הערכת שגיאות או חישובי השגיאה. ▪ הערכת משמעות שגיאות הניסוי ומקורות השגיאות. 	30%
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ הערכת סבירות הממצאים. ▪ הצעות לשיפורים או בירור נוסף. ▪ שאלות אפשריות חדשות הקשורות לפרויקט. ▪ הצגת חריגות מהתכנון המקורי והנמקתן. 	<p>בקרה ורפלקציה</p> <p>10%</p>
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ כתיבה רהוטה ובהירה של דו"ח הפרויקט תוך שימוש "בשפה פיזיקלית". ▪ איכות וצורת ההגשה. 	<p>הצגת הפרויקט</p> <p>10%</p>

במהלך הבחינה בעל פה יש להתייחס לממדים הבאים :

נימוקים לציון	ציון	פירוט לדוגמה	הנושא והניקוד
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ הסבר שאלת החקר והעלאת השערות לתשובה לשאלת החקר. ▪ הסבר על תכנית הניסוי : <ul style="list-style-type: none"> • השיקולים הקשורים בהנחות שהניסוי מבוסס עליהן. • הפרמטרים והמשתנים שנבדקו. • הציוד שהתלמידים נעזרו בו ושיטות המדידה. 	<p>תכנון</p> <p>20%</p>
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ הסבר מבנה מערכת הניסוי. ▪ ביצוע מדידות : ביצוע מדידות בתחום רלוונטי, השיקולים למדידות מסוימות, הסבר הקשיים והתקלות. ▪ תיעוד התוצאות. ▪ עיבוד התוצאות : <ul style="list-style-type: none"> • יצירת משתנים מורכבים. • הצגתם בייצוגים מתאימים : גרף, טבלה, תרשים וקטורי. • חישובים. 	<p>בניית המערכת, מדידות, רישום תוצאות ועיבודן</p> <p>30%</p>
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ הצגת הקשר בין ממצאי הניסוי לבין החומר התאורטי הקשור לניסוי (במודלים ממוחשבים ההצגה תתייחס להבדל בין המודל למציאות). ▪ התחשבות בתוצאות תאורטיות אפשריות של הניסוי ובאילוצים. ▪ הערכת שגיאות או חישובי השגיאה. 	<p>ניתוח ומסקנות</p> <p>25%</p>

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ הערכת משמעות שגיאות הניסוי ומקורות השגיאות. 	
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ הערכת סבירות הממצאים. ▪ הצעות לשיפורים או לבירור נוסף. ▪ שאלות אפשריות חדשות הקשורות לפרויקט. ▪ הצגת חריגות מהתכנון המקורי והנמקתן. 	<p>בקרה ורפלקציה</p> <p>10%</p>
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ הסבר רהוט ובהיר של הפרויקט תוך שימוש "בשפה פיזיקלית". ▪ שימוש במצגות או באמצעי הדגמה נאותים לתיעוד התהליך, התוצרים והמסקנות. 	<p>הצגת הפרויקט</p> <p>15%</p>

בחינות הברות

בחינות הברות בפיזיקה מהוות הערכה מסכמת לתהליך למידה שהסתיים, והן אף נותנות משוב למורה לצורכי ההוראה בעתיד. בחינות הברות בפיזיקה כוללות בחינה עיונית ובחינה במעבדה. שני סוגי הבחינה בודקים ידע והבנה של תכנים ושליטה במיומנויות כמפורט לעיל (בסעיף על מטרות התכנית), ועל כן הם כוללים פריטי מבחן מגוונים ואמצעי הערכה נוספים המשתנים מדי פעם. הודעה על כך מתפרסמת בכל שנה בחוזרי המפמ"ר.

בתוכנית זו מופיעים בעיות ותרגילים לדוגמה בכל אחד מנושאי החובה והם מכסים את מרבית הסעיפים של התכנית. מטרתו העיקרית של קובץ תרגילים זה, על סעיפיהם המפורטים, היא לתת מושג למורים על היקף הטיפול הנדרש בנושא שהתרגיל עוסק בו. מטרת-משנה של קובץ זה היא הדגמה של שילוב היבטים איכותיים, בצד כמותיים, בהכנת מבחנים או במשימות הערכה אחרות. מטרה זו מחזקת את המסר כי התמחותם של תלמידי הפיזיקה אינה מסתכמת בפתרון בעיות כמותיות, אלא עליה להתבסס על אוריינות מדעית וחשיבה פיזיקלית. אלה תתבטאנה במגוון של מיומנויות כמו הבנת תופעות, עיבוד מידע בדרכים שונות, כתיבה עיונית של ממצאים, הסברים ומסקנות ועוד. בשנים האחרונות, וכן בעתיד, המגמה היא להדגיש היבטים איכותיים גם במבחני הברות, וראוי אפוא לתרגל היבטים אלה בצד התרגול הכמותי.

הוראת הפיזיקה בכיתה י'

בבתי ספר שונים יש מועד הרצוי להתחלת ההתמחות במדעים, ולכן בשיעורי הפיזיקה בכיתות י' יש הרכב מגוון של תלמידים. בבתי ספר שבהם ההתמחות במדעים מתחילה בכיתה י', ישנן כיתות הומוגניות שלהן תלמידים שבחרו ללמוד פיזיקה בהיקף מוגבר. בצדן יש, לעתים כיתות פחות

הומוגניות של לומדי פיזיקה בהיקף רגיל או תלמידים שבחרו להתמחות באחד המדעים, אבל עדיין לא החליטו באיזה מהם (הבחירה מתבצעת רק בכיתה י"א). בבתי ספר אחרים, שגם הם מתחילים את ההתמחות בכיתה י"א, יהיו כיתות י' הטרוגניות לחלוטין, ובהן תלמידים שיבחרו להתמחות בפיזיקה בצד תלמידים שיסיימו את לימודי הפיזיקה בסוף כיתה י'. לכל אחד מסוגי כיתות אלו נחוצה היערכות שונה. כאמור, המורה רשאי לבחור רצפי הוראה כהבנתו, ובחירת תחומי התוכן שבהם תעסוק הכיתה תיעשה בהתאם למבנה הכיתה ולמוכנות תלמידיה. דוגמה לכך היא ההוראה של נושאי תנועה ואור בהקשר לתחום האסטרונומיה, המוסיפה עניין ללימודי הפיזיקה.

אוכלוסיית התלמידים בכיתה י' היא בעלת מוכנות נמוכה יותר מאשר זו של כיתות י"א ו-י"ב, ולו רק מעצם העובדה כי מרביתם לא נחשפו עד כה באופן מעמיק לפיזיקה כדיסציפלינה, ולפיכך קצב הלימוד בכיתה י' אטי יותר. לכן כל נושא יש ללמד ברמה המתאימה לכיתה י' ולהשלים במידת הצורך בכיתה י"ב את הוראת ההיבטים המורכבים יותר מבחינה מושגית ומבחינה מתמטית, כולל מושגים שנשמכים על לימודי פרקים שלא נלמדו עד כיתה י' (כגון: פרקים מסוימים במכניקה ובחשמל המצריכים שימוש בכלים מתמטיים מתאימים).

ההתבססות על הנלמד בחטיבת הביניים, הן בתחום התכנים הפיזיקליים והן בתחום המיומנויות, היא חשובה ומיעלת את ההוראה בכיתה י'.

חלק ב'

פירוט נושאי החובה

מכניקה

הקדמה למכניקה

על מטרות הוראת המכניקה ועל קשיים בהשגתן

- א. לימוד המכניקה הניוטונית הוא הזדמנות ראשונה לתלמידים לפגוש בתאוריה פיזיקלית במלוא מובן המילה. אחת המטרות של הוראת נושא זה היא להציג אב-טיפוס לתאוריה פיזיקלית ולאפשר לתלמידים להתנסות ולחוות מהי פיזיקה ומהו מדע. המכניקה הניוטונית מאפשרת לתלמידים להתמודד עם מגוון היבטים של תאוריה, כולל היבטים מתמטיים.
- לכן, זה המקום לשים דגש על **עיקרי החשיבה המדעית** (העלאת השערות לאור ידע קודם, עקרונות של מודלים ועוד) ולאפשר לתלמידים לחוות חוויה לימודית משמעותית מכך שהם מסוגלים לחזות התנהגות של עצמים בסביבתם על סמך כמה עקרונות פשוטים.
- ב. לימוד המכניקה הניוטונית נועד **לקרב את הלומדים** ככל האפשר **אל התפישה הניוטונית**. לשם כך נחוץ, בין השאר, להבין את **עקרונות המכניקה** ולבנותם על סמך ניסויים פשוטים ובהירים.
- אחד הקשיים בהגשמת מטרה זו הוא העובדה שתלמידים מגיעים לשיעורי המכניקה עם תפישות אינטואיטיביות לגבי תנועה וגורמיה, תפישות שנבנו מגיל צעיר במהלך האינטראקציה עם הסביבה, ולכן הן מושרשות היטב בתודעה. התפישות האינטואיטיביות רחוקות מתפישת העולם הניוטונית ומכבידות על הפנמתה וגיבושה. חשוב אפוא שמורי הפיזיקה יהיו מודעים לקיומן של תפישות אינטואיטיביות, יכירו את אלה הרווחות, יזהו אותן אצל תלמידיהם ויפעילו דרכי הוראה שיאפשרו לימוד והבנה של העקרונות חרף התפישות הקיימות.
- יש להדגיש את הפן הדטרמיניסטי בעולם הניוטוני - ברמה העקרונית וברמה המעשית. יש להביא את התלמידים למצב שבו יהיו מסוגלים לפתור את משוואת התנועה במקרים פשוטים - באופן אנליטי, ובמקרים אחרים - באופן נומרי (לדוגמה: משוואת התנועה הדיפרנציאלית בתנועה הרמונית פשוטה). פתרון נומרי בעזרת גיליון אלקטרוני עשוי לסייע בהבנת הדטרמיניזם.
- ג. במסגרת לימודי המכניקה, התלמידים נחשפים **למושגי יסוד** רבים שנחוצים לא רק להבנת המכניקה הניוטונית, אלא גם להבנת ענפי פיזיקה נוספים. לכן, נוסף לפיתוח יכולת הפעלתם של כלים מתמטיים, חשוב שהתלמידים ירכשו הבנה מושגית. כדי למנוע בלבול בין המושגים הרבים, חשוב שהתלמידים אכן יבינו את המושגים הקודמים לפני הוראת מושג חדש. אין זאת אומרת שיש להמתין עד שתיבנה הבנה מעמיקה של כל המושגים הקודמים - הבנה כזו עשויה להתרחש לאחר שהתלמידים יפגשו את המושגים הקודמים בהקשרים חדשים (לימוד "ספירלי"); הכוונה היא שהתלמידים יהיו מסוגלים להסביר את המושגים הקודמים במילים שלהם ולבצע פרוצדורות הקשורות בהם לפני שיתוודעו למושג חדש.

אחד הקשיים בהבנת מושגים מתחום המכניקה הוא השוני בין משמעותם המוכרת בחיי היום-יום לבין משמעותם בפיזיקה. התאוצה, לדוגמה, נתפשת בחיי היום-יום כהגברת גודל המהירות (speed) (ותאוטה נתפשת כהפחתת גודל המהירות). בפיזיקה, לעומת זאת, התאוצה מוגדרת כקצב שינוי המהירות (velocity). בעיות דומות מתעוררות לגבי "כוח", "עבודה" ומושגים אחרים. כדי למנוע בלבול, חשוב שהתלמידים יהיו מודעים לריבוי המשמעויות. הרקע המתמטי הנדרש ללימודי המכניקה כולל אלגברה וטריגונומטריה. יש מושגים פיזיקליים, כגון "מהירות רגעית", "תאוצה רגעית" ו"עבודה", המוגדרים באמצעות נגזרת או אינטגרל. בתחילת לימוד המכניקה, תלמידים אינם מכירים בדרך-כלל כלים מתמטיים אלה ואף אינם בשלים להתמודד עמם. בשלב זה ניתן אפוא להסתפק בהגדרות אופרטיביות של המושגים הנדונים ולהכלילם באמצעות הנגזרת או האינטגרל בשלב מתאים בעתיד.

ד. מטרה נוספת בלימודי המכניקה היא **הכרת התפתחותם של רעיונות מרכזיים** שהובילו למהפכה המדעית במאה ה-17. הכוונה היא לרעיונות שהתפתחו בעקבות שאלות כגון אלו: האם הארץ נחה או נעה? מהו מסלולם של כוכבי הלכת? לימודי המכניקה צריכים לכלול גם היבטים הומניסטיים של המהפכה המדעית שהתרחשה במאה ה-17. למהפכה זו היו השפעות חברתיות ותאולוגיות רבות נוסף להשפעתה העצומה על התפתחות הטכנולוגיה. ראוי לשבח היבטים אלה בהוראת תחום התוכן, במקומות המתאימים.

ה. רמת המתמטיקה במכניקה אינה גבוהה מדי עבור תלמידים שבחרו במקצוע פיזיקה בהיקף של 5 יח"ל. לכן המכניקה היא ענף פיזיקה שמאפשר לתלמידים **חויה של העמקה**. חוויה כזו אינה מזדמנת בלימוד "קרינה וחומר", למשל.

ו. מטרה נוספת של המכניקה הניוטונית היא לשמש נקודת התייחסות אל **ענפי פיזיקה שמעבר למכניקה הניוטונית** :

תרמודינמיקה - עבודה הנעשית על גופים שאינם נקודתיים, המושגים "חום" ו"אנרגיה פנימית", החוק הראשון של התרמודינמיקה והחוק השני של התרמודינמיקה.

יחסות פרטית - הכרת העובדות האלה: מהירות האור מהווה חסם עליון למהירויות של גופים; המסה של גוף גדלה ככל שגדלה מהירותו.

יחסות כללית - המושגים "מסה אינרציאלית" ו"מסה גרוויטציונית", הקשר ביניהם, עקרון האקוויולנציה וניתוח מנקודת ראות של עקרון האקוויולנציה.

כאוס - הבנת הטענה כי דטרמיניזם אינו מבטיח יכולת ניבוי.

פעילויות תלמידים

פתרון בעיות

פתרון תרגילים ובעיות הוא אחד האמצעים היעילים להבנת המכניקה וליישום עקרונותיה. המכניקה הניוטונית עשירה בבעיות ברמה מתמטית המתאימה לרמת התלמידים, אולם תרגול טכני בלבד עלול לתת ללומדים אשליה של הבנה. כדי להפיק מן התרגול תועלת כדאי להקפיד על כללים אלה:

א. בתחילת כל פרק תתורגל מיומנות של הצבה בנוסחאות בלבד. תרגילים מסוג זה עוזרים לתלמידים לקשור בין מושגים חדשים ומגבירים את ביטחונם. יש להיגמל מתרגול מסוג זה לאחר שמטרותיו הושגו.

ב. יש לכלול תרגילים המצריכים הבנה מושגית.

ג. יש לכלול גם תרגילים שפתרון מתבצע בעזרת תרשים (לדוגמה: סרטוט התנעים של גופים לפני התנגשות ואחריה וסרטוט התנע הכולל).

ד. התרגול יכול גם מטלות שבהן התלמידים נדרשים להתבטא באופן מילולי.

ה. לצד התרגילים הכמותיים שבהם נתונים ערכים מספריים, חשוב לעסוק גם בתרגילים פרמטריים, שבהם התלמידים מתבקשים לחקור את התלות של גודל פיזיקלי בפרמטרים שונים. הכנסת תרגילים פרמטריים תיעשה בהדרגה, בהתאם לרמת הבשלות של התלמידים.

ו. אין להרבות בתרגילים בעלי מורכבות טכנית גדולה. פתרון תרגילים הכוללים כמה גופים הקשורים ביניהם בחוטים הכרוכים סביב כמה גלגלות - מצריך זמן רב. תרגילים כאלה אינם משרתים את מטרות תכנית הלימודים במכניקה.

הסתכלות רחבה

בלימוד המכניקה פוגשים התלמידים מספר רב של מושגים חדשים, עקרונות וחוקים. כדי להאיץ את בנייתה של תמונה כללית והיררכית של המושגים והכללים, מומלץ לערוך פעילויות שבמסגרתן יתארו תלמידים את הקשרים בין המושגים, למשל באמצעות מפות של מושגים.

ניסויים ופעילויות מחשב

ראו מבוא כללי לתכנית הלימודים, עמודים 20 - 23.

חלוקה לפרקים ושעות מומלצות

שעות מומלצות	שם הפרק	מס' הפרק
24	קינמטיקה	1
46	דינמיקה	2
13	התנע ושימורו	3
22	אנרגיה מכנית ושימורה	4
6	מודל הגז האידיאלי	5
11	תנועה הרמונית פשוטה	6
13	כבידה	7
135	סה"כ	

פרק 1 : קינמטיקה

שעות	הנושא
1	1.1 מושגי יסוד בתנועה לאורך קו ישר
2	1.2 תיאור תנועה - מקום כפונקציה של הזמן
2	1.3 תנועה קצובה לאורך קו ישר
2	1.4 תנועה יחסית
1	1.5 תנועה במהירות משתנה
7	1.6 תנועה בתאוצה קבועה
1	1.7 תנועה בתאוצה משתנה
1	1.8 מושגי יסוד בתנועה במישור
4	1.9 וקטורים
3	1.10 המהירות והתאוצה בתנועה במישור
24	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
1		$\Delta \bar{x} = \bar{x}_2 - \bar{x}_1$ $\bar{x}_{A,B} = \bar{x}_A - \bar{x}_B$	<ul style="list-style-type: none"> - מושגי היסוד "אורך" ו"זמן": מידדתם ויחידותיהם, מערכת היחידות התקנית SI. - המושגים: "ציר מקום", "מערכת ייחוס", "מקום יחסי", "מרחק", "העתק", "דרך". 	1.1 מושגי יסוד בתנועה לאורך קו ישר
2	<ul style="list-style-type: none"> - ניסוי: דגימת מקום וזמן של גוף נע בתנועה כלשהי על-ידי רשם-זמן. 		<ul style="list-style-type: none"> - תיאור מקומו של גוף כפונקציה של הזמן על-ידי ההצגות: טבלה, גרף, ביטוי מתמטי. - יתרונות וחסרונות של ההצגות השונות. - תרשים תנועה ("תרשים עקבות"). 	1.2 תיאור תנועה - מקום כפונקציה של הזמן
2	<ul style="list-style-type: none"> - בניית טבלת מקום-זמן וסרטוט גרף מקום-זמן על פי "תרשים עקבות" של גוף שנע בתנועה קצובה. 	$\bar{v} = \frac{\Delta \bar{x}}{\Delta t}$ $x = x_0 + vt$	<ul style="list-style-type: none"> - תנועה קצובה; המהירות בתנועה קצובה. - תיאור המקום כפונקציה של הזמן (ובקיצור: פונקציית מקום-זמן) על-ידי ביטוי אלגברי ועל-ידי גרף. - המהירות כשיפוע הגרף. - תנועה קצובה למקוטעין. - מהירות ממוצעת. 	1.3 תנועה קצובה לאורך קו ישר
2	<ul style="list-style-type: none"> - הדמיה: חקירת מהירות ביחס למערכות ייחוס שונות כפונקציה של הזמן. 	$\bar{v}_{A,B} = \bar{v}_{A,S} - \bar{v}_{B,S}$	<ul style="list-style-type: none"> - יחסיות התנועה. - מהירות יחסית. 	1.4 תנועה יחסית
1	<ul style="list-style-type: none"> - גיליון אלקטרוני: חישוב מהירות רגעית ממשוואת מקום-זמן. הערכת מהירויות רגעיות מטבלת מקום-זמן. 	$\bar{v} = \frac{\Delta \bar{x}}{\Delta t}$ $\bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{x}}{\Delta t}$	<ul style="list-style-type: none"> - המושגים: "מהירות ממוצעת", "מהירות רגעית". - מהירות ממוצעת כשיפוע מיתר בגרף מקום-זמן. - מהירות רגעית כשיפוע משיק בגרף מקום-זמן. 	1.5 תנועה במהירות משתנה

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
7	- ניסוי: דגימת מקום וזמן של גוף הנופל חופשית ע"י רשם-זמן או מד-טווח.	$v = v_0 + at$ $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ $x = x_0 + \frac{v_0 + v}{2} t$ $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$	<ul style="list-style-type: none"> - תנועה בתאוצה קבועה. - הצגת המקום והמהירות כפונקציה של הזמן ע"י ביטויים אלגבריים וע"י גרפים. - נפילה חופשית, זריקה אנכית. 	1.6 תנועה בתאוצה קבועה
1	- גיליון אלקטרוני: חישוב תאוצות רגעיות על פי טבלת מקום-זמן.	$\bar{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ $\bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$	<ul style="list-style-type: none"> - המושגים: "תאוצה ממוצעת", "תאוצה רגעית". - תאוצה ממוצעת כשיפוע מיתר בגרף מהירות-זמן. - תאוצה רגעית כשיפוע משיק בגרף מהירות-זמן. 	1.7 תנועה בתאוצה משתנה
1			<ul style="list-style-type: none"> - המושגים: "מקום" ו"העתק" בתנועה במישור. 	1.8 מושגי יסוד בתנועה במישור
4			<ul style="list-style-type: none"> - אפיון הווקטור באמצעות גודל וכיוון, חיבור וקטורים בדרך גאומטרית, שוויון וקטורים, וקטור האפס, וקטור נגדי, וקטור שקול, חיסור וקטורים בדרך גאומטרית. - רכיבים של וקטור, חיבור וקטורים בדרך אלגברית, כפל וקטור בסקלר. 	1.9 וקטורים
3	- הערכת כיוון התאוצה על פי וקטורי המהירות.	$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ $\bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$	<ul style="list-style-type: none"> - המושגים: "מהירות כווקטור", "תאוצה כווקטור". - כיוון התאוצה בתנועה קצובה על מסלול עקום. - רכיבי תאוצה: רכיב משיקי ורכיב ניצב למשיק (רדיאלי). 	1.10 המהירות והתאוצה בתנועה במישור

קינמטיקה: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

קינמטיקה - תנועה לאורך קו ישר

1.1 מושגי יסוד בתנועה לאורך קו ישר (1 שעה)

- א. את מושגי היסוד "אורך" ו"זמן" מומלץ להציג כך:
יחידות אורך: יחידות סובייקטיביות (אמה, רגל...), ויחידות מוסכמות (ס"מ, מטר, ק"מ...);
המטר כיחידה התקנית (מערכת יחידות SI).
כדאי להציג סדרי גודל של אורכים (מממדי הגרעין ועד ממדי היקום הנראה).
יחידת הזמן: דיון דומה לדיון על יחידת האורך.
יש לקיים דיון ראשוני בשיטות המדידה של אורך ושל זמן ולהראות כי למכשירי מדידה שונים אין דיוק אחיד וכי למדידה אין תוצאה מוחלטת.
- ב. המושג "ציר מקום": יש להדגיש את חוסר הממשות של הציר, שהוא כלי עזר בלבד. יש להדגיש את החופש לבחירה חלופית של ציר (השרירותיות בבחירת הכיוון, ה"ראשית" ויחידת האורך).
"מערכת ייחוס" תוגדר כציר מקום שבעזרתו נקבעים מקומותיהם של גופים.
- ג. המושגים "מקום יחסי", "מרחק", "העתק" ו"דרך": יש להדגיש את אי-התלות של "המקום היחסי", ה"מרחק" וה"העתק" בבחירת הראשית של ציר המקום. כמבוא לווקטורים שבהמשך, יש להדגיש כי הסימן של ההעתק מעיד על כיוון התקדמותו של הגוף. יש לציין כי על פי רוב, ההעתק אינו אורך הדרך הכוללת שהגוף עבר בין שני זמנים.

1.2 תיאור תנועה - מקום כפונקציה של הזמן (2 שעות)

- א. **טבלה, גרף ונוסחה מתמטית** הם דרכים שונות לתיאור תנועה. יש לעמוד על היתרונות והחסרונות של כל אחד מהתיאורים האלה. לעתים קרובות, תלמידים מתקשים בהבנת הקשר בין תנועה של גוף לבין ייצוגים של התנועה (טבלה, גרף ונוסחה). לכן יש להתעכב על כך הן בשלב זה והן בכל המהלך של הוראת הקינמטיקה.
- ב. "תרשים עקבות": סדרת נקודות המתארות את מקומו של הגוף במרווחי זמן שווים. יש לדון בדרכים השונות לקבלת "תרשים עקבות" של גוף: רשם-זמן (נקודות על סרט נייר), תצלום סטרובוסקופי, מד-טווח המחובר למחשב (נקודות על צג המחשב), הדמיית מחשב (נקודות על צג המחשב).
- ג. יש לתעד תנועה כלשהי באמצעות רשם-זמן (ראו הצעות ב"הדגמות וניסויים" שלהלן) ולתאר אותה באמצעות טבלה (עמודת זמן ועמודת מקום) וגרף מקום-זמן.
חשוב שהתלמידים יוכלו לקשור בין תנועת הגוף לבין הנקודות המסומנות על סרט הנייר.
רצוי שהתלמידים יסרטטו על סרט הנייר ציר מקום, יקבעו ויסמנו את הנקודה שבה חלף הגוף ברגע $t = 0$, ועל פי בחירה זו, יציינו ליד כל נקודה את הרגע שבו היא נרשמה. לאחר מכן יסרטטו נקודות במערכת צירים, המייצגות את מקום הגוף כפונקציה של הזמן.

הדגמות וניסויים

- א. תנועת היד בעת משיכת סרט נייר העובר ברשם-זמן.
- ב. תנועת קרונית על משטח מרגע שהיא נדחפת עד הרגע שבו היא נעצרת. אל הקרונית קשור סרט נייר העובר ברשם-זמן.

1.3 תנועה קצובה לאורך קו ישר (2 שעות)

- א. **תנועה קצובה**: יש להגדיר "תנועה קצובה" כתנועה שבה היחס $\Delta x / \Delta t$ הוא קבוע (אינו תלוי בבחירת משך הזמן). קבוע זה הוא המהירות של הגוף.
- ב. בכל מהלך הוראת הקינמטיקה, יש להראות כי כל מושג קינמטי חדש נגזר ממושגי היסוד של הקינמטיקה: "אורך" ו"זמן".
- ג. ניתוח של תנועה קצובה: כדאי לערוך ניסויים לשם חקירה ותיאור של תנועה קצובה (ראו להלן "הדגמות וניסויים"), או להציג לתלמידים תרשימי עקבות מוכנים (כדי לחסוך זמן) לשם ניתוח התנועה. לגבי ניסוי באמצעות רשם-זמן: חשוב שהתלמידים יוכלו לתאר את התנועה באופן איכותי, על פי הנקודות המסומנות, ויעשו זאת לפני הניתוח הכמותי. לאחר מכן יסרטו התלמידים גרף "מקום-זמן" ויחשבו ממנו את המהירות הממוצעת על פי השיפוע.
- ד. מומלץ להציג בפני התלמידים סדרי גודל של מהירויות בטבע.
- ה. **מהירות ממוצעת**: כדאי לקשור מושג זה ל"תנועה קצובה למקוטעין". "המהירות הממוצעת" תוגדר כיחס בין העתק הגוף לבין פרק-זמן התנועה המתאים. יש להדגיש כי מהירות ממוצעת אינה שווה (בהכרח) לממוצע מהירויות. המהירות הממוצעת היא ממוצע משוקלל של המהירויות על פי הזמן - המהירות שהייתה לגוף לו עבר העתק זהה בפרק זמן זהה בתנועה קצובה. המושג מובא בעיקר לשם הגדרת המהירות הרגעית שתוצג בהמשך (ולשם חישוב אופרטיבי של מהירות רגעית על פי תוצאות ניסוי). לכן התרגול הקשור במושג צריך להתמקד בהבנת המושג ובשימוש בו לשם הערכת מהירות רגעית.

הדגמות וניסויים

- א. תנועת כדור בגליצרין הנמצא בתוך משורה: מטילים כדור פלדה קטן לתוך הגליצרין, מודדים את הזמן באמצעות שעון-עצר, ואת מקום הכדור מודדים על פי שנתות המסומנות על המשורה.
- ב. חקירת נפילת מגנט דרך צינור אלומיניום: אל המגנט קשור סרט נייר, ועליו נרשמות נקודות על-ידי רשם-זמן (משלב מסוים, תנועת המגנט היא קצובה).
- ג. חקירת תנועת בועה בתוך צינור שקוף המכיל נוזל: ניתן להאט את מהירות הבועה על-ידי הטיית הצינור בזווית.

1.4 תנועה יחסית (2 שעות)

- א. יש לדון במושגים "מקום", "מהירות" ו"תאוצה" כגדלים יחסיים. יש לחזור ולהדגיש זאת במקומות המתאימים בכל מהלך הוראת המכניקה. מומלץ להיעזר בהדמיית מחשב לשם התבוננות בתנועות מנקודות ראותם של צופים שונים.
- ב. מומלץ לסרטט גרפי מקום-זמן של תנועתו הקצובה של גוף, כאשר המקום נקבע ביחס למערכת ייחוס שונות (שנעות האחת ביחס לאחרת בתנועה קצובה).
- ג. יש להציג את טרנספורמציית גלילאו לגבי המהירות.

1.5 תנועה במהירות משתנה (1 שעה)

- א. "מהירות רגעית" תוגדר (הגדרה פורמלית) כגבול שאליו שואף היחס $\Delta x / \Delta t$ כאשר פרק הזמן Δt שואף לאפס. אין הכרח להתבטא במונחים של החשבון האינפיניטסימלי, וניתן להסתפק בהדגמת חישוב אלגברי של גבול (למשל לגבי הפונקציה $x(t) = t^2$). חישובים אחדים של מהירויות ממוצעות, כאשר מרווח הזמן Δt הולך וקטן, ייעשו באמצעות מחשבון, והאחרים - באמצעות גיליון אלקטרוני. התלמידים יסתפקו בחישוב מינימלי של מהירות רגעית באופן אלגברי.
- ב. יש להראות כי **מהירות ממוצעת שווה לשיפוע המיתר המתאים** בגרף $x(t)$, וכי המהירות הרגעית שווה לשיפוע המשיק המתאים. על התלמידים לדעת להסיק מגרף מקום-זמן מתי מהירות הגוף הולכת וגדלה, מתי היא קבועה ומתי היא הולכת וקטנה.
- ג. יש להציג את המושג **פונקציית מהירות-זמן** ולהדגים חישוב של פונקציה כזו כשניתנת פונקציה של מקום-זמן (למשל לגבי $x(t) = t^2$).
- ד. יש להגדיר אופרטיבית מהירות ברגע t בהינתן טבלת מקום-זמן (על פי המהירות הממוצעת מרגע $t - \Delta t$ עד רגע $t + \Delta t$). על התלמידים להבין מדוע שיטה זו עדיפה (בדרך כלל) על השיטה הנסמכת על הגדרת מהירות רגעית (כשנתונים ערכים בדידיים).

גיליון אלקטרוני

מהירות רגעית: בוחרים בפונקציית מקום-זמן של גוף הנע לאורך קו ישר, למשל $x(t) = t^2$. מחשבים את מהירות הגוף ברגע $t = 1s$: תחילה מחשבים באמצעות מחשבון את המהירות הממוצעת מרגע $t_1 = 1s$ עד רגע $t_1 + \Delta t$, כאשר למשל $\Delta t = 1s, 0.8s, 0.6s, 0.5s$. לאחר מכן מחשבים מהירויות ממוצעות עבור ערכי Δt ה"שואפים לאפס" באמצעות גיליון אלקטרוני.

1.6 תנועה בתאוצה קבועה (7 שעות)

- א. המונח המתאר את קצב שינוי המהירות הוא **תאוצה**. המונח "תאוצה" מיותר.

ב. יש לעמוד על ההבדל בין המונחים "האצה" ו"האטה" בחיי היום-יום לבין המונח "תאוצה" בפיזיקה.

ג. חשוב להדגיש כי תאוצה חיובית תיתכן בשני מקרים:

1. כאשר הגוף נע בכיוון החיובי ומגביר את גודל מהירותו;

2. כאשר הגוף נע בכיוון השלילי ומקטין את גודל מהירותו.

באופן דומה, גם תאוצה שלילית תיתכן בשני מקרים:

1. כאשר הגוף נע בכיוון החיובי ומקטין את גודל מהירותו;

2. כאשר הגוף נע בכיוון השלילי ומגביר את גודל מהירותו.

לאחר הדין בתנועה בשני ממדים, ניתן לתרגם את האמור לעיל כך: ארבע הנוסחאות הרשומות בטבלת פירוט הנושאים בקינמטיקה (סעיף 1.6) משרתות כל תנועה שוות-תאוצה.

ד. יש לחקור נפילה חופשית כדוגמה לתנועה בתאוצה קבועה. אם התלמידים ערכו בעבר ניסויים באמצעות רשם-זמן, ניתן לערוך את ניסוי הנפילה החופשית בעזרת מד-טווח המחובר למחשב.

ה. מומלץ לדון גם בזריקה אנכית כלפי מעלה, לנתח את תרשימי המהירות כתלות בזמן ולהראות כי השיפוע אינו משתנה בשיא הגובה. (התאוצה שלילית ושיפועה יורד במשך כל התנועה).

הדגמות וניסויים

מתעדים את "עקבותיו" של גוף הנופל חופשית באמצעות רשם-זמן, או באמצעות מד-טווח המחובר למחשב. המטרה העיקרית של ניסוי זה היא לבחון את סוג התנועה. המטרה המשנית היא חישוב התאוצה. בשני המקרים (רשם-זמן ומחשב) מומלץ להעביר את הנתונים לגיליון אלקטרוני, לסרטט תחילה גרף מקום-זמן ואחר כך לסרטט גרף מהירות-זמן. אין להניח מראש שמדובר בתנועה שוות-תאוצה, לכן לא ניתן להסתמך על כך שהמהירות הממוצעת שווה בדיוק למהירות הרגעית באמצע פרק הזמן; יש לבחור פרקי זמן קצרים (ככל האפשר) לשם חישוב המהירות הממוצעת.

1.7 תנועה בתאוצה משתנה (1 שעה)

א. יש להגדיר את התאוצה הממוצעת והרגעית בתהליך דומה להגדרת המהירות הממוצעת והרגעית (הגדרה פורמלית והגדרה אופרטיבית).

ב. יש להראות כי תאוצה ממוצעת שווה לשיפוע המיתר המתאים בגרף $v(t)$ וכי התאוצה הרגעית שווה לשיפוע המשיק המתאים.

קינמטיקה - תנועה במישור

1.8 מושגי יסוד בתנועה במישור (1 שעה)

- א. יש להראות כי המושגים "מקום" ו"העתק" במישור הם הכללה של המושגים בממד אחד.
 ב. מוצע להציג את "כלל המשולש" לגבי חיבור העתקים כדיון מקדים לדיון בווקטורים.

1.9 וקטורים (4 שעות)

- א. מומלץ להציג וקטור כגודל שתכונותיו הגאומטריות הן כתכונות ההעתק; וקטור מאופיין על-ידי גודל, כיוון וכלל חיבור.
 ב. מומלץ שהתרגילים הראשונים בנושא וקטורים יעסקו בפעולות בין וקטורים בדרך גאומטרית ובאופן איכותי. רק לאחר מכן תיושם הדרך האלגברית.

1.10 המהירות והתאוצה בתנועה במישור (3 שעות)

- א. **המהירות כווקטור**: לצד ההגדרה הפורמלית של המהירות בתנועה בשני ממדים, יש לעסוק בהערכת המהירות מתוך תרשים עקבות ולהדגיש כי המהירות הרגעית משיקה למסלול התנועה, בכיוון תנועת הגוף.
 ב. **התאוצה כווקטור**: לצד ההגדרה הפורמלית של התאוצה בתנועה בשני ממדים, יש לדון בהערכת התאוצה מתוך תרשים עקבות (הגדרה אופרטיבית לתאוצה): למצוא את הווקטורים \vec{v}_1 ו- \vec{v}_2 ; למצוא את השינוי במהירות $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$; למצוא את וקטור התאוצה הרגעית ולייחס וקטור זה לנקודה כלשהי במרווח הזמן (על פי משפט ערך הביניים – סמוך לאמצע פרק הזמן ולא אמצע ההעתק). יישום הערכת התאוצה בעזרת שינוי המהירות $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ בדרך גאומטרית, מקל על התלמידים להפנים את הכלל שכאשר $\Delta v \neq 0$, יש תאוצה **תמיד**.
 ג. תנועה קצובה תוגדר כתנועה שבה המהירות **קבועה בגודלה**. יש להראות כי תנועה קצובה על מסלול עקום היא תנועה מואצת, ושהתאוצה ניצבת בכל נקודה למשיק למסלול התנועה.
 ד. יש להראות כי וקטור התאוצה פונה תמיד לצד הקעור של המסלול.

פרק 2 : דינמיקה

שעות	הנושא
2	2.1 כוחות ומדידתם
3	2.2 תכונות של כוחות
3	2.3 התמדה
4	2.4 מתיחות, כוח נורמלי וכוח חיכוך
4	2.5 ניתוח מצבי התמדה פשוטים
4	2.6 החוק השני של ניוטון
2	2.7 כוח הכובד, והמסה כמדד לעצמתו
9	2.8 יישום החוק השני לגבי תנועה לאורך קו ישר
4	2.9 תנועה במישור בהשפעת כוח קבוע
6	2.10 תנועה מעגלית
5	2.11 מערכות ייחוס
46	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2	- ניסוי: חוק הוק.	$\vec{F} = k\Delta\vec{l}$	- המושג "כוח", כוח הכובד. - תכונת האלסטיות ותכונת הלינאריות של קפיץ. - דינמומטר. - הגדרה ראשונית של יחידת הכוח "ניוטון". - מאזני קפיץ; הגדרה ראשונית למושג "משקל" ככוח הכובד.	2.1 כוחות ומדידתם
3	- הדגמה: כוחות מתחברים על פי כלל חיבור ההעתקים. - הדגמה: כל פעולת כוח היא צד אחד של אינטראקציה. - ניסויים: החוק השלישי של ניוטון באופן כמותי. - דוגמאות: - (1) כוחות הידרוסטטיים. - (2) כוחות מגנטיים.	$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$	- הכוח כווקטור. - המושג "כוח שקול". - חיבור כוחות (באופן גאומטרי ובאופן אלגברי). - החוק השלישי של ניוטון.	2.2 תכונות של כוחות
3	- הדגמה: תנועת גוף על מסלול עם חיכוך קטן. - הדגמה: היחלצות ממסילה עקומה. - הדגמה: עגלת התמדה. - סרטון: חוק ההתמדה/היקום המכני.		- התמדה. - תנאי להתמדה ($\sum \vec{F} = 0$). - התמדה בציר מסוים.	2.3 התמדה
4	- ניסוי: דינמומטר אופקי קשור לשתי משקולות בחוטים הכרוכים סביב שתי גלגילות. - הדגמה: התעקמות משטח שולחן בעת העמסתו.	$f_k = \mu_k N$ $f_s \leq \mu_s N$	- מתיחות בחתך רוחב ומתיחות של חוט. - כוח נורמלי; מודל קפיצים. - אדהזיה; חיכוך קינטי; חיכוך סטטי.	2.4 מתיחות, כוח נורמלי וכוח חיכוך
4	- הדגמות שונות של מערכות הכוללות חוטים, משקולות ודינמומטרים.		דוגמאות: - גוף נגרר במהירות קבועה על משטח אופקי באמצעות כוח אופקי ובאמצעות כוח נטוי.	2.5 ניתוח מצבי התמדה פשוטים

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4	<ul style="list-style-type: none"> - דף עבודה : מציאת הקשר בין כיוון הכוח השקול וכיוון התאוצה (בתנועה חד-ממדית ובתנועה דו-ממדית). - ניסוי : תלות התאוצה a ב-$\Sigma \vec{F}$ בתנועה חד-ממדית. - ניסוי : מדידת היחס $\frac{\Sigma \vec{F}}{a}$ לגבי גופים שונים בתנועה חד-ממדית. - ניסוי : תלות התאוצה a ב-$\Sigma \vec{F}$ בתנועה דו-ממדית. 	$\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$	<ul style="list-style-type: none"> - הקשר בין כיוון הכוח השקול לבין כיוון התאוצה בתנועה בקו ישר ובמישור. - הקשר בין גודל הכוח השקול לבין גודל התאוצה בתנועה לאורך קו ישר ובמישור ($a \propto \Sigma \vec{F}$). - המסה של גוף כמדד להתמדתו (מסה התמדית) $m = \frac{\Sigma F}{a}$. - הקילוגרם - יחידת המסה ב-SI. - ניסוח החוק השני של ניוטון. - משוואת תנועה. 	2.6 החוק השני של ניוטון
2	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה : "מסה אינרציאלית" ו"מסה כובדית" הן גדלים פרופורציוניים. 	$\rho = \frac{m}{V}$	<ul style="list-style-type: none"> - המסה של גוף כמדד לעצמת כוח הכובד הפועל עליו (מסה כובדית). - מדידת מסה באמצעות מאזני כפות. - צפיפות ומשקל סגולי. 	2.7 כוח הכובד, והמסה כמדד לעצמתו
9	<ul style="list-style-type: none"> - ניסויים : מציאת מקדם החיכוך, יישום החוק השני של ניוטון במערכות דו-גופיות. - גיליון אלקטרוני : פתרון נומרי של משוואת תנועה. 		<ul style="list-style-type: none"> דוגמאות : - תנועה על משטח אופקי ועל משטח משופע בהזנחת החיכוך וללא הזנחתו. - תנועת מעלית. - הוראת מאזני קפיץ הנמצאים בתוך מעלית כאשר היא נעה במהירות קבועה, כאשר היא מואצת וכאשר היא נופלת חופשית. - כוחות חיכוך הפועלים על מכונית בהאצה ובבלימה ; האצת גוף באמצעות כוח חיכוך. - מד-תאוצה - גוף קשור בחוט לתקרת מכונית מואצת. - האצת שני גופים הקשורים בחוט. - המושגים "דטרמיניזם" ו"יכולת ניבוי". 	2.8 יישום החוק השני לגבי תנועה לאורך קו ישר

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4	- ניתוח תרשים-עקבות של גוף שנזרק. - ניתוח סרטון וידאו של גוף הנזרק באוויר.		- זריקה אופקית: הרכיבים האופקיים והאנכיים של המקום, המהירות והתאוצה; התנועה הדו-ממדית. - זריקה משופעת. - הכללה לתנועה בהשפעת כוח קבוע.	2.9 תנועה במישור בהשפעת כוח קבוע
6	- דף עבודה: תלות התאוצה הרדיאלית במהירות התנועה וברדיוס המסלול המעגלי.	$a_r = \frac{v^2}{R}$ $\Sigma F = m \frac{v^2}{R}$ $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ $\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$	- התאוצה והכוח בתנועה קצובה במעגל. - תנועה קצובה במעגל כתנועה מחזורית: זמן-מחזור, תדירות. - מהירות זוויתית בתנועה קצובה במעגל. - דוגמאות לתנועה קצובה במעגל: 1. מטוטלת קונית. 2. תנועה על כביש מעגלי, אופקי ונטוי. - התאוצה והכוח בתנועה מעגלית שאינה קצובה. - מהירות זוויתית רגעית. - דוגמה לתנועה מעגלית שאינה קצובה: מטוטלת פשוטה.	2.10 תנועה מעגלית
5		$\vec{v}_{A,B} = \vec{v}_{A,S} - \vec{v}_{B,S}$ $\vec{a}_{A,B} = \vec{a}_{A,S} - \vec{a}_{B,S}$ $w = mg'$	- המושג "גוף חופשי". - החוק הראשון של ניוטון. - כדור הארץ כמערכת ייחוס אינרציאלית בקירוב. - מטוטלת פוקו (איכותי). - עקרון היחסות של גלילאו. - נוסחאות הטרנספורמציה של גלילאו עבור התאוצה (תנועה לאורך קו ישר). - עקרון האקוויולנציה ושימוש בו לניתוח תנועה ביחס למערכות מואצות. - המושגים: "משקל", "כיוון מטה", "כיוון אופקי".	2.11 מערכות ייחוס

דינמיקה: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

2.1 כוחות ומדידתם (2 שעות)

- א. יש להדגיש כי האלסטיות של הקפיץ היא המאפשרת את הפיכתו למד-כוח. האופי הלינארי אמנם מקל על הכיול, אולם אינו חיוני להפיכתו למד-כוח.
- ב. יש לערוך ניסוי למציאת הקשר בין כוח הפועל על קפיץ לבין שיעור התארכותו ("חוק הוק"). ניתן להגדיר באופן זמני יחידת כוח שרירותית (משקל של גוף מסוים), או להגדיר את היחידה "ניוטון" באופן זמני כמשקלם של 102 סמ"ק מים סמוך לפני הארץ.
- ג. בשלב זה, ניתן להגדיר "משקל" ככוח הכובד הפועל על הגוף.

הדגמות וניסויים

תולים על קפיץ אנכי משקולות זהות בזו אחר זו. מודדים את התארכות הקפיץ מעבר למצבו הרפוי כתלות במספר המשקולות.

2.2 תכונות של כוחות (3 שעות)

הכוח כווקטור

יש להראות באמצעות ניסוי כי כוח הוא וקטור ושכוחות מתחברים בהתאם לכלל המקבילית.

הכוח השקול

הכוח השקול של מספר כוחות הפועלים על גוף, הוא אותו כוח שתוצאת פעולתו זהה לתוצאת פעולתם של אותם הכוחות.

הדגמות וניסויים

כוחות מתחברים לפי כלל המקבילית: להדגמה ניתן להשתמש בלוח אנכי שאליו מחוברות שתי גלגילות. קושרים לטבעת קלה שלושה חוטים שבקצותיהם משקולות, וכורכים שניים מהחוטים על גלגילות. כאשר המערכת בשיווי-משקל - מודדים את הכיוונים ואת הגדלים של הכוחות ששלושת החוטים מפעילים על הטבעת. לאחר מכן מראים כי השקול של שניים מבין הכוחות (המחושב על פי כלל המקבילית) מנוגד לכוח השלישי ושווה לו בגודלו.

החוק השלישי של ניוטון

א. מומלץ להציג את החוק השלישי של ניוטון בצורה מדורגת, בשלושה שלבים המלווים הדגמות וניסויים:

אם גוף 1 מפעיל כוח על גוף 2 אז :

(1) גם גוף 2 מפעיל כוח על גוף 1 (עצם קיום אינטראקציה).

(2) הכוחות הפוכים בכיוונים.

(3) הכוחות שווים בגודלם.

ב. יש להדגיש כי סימטריה מתקיימת בכוחות גם כאשר המצב נראה בלתי סימטרי בעליל. תלמידים מתקשים ביישום החוק השלישי של ניוטון במצבים כאלה.

ג. יש להדגיש כי כוחות "פעולה" ו"תגובה" פועלים על גופים שונים, וכי השוני בשמות אינו בא לציין שוני בטיבם של כוחות אלה, או כי אחד מהכוחות הוא ה"גורם" והשני הוא ה"תוצאה".

הדגמות וניסויים

א. דוגמאות לניסויים איכותיים: אדם דוחף קיר ונרתע, אדם קופץ מסירה לחוף, בלון פולט אוויר ונרתע בכיוון ההפוך, קצה צינור אופקי שמים פורצים מפתחו נרתע בכיוון ההפוך. שני תלמידים המושכים שני דינמומטרים, שמחוברים אחד לשני, ומנסים ללא הצלחה שהקריאה בדינמומטרים תהיה שונה.

ב. ניסויים כמותיים:

(1) מדידת כוחות הדחייה בין שני מגנטים, שכל אחד מהם מחובר לגלשן המונח על מסילת אוויר. (את הכוחות מודדים באמצעות דינמומטרים.)

(2) מדידת כוח העילוי הפועל על גוף הטבול בנוזל, ומדידת הכוח שהעצם מפעיל על המים שבהם הוא טבול. (הגוף תלוי על מאזני קפיץ, והכלי עם המים מונח על מאזני קפיץ.)
בשלב זה, מוצע להכניס לשימוש חיישן-כוח.

2.3 התמדה (3 שעות)

א. התמונה שתיבנה אצל התלמידים בסוף לימוד הדינמיקה :

החוק הראשון של ניוטון עוסק ב"גופים חופשיים", כלומר גופים שאין פועלים עליהם כוחות. לא ניתן לממש מצב זה כלשונו, אלא רק להתקרב אליו (כי תמיד יפעלו על הגוף כוחות כבידה). החוק הראשון קובע כי המהירות של גופים כאלה נשמרת. במצב אחר של התמדה, פועלים על גוף כוחות שהשקול שלהם שווה לאפס. גם במצב זה מהירות הגופים נשמרת, אולם כאן מדובר במקרה פרטי של החוק השני של ניוטון. כיוון שבשני המצבים הגופים מתמידים במצבם, ניתן לשייך את שניהם לקטגוריה אחת המכונה "מצב התמדה". שני המצבים זהים מבחינת התנועה, אולם הם יכולים להיות שונים מבחינות אחרות: אנרגיה אינה יכולה לעבור אל גוף חופשי (או ממנו), כי הוא אינו מבצע אינטראקציה; לעומת זאת היא יכולה לעבור לגוף שפועלים עליו כוחות, גם כאשר

הכוח השקול שווה לאפס, למשל: אנרגיה עוברת אל קפיץ כשהוא נמתח על-ידי כוחות שהשקול שלהם שווה לאפס.

מומלץ לדון תחילה עם התלמידים בשני מצבי ההתמדה ולדחות את ההבחנה בין שני המצבים האלה עד לאחר שיפנימו (במידה מסוימת) את עקרון ההתמדה.

ב. מומלץ להציג את רעיון ההתמדה באמצעות דיון הנסמך על סדרת ניסויים, שבהם דוחפים גוף על הרצפה פעמים מספר ולאחר מכן מרפים ממנו והוא מחליק על משטח אופקי. תנאי הדחיפה זהים בכל הפעמים, אולם בכל פעם מקטינים את החיכוך עם המשטח. (בכל פעם מחליפים את המשטח במשטח חלק יותר.) בשלב האחרון עורכים ניסוי מחשבתי שבו החיכוך אינו קיים כלל.

ג. מומלץ לדון בתופעות התמדה המוכרות מהתנסות יום-יומית, כגון תחושות של אדם הנמצא במכונית המשנה את מהירותה.

ד. יש להדגיש כי במושג **התמדה** מתכוונים למצב שבו המהירות של גוף **בווקטור** (גודל וכיוון) אינה משתנה, ויש להדגים זאת בניסויים (ראו הדגמות וניסויים להלן). נזכיר שוב כי יישום הערכת התאוצה בעזרת שינוי המהירות $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ בדרך גאומטרית, מקל על התלמידים להפנים את הכלל שכאשר $\Delta v \neq 0$, יש תאוצה **תמיד**.

ה. יש לדון במצבים שבהם ההתמדה מתרחשת רק בציר אחד (גוף הנזרק כלפי מעלה ברכבת הנעה במהירות קבועה), ולקשור מצבים אלה עם מצבם של גופים הנזרקים כלפי מעלה מן הארץ הנעה. יש להדגים התמדה בציר מסוים (ראו "הדגמות וניסויים" להלן).

הדגמות וניסויים

א. התמדה בגודל המהירות: אפשר לחקור תנועת קרונית באמצעות מד-טווח על מסלול אופקי עם חיכוך קטן (למשל קרונית הנעה על מסילת אוויר).

התמדה בכיוון המהירות: ניתן לעקוב אחר תנועתו של כדור שנע במסילה עקומה הנמצאת על שולחן אופקי, משתחרר מהמסילה ברגע מסוים ונע על שולחן במסלול ישר.

ב. התמדה בציר מסוים בלבד ניתן להדגים באמצעות "עגלת התמדה" – עגלה הנושאת "תותח" היורה כדור בזריקה אנכית מעלה בעת נסיעתה של העגלה.

סרטים

מומלץ לצפות בסרטון "חוק ההתמדה" בסדרה "היקום המכני" בהוצאת האוניברסיטה הפתוחה.

2.4 מתיחות, כוח נורמלי וכוח חיכוך (4 שעות)

במסגרת הדיון בכוחות אלה יש להדגיש :

- א. בשעה ששני גופים לחוצים זה לזה - כל גוף מפעיל כוח על הגוף האחר. את הרכיב הניצב למשטח-המגע מכנים "כוח נורמלי", ואת הרכיב המקביל למשטח-המגע מכנים "כוח חיכוך".
- ב. כאשר מציגים את כוח המתיחות, יש להתייחס לשני המושגים: "מתיחות", ו"מתיחות בחתך רוחב".
- ג. כוח מתיחות וכוח נורמלי הם כוחות מאותו 'סוג' (כוחות אלסטיים).
- ד. כהרחבה והעמקה (ולא כחובה), ניתן לבנות מודל המסביר את סיבת קיומו של כוח החיכוך הפועל בין משטחים מתכתיים: בין מתכות מתרחש מגע רק בגבשושיות של המתכות, ובין הגבשושיות שבמגע מתרחשת אדהזיה (הדבקה). בעזרת מודל כזה אפשר להסביר באופן איכותי מדוע כוח החיכוך גדל כאשר הכוח הנורמלי גדל, ומדוע כוח החיכוך אינו תלוי (בקירוב טוב) בשטח-המגע שבין הגופים.

2.5 ניתוח מצבי התמדה פשוטים (4 שעות)

יש לנתח מצביים סטטיים ומצבים דינמיים כאחד, כדי למנוע טעויות כמו, למשל, שכוח שקול השווה לאפס מזוהה כמצב של מנוחה.

2.6 החוק השני של ניוטון (4 שעות)

מומלץ להציג את החוק השני של ניוטון בארבעה שלבים :

- א. דיון בשאלה "האם גוף נע בהכרח בכיוון הכוח הפועל עליו?". לדיון כזה יש חשיבות רבה, כיוון שבתודעת התלמידים מושרשת התפיסה שלפיה "גוף חייב לנוע בכיוון הכוח".
- ב. דיון בשאלה "האם כיוון התאוצה שווה בהכרח לכיוון הכוח?" את הדיון בשאלה זו ניתן לבסס על ניתוח תרשימי-עקבות של גופים בתנועות פשוטות שבהן כיוון הכוח ידוע, כאשר על-פי תרשימים-העקבות מוצאים את כיוון התאוצה.
- ג. חקירה ניסויית של הקשר בין גודל התאוצה של גוף לבין גודל הכוח השקול הפועל עליו (ראו "הדגמות וניסויים" להלן).
- ד. הגדרת המושג "מסה התמדית" כיחס בין גודל הכוח השקול לגודל התאוצה.

הדגמות וניסויים

בחירת מערכת ניסויית להצגת החוק השני :

יש לבחור מערכת ניסויית שבאמצעותה ניתן לחקור את הקשר בין גודלי הכוח לתאוצה וגם בין כיווני הכוח לתאוצה. רצוי מאוד שהמערכת תכלול גוף יחיד ולא שני גופים שכיווני תנועתם שונים. מערכות שאינן מוצלחות לחקירת החוק השני של ניוטון הן מכונת אטווד (שני גופים הקשורים זה לזה באמצעות חוט הכרוך סביב גלגלת) ומערכת המורכבת מקרונית הנמצאת על משטח אופקי

וקשורה באמצעות חוט הכרוך סביב גלגלת למשקולת תלויה. ניסויים אלה בעייתיים מבחינת כיווני התאוצה והכוח השקול, אך כדאי לערוך אותם אחרי שמכירים את החוק השני של ניוטון. המלצות לניסויים המיועדים לחקירת החוק השני של ניוטון:

ניסויים בממד אחד:

- א. הרצת קרונית, המונעת באמצעות מדחף, על מסילה.
- ב. הרצת קרונית באמצעות קפיץ בעל קבוע-כוח ידוע, ומדידת מקומה של הקרונית בפרקי זמן שווים על-ידי מד-טווח המחובר למחשב.
- ג. הרצת קרונית ומדידה, במרווחי זמן שווים, של מקום הקרונית ושל הכוח השקול הפועל עליה (באמצעות חיישן-כוח).

ניסויים בשני ממדים:

- מדידת הכוח השקול והתאוצה של קרונית המסתובבת על מסלול הרצה. לגבי כל מדידה, ניתן לקבוע את הכוח השקול (באמצעות קפיץ) ואת תאוצת הקרונית על פי תרשים תנועה שלה.
- ניסוי שבו התנועה מתנהלת בממד אחד יבוצע על-ידי התלמידים. רצוי לבצע גם ניסוי בשני ממדים, לפחות כהדגמה.

2.7 כוח הכובד, והמסה כמדד לעצמתו (2 שעות)

- א. "המסה הכובדית" של גוף תוצג כמדד לכוח הכבידה שבו הגוף נמשך אל כדור הארץ. (בשלב מאוחר ניתן להכליל את המושג למשיכה לגוף כלשהו.)
- ב. את הקשר בין "מסה אינרציאלית" לבין "מסה כובדית" ניתן להציג כך: אם מסתו (האינרציאלית) של גוף א' גדולה פי k ממסתו (האינרציאלית) של גוף ב' (זאת ניתן לקבוע בעזרת ניסוי הנסמך על החוק השני של ניוטון), אזי כוח הכובד הפועל על גוף א' גדול גם הוא פי k מכוח הכובד הפועל על גוף ב' (זאת ניתן לקבוע בעזרת מאזני קפיץ). כלומר, יש יחס ישר בין מסתו האינרציאלית של גוף לבין מסתו הכובדית.
- ג. מומלץ להשתמש במונח "מסה" ולהתייחס למסה כמדד לשתי תכונות (התמדה וכבידה), ולא להשתמש במונחים "מסה אינרציאלית" ו"מסה כובדית", שעלולים להרתיע תלמידים.
- ד. יש להציג את מאזני הכפות כמכשיר המודד מסה אף על פי שנעשית בו השוואה בין כוחות.
- ה. יש לדון בקצרה במושג "צפיפות" ולהסביר מהו משקל סגולי.

2.8 יישום החוק השני של ניוטון לגבי תנועה לאורך קו ישר (9 שעות)

- א. דוגמאות ליישום החוק השני של ניוטון אפשר להציג בדרגת קושי עולה:

(1) גוף יחיד. למשל: תנועת גוף על משטח אופקי ללא חיכוך ועל משטח אופקי עם חיכוך; תנועת גוף על משטח משופע (עם חיכוך וללא חיכוך); תנועת מעלית; הוראת מאזניים הנמצאים בתוך מעלית מואצת. בחלק מהדוגמאות כדאי לעמוד על הסיבות לתנועת הגוף בקו ישר ($\vec{v}_0 = 0$ או $\vec{v}_0 \parallel \vec{F}$), כדי לא להשריש תפישה מוטעית שלפיה תנועה בהשפעת כוח קבוע חייבת להתנהל לאורך קו ישר.

(2) מערכות בנות שני גופים הנעים בתאוצות השוות בגודלן. למשל: שני גופים הקשורים בחוט נמשכים על-ידי כוח קבוע על שולחן; קרונית קשורה בחוט למשקולת והחוט כרוך על גלגלת. בדוגמאות אלו חשוב להסביר שהשוויון בין גודלי התאוצות נובע מהגאומטריה ולא מהדינמיקה.

(3) מערכות בנות שני גופים הנעים בתאוצות שונות בגודלן. (ניתן להסתפק בשתי דוגמאות).
א. יש לדון בהנעת גופים: החוק השני של ניוטון שולל את האפשרות שגוף יניע את עצמו על-ידי הפעלת כוחות על עצמו. תנועת גופים מתאפשרת כאשר הם מפעילים כוחות על גופים אחרים, ועל פי החוק השלישי של ניוטון, הגופים האחרים מפעילים עליהם כוחות המאפשרים להם לנוע. יש לדון בדוגמאות אלה: הליכה, נסיעת רכב, טיסת רקטה.
ב. יש להציג שיטות נומריות לפתרון משוואות תנועה, לפחות כאלה שבהן הכוח תלוי במקום. השיטות המומלצות הן "הקירוב הסטנדרטי של אוילר" ו"קירוב טיילור סדר שני". בשלב זה יפתרו התלמידים לפחות דוגמה אחת.
ד. יש להציג את המונחים "דטרמיניזם" ו"יכולת ניבוי".

הדגמות וניסויים

א. מומלץ לבצע ניסויים למציאת מקדם החיכוך באחד מהמקרים הבאים: האטת עגלה לאחר דחיפתה במישור אופקי; האטת עגלה המחוברת למשקולת לאחר דחיפתה בכיוון הפוך לכיוון כוח המשקולת; הדרכת עגלה במעלה מישור משופע ומדידת התאוצה בעלייתה ובירידתה. הגדלים שיימדדו בניסויים אלו ישמשו בעתיד לניתוח עבודת כוח החיכוך בניסויים שבהם תיבחן שימור האנרגיה.
ב. כאן המקום לבצע את הניסוי המכונה "החוק השני של ניוטון" (בעזרת עגלה הנמשכת על-ידי משקולת המחוברת אליה בחוט וגלגלת).

2.9 תנועה במישור בהשפעת כוח קבוע (4 שעות)

א. דוגמה לכוח קבוע הוא כוח הכובד, לכן עיקר הדיון יהיה בהקשר זה.

- ב. כדי להקל על התלמידים, מומלץ לדון תחילה בזריקה אופקית, ורק לאחר מכן להכליל את הדיון לזריקה בזווית כלשהי.
- ג. לאחר הדיון בתנועה בהשפעת כוח הכובד, יש להכליל זאת לתנועה בהשפעת כוח קבוע כלשהו עם דגש על תנאי התחלה. יש להראות שהמסלול נקבע הן על-ידי תנאי התחלה והן על-ידי הכוח. זו הסיבה שמומלץ לדון בנושא זה במסגרת הדינמיקה ולא במסגרת הקינמטיקה.
- ד. כיוון שתנועה בהשפעת כוח הכובד (הקבוע) היא קלה יחסית, ניתן לדון בכיתה בניתוח תרשים התנועה (תחילת הפרק) ובהכללה לתנועה בשדה-כוח קבוע כלשהו (סוף הפרק). את שאר נושאי הפרק ילמדו התלמידים באופן עצמאי.

2.10 תנועה מעגלית (6 שעות)

- א. גם נושא זה כדאי להציג מהקל אל הכבד: לעסוק תחילה בתנועה מעגלית קצובה, ולאחר מכן בתנועה מעגלית שבה המהירות משתנה לא רק בכיוונה, אלא גם בגודלה.
- ב. מומלץ לא להשתמש במונח "כוח צנטריפטלי", כיוון שתלמידים נוטים להוסיף כוח צנטריפטלי לכוחות הפועלים על הגוף. מצד שני, המונח מוכר, לכן די להסתפק באמירה "יש המכנים את סכום הרכיבים הרדיאליים של הכוחות בשם: כוח צנטריפטלי".
- ג. את קבלת הביטוי לגודל התאוצה הצנטריפטלית רצוי לעשות בשלבים:
- (1) לדון בשאלה "האם גוף הנע בתנועה מעגלית מואץ?".
 - (2) לדון בשאלה "אילו גורמים עשויים להשפיע על גודל התאוצה הצנטריפטלית?".
 - (3) לבחון את תלות התאוצה בגודל מהירות הגוף כאשר רדיוס המסלול הוא קבוע.
 - (4) לבחון את תלות התאוצה ברדיוס המסלול כאשר גודל מהירות הגוף הוא קבוע.

2.11 מערכות ייחוס (5 שעות)

- א. יש להראות כי החוק הראשון של ניוטון אינו תקף בכל מערכות הייחוס ולנסח אותו באופן הבא: קיימת מערכת ייחוס אשר ביחס אליה מהירותו של כל גוף חופשי אינה משתנה. מערכת זו מכונה "מערכת ייחוס אינרציאלית".
- ב. יש להראות כי אם קיימת מערכת אינרציאלית אחת, אזי קיימות אין-סוף מערכות ייחוס אינרציאליות.
- ג. יש להראות כי תאוצתו של גוף הנע לאורך קו ישר, שווה בכל מערכות הייחוס האינרציאליות, וכי החוק השני והשלישי נכונים בכל מערכות הייחוס האינרציאליות.
- ד. יש לדון בשאלה "האם הארץ היא מערכת ייחוס אינרציאלית?". בהקשר זה יש להסביר באופן איכותי את מטוטלת פוקו.

- ה. יש להציג את "עקרון היחסות" של גלילאו.
- ו. יש להציג את "טרנספורמציית גלילאו לתאוצה" עבור תנועה לאורך קו ישר.
- ז. יש להציג את עקרון השקילות (עקרון האקוויולנציה). מומלץ להראות כיצד ניתן להשתמש בו להגדרת המושגים: "משקל", "כיוון מטה".

פרק 3 : התנע ושימורו

שעות	הנושא
4	3.1 מתקף, תנע והקשר ביניהם
3	3.2 חוק שימור התנע
6	3.3 יישומים של חוק שימור התנע
13	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4	- ניסוי: הקשר בין המתקף הכולל הפועל על גוף, לשינוי התנע של הגוף (באמצעות חיישן-כוח ושער-אור).	$\vec{J} = \vec{F}\Delta t$ $\vec{J}_{\text{כולל}} = \sum \vec{F}dt$ $\vec{p} = m\vec{v}$ $\vec{J} = \Delta\vec{p}$ $\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$	<ul style="list-style-type: none"> - המושג "מתקף" של כוח קבוע וייצוגו באמצעות ביטוי מתמטי. - מתקף של כוח משתנה בגודלו, וייצוגו באמצעות ה"שטח" הנתחם ע"י עקומת כוח-זמן וציר הזמן. - המתקף הכולל הפועל על גוף. - המושג "תנע" וייצוגו באמצעות ביטוי מתמטי. - המתקף הכולל הפועל על גוף כשינוי התנע של הגוף. - הכוח כקצב שינוי התנע. 	3.1 מתקף, תנע והקשר ביניהם
3	- ניסויים: בחינת שימור תנע כאשר המהירויות נמדדות באופן ישיר (מד-טווח או צילום וידאו); בממד אחד ובשני ממדים.	$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2$ $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots$ $\vec{P} = \text{Const.}$	<ul style="list-style-type: none"> - המושג "מערכת סגורה". - שימור תנע במערכת דו-גופית סגורה. - חוק שימור התנע. 	3.2 חוק שימור התנע
6	- ניסויים: שימור תנע בתופעות התנגשות, רתע, ובמהלך אינטראקציה.		<ul style="list-style-type: none"> - התנגשויות. - רתע. - שימור תנע במהלך אינטראקציה. - הנעה רקטית (איכותי). 	3.3 יישומים של חוק שימור התנע

התנע ושימורו: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

3.1 מתקף, תנע והקשר ביניהם (4 שעות)

א. הצעה לסדר הוראת הנושא והערות כלליות:

- (1) הגדרת מתקף של כוח קבוע (מוטיבציה להגדרה יכולה לשמש השאלה "מה משמעותו של גודל פיזיקלי המביא בחשבון את הכוח הפועל על גוף וגם את משך פעולתו?").
- (2) הצגת המתקף של כוח משתנה בגודלו כ'שטח' הנתחם בין עקומת כוח-זמן לבין ציר הזמן. יש להציג את הדרכים הבאות לחישוב ה'שטח':

- פריסה של קווים אופקיים ואנכיים וחישוב ה'שטח' על פי מספר המשבצות ועל פי 'שטח' של משבצת אחת. בדרך כלל לא ניתן לקבוע במדויק את מספר המשבצות, לכן נדרש להעריך את גודלו. ככל מדידה, גם תוצאת מדידה זו אינה מוחלטת.
- באמצעות נוסחה ידועה, כאשר מדובר בצורה גאומטרית פשוטה כגון משולש וטרפז.
- באמצעות אינטגרל. חישוב כזה ייעשה רק בשלב שבו התלמידים בשלים לכך מבחינת הרקע שלהם במתמטיקה. אין צורך להרבות בחישוב מתקפים באמצעות אינטגרל.
- חישוב אינטגרל בעזרת מחשב. ניתן לחשב אינטגרל של עקומת כוח-זמן במרבית התוכנות המשמשות למעבדה ממוחשבת. יתרון של תוכנות אלה הוא משמעותי כאשר משווים, בעזרת חיישני התוכנה, בין המתקף המתקבל לבין השינוי בתנע.

(3) הגדרת המושג "מתקף כולל".

- (4) פיתוח הקשר בין מתקף כולל הפועל על גוף, לבין שינוי התנע של הגוף. יש להוכיח את הקשר עבור כוח קבוע.

יש לציין בהוראה כי הקשר מתקיים גם עבור כוח משתנה, ורצוי להוכיח זאת. בכיתה שבה התלמידים אינם בקיאים בחישוב אינטגרלים, ניתן לבסס את ההוכחה על חלוקת מרווח-הזמן הכולל למרווחי זמן קצרים, שבהם התאוצה קבועה בקירוב.

רצוי לציין בפני התלמידים כי ניתן לקבוע את המתקף של כוח המשתנה גם בגודלו וגם בכיוונו - תחילה על-ידי חישוב המתקפים של רכיבים קרטזיים של הכוח, ואחר כך על-ידי חישוב המתקף שהכוח מפעיל. אין צורך בחישוב מתקפים של כוחות המשתנים בגודלם ובכיוונם.

- (5) הצגת החוק השני של ניוטון במונחים של תנע. (הכוח השקול שווה לקצב שינוי התנע).

ב. יש להדגיש את האופי הווקטורי של המתקף ושל התנע.

תרגיל לדוגמה :

חשבו את השינוי בתנע של כדור שמסתו 1 kg הפוגע בקיר הניצב אליו במהירות שגודלה 1 m/s, ומוחזר מהקיר במהירות שגודלה 1 m/s.

$$\vec{J} = m\vec{v}_f - m\vec{v}_i$$

ג. הערות לגבי יישום הנוסחה כולל :

(1) יש ליישם את הנוסחה בתרחישים חד-ממדיים ודו-ממדיים, בדרך אלגברית ובדרך גאומטרית.

(2) יש לעסוק גם בתרגילים איכותיים.

תרגילים לדוגמה :

• נער קופץ לגובה ונוחת על משטח. מדוע מניחים מזרן על המשטח? השתמשו בתשובתכם במונחים "מתקף" ו"תנע".

• נער קופץ משולחן לרצפה. מדוע מכופף הנער את ברכיו בעת נחיתה על הרצפה? השתמשו בתשובתכם במונחים "מתקף" ו"תנע".

(3) יש לעסוק גם בתרגילים שבהם התלמידים מתבקשים לתאר תופעות פשוטות במונחים של מתקף ותנע.

תרגיל לדוגמה :

אדם זורק כדור אל קיר; הכדור חוזר מן הקיר אל ידיו. מהם המתקפים הפועלים על הכדור בשלבי תנועתו השונים? איזה מהם הוא, לדעתכם, הגדול ביותר? הסבירו.

ד. רצוי לבחון את הנוסחה $\vec{J} = m\vec{v}_f - m\vec{v}_i$ באופן ניסיוני. לשם כך אפשר לחקור התנגשות של קרונית עם חישן-כוח. חקר ניסוי זה במעבדה ממוחשבת מאפשר ביצוע אינטגרל בעזרת מחשב לקבלת תוצאות מדויקות ולהמחשה טובה של המתקף המתקבל על-ידי כוח משתנה בזמן.

3.2 חוק שימור התנע (3 שעות)

א. הצעה לסדר הוראת הנושא והערות כלליות :

(1) הצגת המושג "מערכת סגורה".

(2) הצגת שימור התנע במערכת דו-גופית סגורה. מומלץ להוכיח את שימור התנע בשתי דרכים :

אלגברית וגאומטרית. במהלך ההוכחה, חשוב להראות היכן נעשה שימוש ב"סגירות" המערכת. חשוב שתלמידים יוכלו להוכיח את השימור באופן מילולי, במילים שלהם.

(3) הכללת שימור התנע למערכת רב-גופית סגורה.

(4) דיון בתוקף של חוק שימור התנע.

חשוב להדגיש כי חוק שימור התנע תקף לא רק בהתנגשויות ובהתפוצצויות, אלא גם במצבים אחרים, כמו גופים הנמצאים באינטראקציה ללא מגע פיזי ובתחומים שבהם חוקי ניוטון אינם תקפים (למשל בהתפרקות רדיואקטיבית).

ב. יש לקשור בין סעיפים 3.1 ו-3.2 : בסעיף 3.1 מדובר בשינוי תנע של גוף כתוצאה ממתקף חיצוני. במסגרת הדיון הנערך בסעיף 3.2, מתברר כי השינוי בתנע של גוף אחד מתקזז על-ידי שינוי מקביל בתנע המתרחש באותו הזמן בגוף האחר.

3.3 יישום חוק שימור התנע (6 שעות)

א. יש ליישם את חוק שימור התנע לגבי :

(1) התנגשויות עם מגע פיזי וללא מגע פיזי - למשל אינטראקציה מגנטית (שני גלשנים על מסילת אוויר הנידחים זה מזה בעזרת מגנטים המחוברים בקצותיהם).

(2) תופעות רתע.

(3) תרחישים שבהם נשמר רק רכיב אחד של תנע - למשל פגיעת גוף בקרונית נעה, כאשר כיוון התנועה של הגוף אינו על ציר התנועה של הקרונית.

(4) תרחישים שבהם פועל מתקף חיצוני, שגודלו ניתן להזנחה ביחס למתקפים שגופי המערכת מפעילים זה על זה - למשל התפוצצות פגז. במהלך ההתפוצצות, כוח הכובד מפעיל מתקף חיצוני על רסיסי הפגז, אולם מתקף זה עשוי להיות זניח ביחס למתקפים שרסיסי הפגז מפעילים זה על זה.

ב. את הנושא "הנעה רקטית" מותר להציג באופן איכותי, ללא פיתוח נוסחאות. בהקשר לכך, יש להדגיש כי לאוויר האטמוספירה אין כל תפקיד בהאצת רקטה. (תלמידים נוטים להסביר את האצת הרקטה בכך שהגז הנפלט מן הרקטה דוחף את האוויר שמחוץ לרקטה.)

ג. בכל פעם שהתלמידים משתמשים בשימור התנע, יש להרגילם לנמק מדוע התנע נשמר.

ד. יש לעסוק גם בתרגילים איכותיים.

ה. יישום חוק שימור התנע ייעשה בדרך אלגברית ובדרך גאומטרית.

ו. כדאי לכלול תרגילים שבהם התלמידים מתבקשים לנתח תרחישים בעזרת חוקי ניוטון ובעזרת שימור התנע.

תרגיל לדוגמה :

קרונית שמסתה 20 kg נעה על משטח אופקי חסר חיכוך במהירות שגודלה 4m/s. גוש פלסטלינה שמסתו 2 kg פוגע בקרונית במהירות שגודלה 10 m/s ושכיוונה יוצר זווית בת 60° מתחת לכיוון האופקי. הפלסטלינה נדבקת לקרונית.

- (1) האם מהירות הקרונית תגדל, תקטן או לא תשתנה בעקבות ההתנגשות? נמקו תשובתכם בעזרת חוקי ניוטון בלבד.
- (2) חשבו באמצעות שיקולי תנע את מהירות הקרונית לאחר ההתנגשות והשוו את תשובתכם לסעיף הקודם.

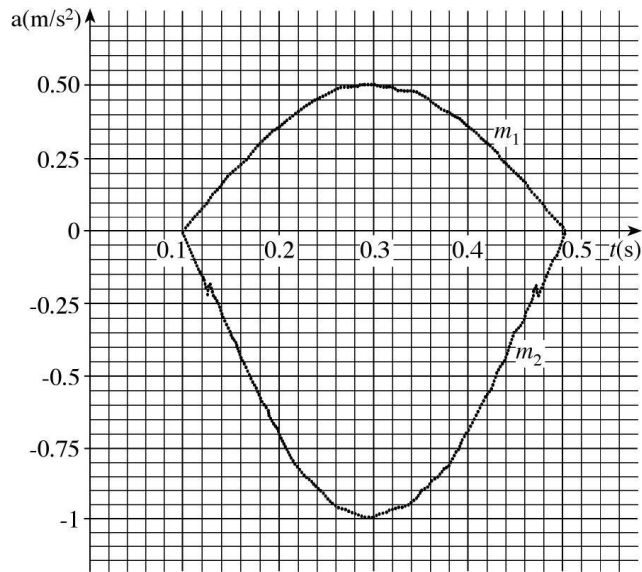
הדגמות וניסויים

רצוי שהניסויים הבסיסיים לבחינת חוק שימור התנע יהיו פשוטים ו"שקופים".
דוגמאות לניסויים:

- א. שימור תנע של שני גלשנים על מסילת אוויר בתרחישים של התנגשות ושל "התפוצצות" (תרחישים חד-ממדיים).
- ב. שימור תנע בהתנגשות על שולחן אוויר (התנגשות דו-ממדית).
כלי המדידה בשני הניסויים המתוארים לעיל הם מד-טווח (למדידת מהירות) או מצלמת וידאו ומאזניים (למדידת מסה).

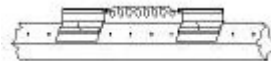
לאחר ביצוע ניסויים בסיסיים ולאחר הפנמה מסוימת של העקרונות, ניתן לבצע ניסויים מורכבים:

- ג. משחררים כדור מראש מסילה הנמצאת בקצה שולחן. בתחתית המסילה הכדור מתנגש בכדור שני, ושני הכדורים נזרקים ופוגעים ברצפה. בעזרת נקודות הפגיעה אפשר להראות שימור תנע בשני ממדים.
- ד. שימור תנע במהלך התנגשות: יוצרים התנגשות על מסילת אוויר בין שני גלשנים, שלאחד מהם מחובר 'מזלג' עם גומייה. באמצעות חיישן מתאים המחובר למחשב, ניתן לדגום את ערכי התאוצה במהלך ההתנגשות. בתרשים 1 מתוארות שתי עקומות שהתקבלו בדרך זו. מן העקומות ניתן לחשב את יחס המסות ואת יחס השינויים במהירות של כל קרונית (באמצעות מדידת שטחים ש'מתחתי' לעקומות), וניתן להראות כי התנע נשמר במהלך ההתנגשות.



תרשים 1

ה. שני גלשנים המונחים על מסילת אוויר וקשורים זה לזה באמצעות קפיץ, כבתרשים 2: מתחילים את הניסוי כאשר שני הגלשנים במנוחה והקפיץ מתוח (או מכווץ). משחררים את הגלשנים, והם מתחילים לנוע הלוך ושוב. עוקבים אחר הגלשנים באמצעות מד-טווח המחובר למחשב ומראים כי התנע הכולל שווה לאפס בכל רגע ורגע.



תרשים 2

פרק 4 : אנרגיה מכנית ושימורה

שעות	הנושא
5	4.1 אנרגיה קינטית, עבודה והקשר ביניהן
4	4.2 אנרגיה פוטנציאלית
3	4.3 שימור אנרגיה מכנית
4	4.4 תנועה במעגל אנכי
4	4.5 היבטים אנרגטיים בהתנגשות
2	4.6 הספק ונצילות
22	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
5	- ניסויים : נפילה חופשית או מישור משופע - חישוב עבודת כוח הכובד ותוספת האנרגיה הקינטית.	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$ $W = \vec{F} \cdot \Delta\vec{x}$ $W = \int_{x_1}^{x_2} \vec{F}_x \cdot dx$ $W_{\text{כוללת}} = \Delta E_k$	<p>- המושג "אנרגיה קינטית".</p> <p>- עבודה הנעשית על גוף נקודתי:</p> <p>(1) כאשר המסלול הוא קו ישר והכוח קבוע - ייצוג העבודה באמצעות נוסחה.</p> <p>(2) כאשר המסלול הוא קו ישר והכוח משתנה - ייצוג העבודה כ"שטח" המתאים.</p> <p>(3) כאשר המסלול הוא קו עקום והכוח משתנה - ייצוג רעיון החישוב באמצעות חלוקה להעתקים קטנים. תחושב במפורט עבודת הכוח השקול בתנועה מעגלית קצובה.</p> <p>- "משפט עבודה-אנרגיה" - הוכחה עבור מקרים (1) ו-(2) לעיל והרחבה (ללא הוכחה) למקרה (3).</p>	4.1 אנרגיה קינטית, עבודה והקשר ביניהן
4	- ניסויים : מסה המתנדנדת על קפיץ - חישוב אנרגיה פוטנציאלית אלסטית ואנרגיה קינטית.	$U_G = mgy$ $U_{sp} = \frac{1}{2}kx^2$	<p>- כוחות משמרים וכוחות שאינם משמרים.</p> <p>- אנרגיה פוטנציאלית כובדית.</p> <p>- אנרגיה פוטנציאלית אלסטית.</p>	4.2 אנרגיה פוטנציאלית
3	- ניסויים : חישוב עבודת כוח החיכוך על מסה הקשורה בקפיץ ומואצת אופקית.	$W_{A \rightarrow B} = E_B - E_A$ $E_A = E_B$	<p>- אנרגיה מכנית כוללת.</p> <p>- שימור האנרגיה המכנית.</p>	4.3 שימור אנרגיה מכנית
4	- ניתוח תנועה מעגלית באמצעות סרטון וידאו או הדמיית מחשב.		<p>- שיקולי כוחות ואנרגיה.</p> <p>- הינתקות מן המסלול המעגלי.</p>	4.4 תנועה במעגל אנכי

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4	ניסויים : - אי-שימור אנרגיה בהתנגשות פלסטית. - שימור אנרגיה בהתנגשות אלסטית.	$\vec{v}_1 - \vec{v}_2 = -(\vec{u}_1 - \vec{u}_2)$	- המרות אנרגיה בהתנגשות פלסטית; אנרגיה פנימית. - התנגשות אלסטית; המהירות היחסית בהתנגשות אלסטית.	4.5 היבטים אנרגטיים בהתנגשות
2		$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$	- המושגים "הספק" ו"נצילות".	4.6 הספק ונצילות

אנרגיה ושימורה: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

4.1 אנרגיה קינטית, עבודה והקשר ביניהן (5 שעות)

א. מוצע להציג את המושג "עבודה" ואת "משוואת עבודה-אנרגיה" בשלושה שלבים:

שלב ראשון: דיון במצבים שבהם כוחות קבועים פועלים על גוף נקודתי ושתנועתו מתרחשת לאורך קו ישר. במסגרת דיון זה יוגדרו המושגים: "עבודה", "אנרגיה קינטית" ו"משפט עבודה-אנרגיה".

לגבי המושג "עבודה":

1. עבודה תוצג על-ידי שני ביטויים מתמטיים (שקולים): ביטוי אחד הוא $F_x \cdot \Delta x$ (כל אחד מן

הגדלים F_x ו- Δx יכול להיות חיובי או שלילי - בהתאם לכיוון הציר). הביטוי האחר הוא

$$|\mathbf{F}| \cos \theta \cdot \Delta s \quad (\Delta s \text{ חיוביים}).$$
 הביטוי השני מדגיש את הסקלריות של העבודה.

2. מומלץ להציג את העבודה גם על-ידי מכפלה סקלרית: $W = \vec{F} \cdot \Delta \vec{x}$.

3. יש להדגיש כי ההעתק המופיע בהגדרת העבודה הוא של נקודת האחיזה של הכוח. ה- Δx

המופיע בפיתוח "נוסחת עבודה-אנרגיה", מייצג את העתק (מרכז המסה של) הגוף. אולם כיוון

שהנוסחה מפותחת עבור גופים נקודתיים - שני ההעתקים שווים. לגבי גוף שאינו נקודתי -

ההעתקים יכולים להיות שונים זה מזה, ואז עלולות להתעורר בעיות מושגיות. דוגמה: כאשר

מכונית מואצת על-ידי כוח חיכוך סטטי (ומזניחים את התנגדות האוויר), מכפלת כוח החיכוך

בהעתק המכונית שווה לשינוי באנרגיה הקינטית של (מרכז המסה של) המכונית. אולם,

מכפלה זו אינה שווה לעבודה הנעשית על המכונית - העבודה הנעשית עליה על-ידי הכביש

שווה לאפס.

4. חשוב לומר כי המשמעות היום-יומית של המונח עבודה (תיאור פעילות המצריכה מאמץ גופני

או שכלי) אינה זהה למשמעות של המונח בפיזיקה (כינוי לביטוי $F_x \cdot \Delta x$ המייצג כמות אנרגיה

מומרת).

5. יחידת העבודה תכונה ג'ול - J.

לגבי המושג "אנרגיה קינטית":

1. נוסף לביטוי ה'רגיל', $\left(E_k = \frac{mv^2}{2} \right)$, רצוי לפתח גם את הביטוי $\left(E_k = \frac{p^2}{2m} \right)$ המשמש בלימוד

הנושא "קרינה וחומר".

2. יש לציין שאנרגיה קינטית היא גודל סקלרי וכי היא תלויה במערכת הייחוס.

שלב שני: דיון במצבים שבהם כוחות המשתנים בגודלם פועלים על גוף נקודתי הנע לאורך קו ישר. 1. את העבודה הנעשית על-ידי כוח משתנה בגודלו יש להציג כישטח' הנתחם בין עקומת כוח-מקום לבין ציר המקום.

הערה: הסימן של העבודה נקבע גם על פי סימן הכוח וגם על פי סימן ההעתק. כאשר מחשבים עבודה על-פי הישטח' שמתחת לגרף, חשוב לשים לב שלא ניתן ללמוד מן הגרף בלבד מהו סימן ההעתק. ייתכן שגרף הכוח נמצא ברביע הרביעי, אולם הישטח' (ולכן גם העבודה) הוא חיובי. יש להציג דרכים שונות לחישוב הישטח'. (בפרק 3 סעיף 3.1, מפורטות הדרכים לחישוב ישטח' שמתחת לגרף בהקשר לגרף מתקף-זמן.)

2. יש להראות כי "משפט עבודה-אנרגיה" תקף גם למצבים שבהם הכוח משתנה בגודלו. ניתן לעשות זאת על-ידי חלוקת מרווח-הזמן הכולל של התנועה למרווחי-זמן קצרים, שבהם התאוצה בקירוב קבועה, וליישם את "משפט עבודה-אנרגיה" לגבי כל אחד מקטעים אלה. כאשר מחברים את כל המשוואות, מתקבל "משפט עבודה-אנרגיה" לגבי מרווח הזמן הכולל.

שלב שלישי: דיון קצר במצבים שבהם כוחות משתנים פועלים על גוף נקודתי הנע על מסלול עקום. כאן ניתן להסתפק בתיאור שיטת החישוב (חלוקת המסלול לקטעים קטנים, שבהם הכוח קבוע בקירוב וקטע המסלול הוא ישר בקירוב), ולהסתפק בדוגמה איכותית של תנועה מעגלית, שבה הכוח השקול יוצר בכל נקודה: א. זווית ישרה עם ההעתק; ב. זווית חדה עם ההעתק; ג. זווית קהה עם ההעתק.

ב. מומלץ שהתרגול יכלול שאלות שבהן התלמידים יתארו תופעות פשוטות במונחים של עבודה ואנרגיה קינטית.

4.2 אנרגיה פוטנציאלית (4 שעות)

- א. יש לקשור בין "אנרגיה פוטנציאלית" ל"כוחות משמרים".
- ב. יש להדגיש כי אנרגיה פוטנציאלית מוגדרת עד כדי קבוע, וכי רק הפרשים באנרגיה הפוטנציאלית מוגדרים חד-ערכית. את רמת האפס של האנרגיה הפוטנציאלית בוחרים בדרך כלל באופן שהביטוי המתמטי שלה יהיה הפשוט ביותר.
- ג. יש לשים לב שתלמידים נוטים לזהות את המושג הכללי "אנרגיה פוטנציאלית" עם הביטוי mgh המתאים למקרה פרטי.

4.3 שימור אנרגיה מכנית (3 שעות)

- א. המונח "אנרגיה מכנית" משמעו סכום האנרגיה הקינטית וכל סוגי האנרגיות הפוטנציאליות (כולל אנרגיה פוטנציאלית חשמלית שתוצג בנושא "אלקטרומגנטיות").
- ב. יש להדגיש כי כלל שימור האנרגיה המכנית אינו חוק טבע חדש, אלא נובע מחוקי ניוטון.
- ג. בהקשר זה יש להדגיש את ההבדל שבין שימור אנרגיה (המתקיים תמיד) לבין שימור אנרגיה מכנית (המתקיים רק כאשר לא פועלים כוחות לא משמרים).
- ד. הדגמות וניסויים, ראו להלן בסעיף 4.5.

4.4 תנועה במעגל אנכי (4 שעות)

- א. נושא זה ישמש דוגמה עשירה ליישום עקרון שימור האנרגיה המכנית וחוקי הדינמיקה. דוגמה לתרגיל:
מדוע מהירות גוף הנע במעגל אנכי קטנה בעלייה וגדלה בירידה? הסבירו באמצעות -
 - (1) שיקולים אנרגטיים.
 - (2) שיקולים דינמיים.
- ב. יש לבחון גם את מחזוריות התנועה.
- ג. לגבי הינתקות מהמעגל:
 - (1) רצוי להדגים הינתקות ממעגל בעזרת הדמיית מחשב, סרטונים או מסילה.
 - (2) חשוב לעמוד על כך שהגוף עלול לא להגיע לנקודה הגבוהה ביותר של המסלול המעגלי, גם אם הדבר מתאפשר מבחינה אנרגטית. גם אם תהליך מסוים מקיים את עקרון שימור האנרגיה, אין זה הכרחי שהוא אכן יתרחש.
 - (3) במצבים שבהם הגוף נע במסילה אנכית או קשור בחוט (ולא במצבים שבהם הוא קשור במוט), חשוב להדגיש כי הינתקות מאופיינת בכך שהכוח הנורמלי (או המתוחות) מתאפס ברגע ההינתקות.

4.5 היבטים אנרגטיים בהתנגשות (4 שעות)

מונחים שישמשו בהקשר זה :

- התנגשות שבה האנרגיה הקינטית הכוללת נשמרת, מכונה "התנגשות אלסטית".
- התנגשות שבה האנרגיה הקינטית הכוללת אינה נשמרת, תכונה "התנגשות אי-אלסטית" (התנגשות פלסטית היא מקרה מיוחד של התנגשות אי-אלסטית).
- אנרגיה קינטית ה'אובדת' בהתנגשות, הופכת ל"אנרגיה פנימית" של הגופים המתנגשים (ולא לחום).

הדגמות וניסויים

- א. שימור האנרגיה: יש לבצע מספר ניסויים והדגמות לחוק שימור האנרגיה. בכל ניסוי כזה יש לאפשר מדידה של האנרגיה, שהופכת לאנרגיה פנימית בעיקר על-ידי מדידת עבודת כוח החיכוך.
- ב. עבודת כוח החיכוך: כדי לחשב את עבודת כוח החיכוך, מומלץ לבצע ניסויים למציאת מקדם החיכוך של מערכות הניסוי השונות (כפי שהוסבר בפרק העוסק בדינמיקה).
- ג. תנע ואנרגיה: מומלץ לנתח שוב את הניסויים שבוצעו במסגרת לימודי התנע, הפעם מהיבטים של שימור אנרגיה. יש להסביר מה מאפיין ניסויים שבהם נשמרת האנרגיה אך לא נשמר התנע, ומה מאפיין ניסויים שבהם לא נשמרת האנרגיה אך התנע נשמר.

4.6 הספק ונצילות (2 שעות)

- א. נוסף ליחידה התקנית "ואט", כדאי להסביר את היחידה "כוח-סוס".
- ב. במסגרת זו כדאי לקשור יחידות אלו למושגי ה"הספק" ו"האנרגיה" המוכרים לתלמידים ממכשירים חשמליים המשמשים בחיי היום-יום ושיילמדו במסגרת הוראת הנושא "אלקטרומגנטיות". בהקשר זה מומלץ להסביר מדוע היחידה "קילוואט-שעה" היא יחידת אנרגיה.

פרק 5 : מודל הגז האידאלי

שעות	הנושא
2	5.1 תכונות מקרוסקופיות של גזים
3	5.2 הסבר התנהגות גז אידאלי באמצעות המודל הקינטי
1	5.3 החוק הראשון והחוק השני של התרמודינמיקה
6	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2		$p = \frac{F}{A}$ $\frac{pV}{T+273.16} = \text{Const.}$ $\frac{pV}{T} = \text{Const.}$	<ul style="list-style-type: none"> - המושגים "לחץ" ו"טמפרטורה". - תיאור התנהגות גז תחת שינויי נפח, לחץ וטמפרטורה. - המושג "האפס המוחלט". - המושגים "גז אידאלי" ו"גז ראלי". 	5.1 תכונות מקרוסקופיות של גזים
3	- הדמיות מחשב של המודל הקינטי.	$\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT$ $pV = NkT$	<ul style="list-style-type: none"> - הנחות המודל הקינטי. - פיתוח ביטוי מתמטי ללחץ שמפעיל גז אידאלי <li style="text-align: center;">$\left(p = \frac{1}{3} \frac{Nm\bar{v}^2}{V} \right)$ - טמפרטורה של גז כמדד לאנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולות הגז. - הקבוע של בולצמן. - משוואת המצב של הגז האידאלי. 	5.2 הסבר התנהגות גז אידאלי באמצעות המודל הקינטי
1		$\Delta E = Q + W$	<ul style="list-style-type: none"> - המושגים "אנרגיה תרמית", "אנרגיה פנימית" ו"חום". - החוק הראשון של התרמודינמיקה. - החוק השני של התרמודינמיקה. 	5.3 החוק הראשון והחוק השני של התרמודינמיקה

מודל הגז האידיאלי: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

5.1 תכונות מקרוסקופיות של גזים (2 שעות)

א. מומלץ להציג את המושג "לחץ" באמצעות תופעות מוכרות מחיי היום-יום, לדוגמה: פריסת לחם באמצעות הצד החד של סכין ובאמצעות הצד הקהה שלו.

היחידה $\frac{N}{m^2}$ (פסקל - P_a) תשמש למדידת לחץ. לגבי לחץ של גז הכלוא במכל, יש לציין כי:

(1) הוא פועל בכל הכיוונים.

(2) הוא אחיד במכל (אם הגז אינו זורם, ואם הלחץ הנובע ממשקלו ניתן להזנחה ביחס ללחץ שהוא מפעיל).

(3) הוא אחד המאפיינים של הגז.

ב. **הטמפרטורה** תוצג בתחילה כמדד כמותי לקור ולחום שאדם חש. תרמומטר (גז או כספית) יוצג כמכשיר למדידת טמפרטורה. בהקשר זה יש להדגיש כי השיטה למדידת טמפרטורה באמצעות תרמומטר מבוססת על העובדה שלאחר זמן משתווה טמפרטורת התרמומטר לטמפרטורה הנמדדת, וכי התהליך של מדידת טמפרטורה הוא בדרך כלל תהליך של מדידת נפח (של גז או של כספית). מעלת צלזיוס ($^{\circ}C$) תשמש יחידת טמפרטורה; יש לציין כי סקלת צלזיוס היא שרירותית, וכי יש גם סקלות שרירותיות אחרות.

ג. במקום לצאת מהחוקים האמפיריים של בוייל וגיי-לוסק, אפשר להסתפק בהצגת הנוסחה

$$\frac{pV}{T + 273.16} = \text{Const.}$$

את התנהגותם של כל הגזים (כל עוד הגז אינו דחוס מדי). לאחר מכן מגדירים משתנה חדש:

$$T + 273.16, \text{ המייצג טמפרטורה בקלווין (K ולא } ^{\circ}K\text{)}. \text{ מן הקשר } \frac{pV}{T} = \text{Const.} \text{ ייגזר "האפס המוחלט".}$$

ד. "גז אידיאלי" יוצג כגז המקיים את המשוואה $\frac{pV}{T} = \text{Const.}$ גז שאינו מקיים את המשוואה, יכונה "גז ראלי".

5.2 מודל קינטי לתיאור התנהגות גז אידיאלי (3 שעות)

א. **מודל סטטי**: המודל הסטטי (של בוייל) יוצג לפני המודל הקינטי (של ברנולי). המטרה היא לבחון את יכולתו של המודל הסטטי להסביר את תכונותיהם של הגזים.

ב. **מודל קינטי**: המטרה העיקרית בהצגת המודל הקינטי היא להסביר את התנהגותם הזוהה של כל הגזים תחת שינויי לחץ וטמפרטורה.

ג. יש לפתח את הביטוי ללחץ: $p = \frac{1}{3} \frac{Nm v^2}{V}$ (כאשר N מבטא את מספר מולקולות הגז).

הפיתוח הוא יישום מושגים שנלמדו קודם לכן. מומלץ שהפיתוח ייעשה על-ידי התלמידים בהדרכתו של דף עבודה מתאים.

ד. משמעות חדשה לטמפרטורה: בעזרת הנוסחאות $\frac{pV}{T} = \text{Const.}$ ו- $p = \frac{1}{3} \frac{Nm v^2}{V}$ מראים כי

במסגרת המודל הקינטי של הגז האידיאלי (חד-אטומי כגון הליום ונאון), הטמפרטורה של גז והאנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולות הגז פרופורציוניות זו לזו: $\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$ (קבוע בולצמן).

הטמפרטורה של גז תוצג כאן במשמעות חדשה: מדד לאנרגיה הקינטית (הטרנסלטורית) הממוצעת של מולקולות הגז.

ה. **האנרגיה הפנימית** של כמות מסוימת של גז אידיאלי חד-אטומי תוגדר כסכום האנרגיות הקינטיות (הטרנסלטוריות) של כל המולקולות שבו, דהיינו: $N\bar{E}_k$.

ו. את משוואת המצב של הגז האידיאלי ניתן להציג ללא השימוש במושג "מול", אלא בצורה זו:

$$pV = NkT$$

5.3 החוק הראשון והחוק השני של התרמודינמיקה (1 שעה)

א. **אנרגיה פנימית**: על בסיס הכרת האנרגיה התרמית של גז אידיאלי, יש להציג צורות אחדות של אנרגיה שיכולות להיות לגוף ברובד הפנימי.

ב. **החוק הראשון של התרמודינמיקה**: תהליכים להמרת אנרגיה יכולים להיות מקרוסקופיים או מיקרוסקופיים. אם התהליך הוא מיקרוסקופי - מדובר בעבודה, ואם הוא מיקרוסקופי - מדובר בחום. חום הוא אנרגיה שעוברת מגוף בעל טמפרטורה גבוהה לגוף בעל טמפרטורה נמוכה יותר. למשל, כאשר מקדח חוצב בקיר, הטמפרטורה שלו עולה, כלומר האנרגיה הפנימית שלו עולה. עליית הטמפרטורה אינה נובעת ממעבר חום, אלא מעבודה שנעשית עליו על-ידי כוחות חיכוך שהקיר מפעיל עליו.

החוק הראשון של התרמודינמיקה ($\Delta E = Q + W$) מבטא את שימור האנרגיה בטבע.

תרגיל לדוגמה :

לאדם תחושת קור בידיו. תחושת הקור נעלמת כאשר -

(1) הוא משפשף את ידיו זו בזו. מה גורם במקרה זה לעליית הטמפרטורה של ידיו - עבודה או חום?

(2) הוא מציב את ידיו מעל תנור. מה גורם במקרה זה לעליית הטמפרטורה של ידיו - עבודה או חום?

ג. **החוק השני של התרמודינמיקה** : החוק הראשון של התרמודינמיקה אומר שהאנרגיה נשמרת בכל תהליך, אולם הוא אינו קובע אם תהליך מסוים (שבו האנרגיה נשמרת) יכול או אינו יכול להתממש. החוק השני של התרמודינמיקה מבטא את העובדה שלא כל תהליך שעומד בדרישת שימור האנרגיה, גם מתקיים. זו הסיבה שלמרות שיש כלל האומר שהאנרגיה נשמרת, אי אפשר לנצל את כל האנרגיה שבזבזה, וצריך לחפש דרך קבע "מקורות אנרגיה" חדשים.

פרק 6 : תנועה הרמונית פשוטה

שעות	הנושא
2	6.1 תנועה מחזורית, תנודות, תנודות הרמוניות
3	6.2 נוסחאות קינמטיות לתיאור תנועתו של אוסצילטור הרמוני
6	6.3 דוגמאות : תנודות גוף הקשור לקפיץ אנכי ותנודות של מטוטלת פשוטה
11	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2	ניסויים : - דגימת הכוח הפועל על גוף מתנוודד כפונקציה של המקום. - דגימת המקום של גוף מתנוודד כפונקציה של הזמן.	תנועה מחזורית : $p(t) = p(t + T)$ לכל t . כאשר : $p(t)$ - מקום הגוף ברגע t . $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ $\Sigma \vec{F} = -c\vec{x}$	- תנועה מחזורית ואפיונה על-ידי זמן מחזור, תדירות ותדירות זוויתית. - תנודות (תת-משפחה של תנועות מחזוריות). - תנודות הרמוניות : התבנית המתמטית של הכוח כפונקציה של המקום.	6.1 תנועה מחזורית, תנודות, תנודות הרמוניות
3	- גיליון אלקטרוני : פתרון משוואת התנועה של אוסצילטור הרמוני באופן נומרי.	$-c\vec{x} = m\ddot{\vec{x}}$ $x(t) = A \cos\left(\sqrt{\frac{c}{m}}t + \phi\right)$ $x(t) = A \cos(\omega t)$ $v(t) = -A\omega \sin(\omega t)$ $a(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t)$ $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	- הצגת משוואת התנועה ופתרון כללי של המשוואה. - משמעות הקבועים המופיעים בפתרון הכללי של המקום כפונקציה של הזמן. - פיתוח ביטויים מתמטיים למהירות ולתאוצה כפונקציה של הזמן. - פיתוח ביטוי לזמן-המחזור.	6.2 נוסחאות קינמטיות לתיאור תנועתו של אוסצילטור הרמוני
6	- מדידת זמן-המחזור של תנודות אנכיות כפונקציה של המסה. - מדידת זמן-המחזור של מטוטלת פשוטה כפונקציה של אורך המטוטלת.	$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$	- תנודות גוף הקשור לקפיץ אנכי : ניתוח כוחות וניתוח המרות אנרגיה. - תנודות מטוטלת פשוטה - קירוב זוויות קטנות ; פיתוח נוסחה לזמן-המחזור. - השוואה בין גרף "כוח-מקום" בתנועה הרמונית לבין גרף "כוח-מקום" בתנודות שאינן הרמוניות.	6.3 דוגמאות : תנודות גוף הקשור לקפיץ אנכי ותנודות של מטוטלת פשוטה

תנועה הרמונית: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

6.1 תנועה מחזורית, תנודות, תנודות הרמוניות (2 שעות)

א. מוצע לפתוח את הנושא "תנועה הרמונית" בדיון כללי בתנועה מחזורית בזמן. התלמידים בשלים בשלב זה לדיון כללי, כי כבר מוכרות להם שתי דוגמאות: תנועה מעגלית קצובה ותנועה במעגל אנכי. היישום המידי הוא אמנם תנודות הרמוניות, אך תמונה רחבה של התנועה המחזורית תוכל לסייע להם בבוא העת להבין תופעות אחרות מחזוריות בזמן, כגון גלים וזרם חלופין.

יש להגדיר את הפרמטרים המאפיינים את התנועה המחזורית בזמן - זמן-מחזור, תדירות ותדירות זוויתית. ראוי להדגיש כי די בדיעת אחד משלושת הגדלים האלה כדי לאפיין תנועה מחזורית - כל שניים מבין שלושה נקבעים על-ידי הגודל השלישי.

ב. "תדירות זוויתית" ו"מהירות זוויתית" הם מושגים שונים, אולם נהוג לסמן אותם באותה האות

(ω). יתר על כן, הם נמדדים באותה היחידה (s^{-1}), ובתנועה מעגלית קצובה אף יש להם אותו

הערך המספרי. לכן תלמידים נוטים לזהות את שני המושגים כמושג אחד. חשוב אפוא, ליצור הבחנה בין שני המושגים. (נוח ליצור את ההבחנה בהקשר של תנועת מטוטלת).

ג. מוצע לבנות תמונה שבה התנודות ההרמוניות הן תת-משפחה של התנודות, והתנודות הן תת-משפחה של תנועות מחזוריות בזמן.

ד. מוצעות שתי דרכים לאפיון הכוח בתנועה הרמונית:

דרך א' נסמכת על הכרת תבנית הכוח של קפיץ: דנים במערכת הכוללת קרונית הנמצאת על משטח אופקי חלק, וקפיץ אשר ניתן לכיווץ ולמתוחה. הקפיץ קשור בקצהו האחד לנקודה קבועה, ובקצהו האחר לקרונית.

מנתחים את התבנית המתמטית של הכוח המחזיר הפועל על הקרונית בשעה שהיא מתנודדת.

דרך ב' נסמכת על מדידות: מודדים בעזרת חיישנים את הכוח הפועל על גוף מתנודד ואת מקומו - שניהם כפונקציה של הזמן. לאחר מכן חוקרים את הקשר שבין הכוח ובין המקום. לחלופין, אפשר להסתפק במדידת המקום כפונקציה של הזמן ולבחון את הקשר שבין התאוצה לבין המקום.

ה. את התבנית המתמטית של הכוח המחזיר בתנועה הרמונית כדאי להציג בצורת $\vec{F} = -c\vec{x}$, כאשר c הוא קבוע חיובי כלשהו. צורת הכתיבה $\vec{F} = -k\vec{x}$ עלולה לגרום לכך שתלמידים יזהו "תנועה הרמונית" עם "תנועה בהשפעת קפיץ".

6.2 נוסחאות קינמטיות לתיאור תנועתו של אוסצילטור הרמוני (3 שעות)

א. לאחר שהתלמידים הכירו את התבנית $\vec{F} = -c\vec{x}$, מומלץ שהם יחקרו בגיליון אלקטרוני, בעזרת שיטות נומריות, את אופי התנועה בהשפעת כוח שתבניתו $\vec{F} = -c\vec{x}$. החקירה תכלול גם השפעות ערכיהם של קבוע התנועה ההרמונית c ושל תנאי התחלה על פונקציות מקום-זמן, מהירות-זמן ותאוצה-זמן.

ב. נציע שתי דרכים לפיתוח אנליטי של נוסחאות קינמטיות:

דרך א': באמצעות חשבון דיפרנציאלי - פתרון משוואת התנועה $-c\vec{x}(t) = m\ddot{\vec{x}}(t)$.

אין צורך לפתור באופן פורמלי את המשוואה הדיפרנציאלית, אולם חשוב שהפתרון ייבנה עם התלמידים, תוך דיון בפתרונות אפשריים ותוך הכרה כי הפתרון צריך להיות פונקציה המקיימת שתי דרישות:

א. מחזוריות בזמן;

ב. קיום יחס ישר בין הפונקציה לבין הנגזרת השנייה שלה לפי הזמן.

התלמידים יציבו את הפתרון הכללי $x(t) = A \cos\left(\sqrt{\frac{c}{m}}t + \phi\right)$ במשוואת התנועה, וייווכחו שהפתרון אכן מקיים את המשוואה.

לאחר הצגת הפתרון, יש לבחון את משמעות הגדלים A , ϕ ו- $\sqrt{\frac{c}{m}}$ המופיעים בו. מוצע להיעזר לשם כך במחשב.

נוסחאות המקום, המהירות והתאוצה כפונקציה של הזמן, שבהם ישתמשו התלמידים, יכולות להיות עם $\phi = 0$. אולם על התלמידים להיות מודעים לכך שהן כפופות לבחירה של תנאי התחלה מסוימים.

דרך ב': בעזרת תנועה מעגלית קצובה - מראים כי כאשר גוף נע בתנועה מעגלית קצובה במסלול מעגלי, יש אותה תבנית מתמטית לתאוצת ההיטל של הגוף על קוטר המעגל ולתאוצת גוף המתנוודד בתנועה הרמונית. מפתחים את הביטויים המתמטיים של מקום ההיטל, מהירותו ותאוצתו כפונקציה של הזמן, ומשליכים מהם על התנועה ההרמונית. יש לשים לב כי בשיטה זו, ω היא מהירותו הזוויתית של הגוף הנע במעגל וגם תדירותה הזוויתית של תנועת ההיטל.

אם בוחרים בדרך ב', כדאי לפתוח את הנושא בהדגמה כזו: גלגל, שמישורו ניצב לקיר, מסתובב על ציר אופקי. להיקף הגלגל קשור מוט קצר הניצב למישור הגלגל. מטילים על הקיר אור בניצב

אליו, כך שצללית המוט הקצר מוטלת על הקיר ומבצעת תנודות אנכיות. סמוך לצללית המתנודדת מציבים משקולת המתנודדת על קפיץ אנכי, כך שנקודת שיווי-המשקל של התנודות נמצאת בגובה מרכז הגלגל. גורמים לכך שתנודות הצללית והמשקולת תהיינה שוות הן בתדירות והן במשרעת שלהן. במצב זה, התלמידים רואים בבירור כי צללית המוט והמשקולת נעות "כגוף אחד".

ג. השוואה בין שתי השיטות: דרך א' היא כללית, והיא לרוב חסכונית בזמן לעומת דרך ב'. דרך ב' אינה מצריכה בקיאות בחשבון דיפרנציאלי. עם זאת היא עלולה לעורר קשיים מושגיים: הביטוי ω , שמשמעותו בתנועה המעגלית ברורה, מעורר קושי כאשר מתנתקים מהתמונה של גוף הנע במסלול מעגלי.

6.3 דוגמאות: תנודות גוף הקשור לקפיץ אנכי ותנודות מטוטלת פשוטה (6 שעות)

א. לגבי תנודות אנכיות של גוף התלוי על קפיץ:

(1) תלמידים נוטים לבלבל בין העתק הגוף המתנודד מן הנקודה שבה הקפיץ רפוי (מכפלת גודל זה בקבוע הקפיץ שווה ל**כוח האלסטי** הפועל על הגוף), לבין ההעתק מנקודת שיווי-המשקל (מכפלת גודל זה בקבוע הקפיץ שווה ל**כוח השקול** הפועל על הגוף).

(2) מומלץ להציג שתי דרכים לעריכת משוואת שימור האנרגיה המכנית של גוף תלוי על קפיץ:

דרך א': האנרגיה הפוטנציאלית מוצגת כסכום של אנרגיית כובד $mg\Delta h$ ושל אנרגיה אלסטית

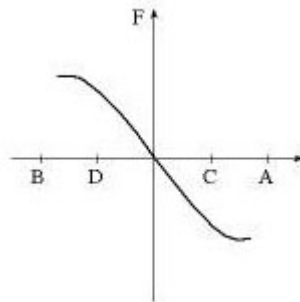
$$\frac{1}{2}k\Delta\ell^2, \text{ כאשר } \Delta\ell \text{ מייצג את התארכות הקפיץ מעבר למצבו הרפוי.}$$

דרך ב': האנרגיה הפוטנציאלית מיוצגת על-ידי ביטוי אחד $\frac{1}{2}ky^2$, כאשר y הוא מקום הגוף

ביחס לציר מקום שראשיתו בנקודת שיווי-המשקל. ביטוי זה כולל את האנרגיה האלסטית ואת אנרגיית הכובד גם יחד.

ב. יש לנתח ולתרגל המרת אנרגיה של גוף הקשור בקפיץ אנכי או אופקי ושל מטוטלת פשוטה.

ג. כאשר גוף מבצע תנודות - הכוח המחזיר הפועל עליו אינו נמצא בהכרח ביחס ישר להעתק הגוף מנקודת שיווי-המשקל (תרשים 1).



תרשים 1

אולם, במקרים רבים, ככל שמשרעת התנודות קטנה, הקשר בין הכוח להעתק מבטא יחס ישר בקירוב טוב יותר. כך, למשל, חלק העקומה שבין C ל-D בתרשים ב' סוטה מיחס ישר במידה פחותה מאשר חלק העקומה בתחום מ-A ל-B. לכן תנודות של גוף הנע בהשפעת הכוח המתואר בתרשים זה, במצב שבו המשרעת קטנה, יכולות להיות מתוארות בקירוב טוב על-ידי תנודות הרמוניות.

לא כל תנודה ניתנת לייצוג כהרמונית בקירוב, גם כאשר משרעת התנודות קטנה. אפשר להיווכח בכך כאשר מפתחים את הביטוי המתמטי המתאר כוח מחזיר כלשהו (לא הרמוני), לטור טיילור סביב נקודת שיווי-המשקל. (אין הכרח להציג פיתוח זה בפני התלמידים.)

פרק 7 : כבידה

שעות	הנושא
2	7.1 רקע היסטורי וחוקי קפלר
5	7.2 חוק הכבידה
6	7.3 המושג "שדה", עבודה ואנרגיה בשדה הכבידה
13	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2	- ניתן לצפות בשני הסרטים: "שלושת חוקי קפלר" ו"בעיית קפלר" מסדרת סרטי הווידאו "היקום המכני" (או"פ).	$T^2 = kr^3$ $\left(\frac{\bar{r}_1}{\bar{r}_2}\right)^3 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2$	<ul style="list-style-type: none"> - פיתגורס: מודל גאוצנטרי. - אריסטו: עולם תת-ירחי ועולם על-ירחי. - תלמי: תיאור מסלול כוכב לכת ע"י מעגל משני ומעגל ראשי. - קופרניקוס: מודל הליוצנטרי, יתרונותיו וחסרונותיו. - טיכו ברהה: תצפיותיו האסטרונומיות. - גלילאו גליליי: תגליותיו באמצעות הטלסקופ (פני הירח, שביל החלב, ירחי צדק, מופעי נוגה). - יוהן קפלר: שלושת החוקים. 	7.1 רקע היסטורי וחוקי קפלר
5	- הדמיית מחשב: תנועת לוויינים או ירחים סביב כוכב או פלנטה (כדוגמת צדק בפרוייקט (Clea).	$F = G \frac{Mm}{r^2}$ <p>לגבי גרם שמים כדורי</p> $g^* = \frac{GM}{r^2}$	<ul style="list-style-type: none"> - הביטוי לכוח הכבידה בקירוב שבו המסלולים הם מעגליים. - יחס תאוצות הנפילה החופשית, של עצם על פני הארץ ושל הירח בכיוון הארץ, שווה ליחס ההפוך של מרחקי הגופים ממרכז הארץ. - ניסוח חוק הכבידה. - ניסוי קבנדיש: חישוב מסה של גרם שמים על פי תאוצת הנפילה החופשית על פניו g^*. - הצלחות נוספות לתאוריית הכבידה: גילוי נפטון, הסבר תופעת הגיאות והשפל (איכותי). - תנועת לוויינים במסלולים מעגליים; חישוב מסת כוכב על פי נתוני לוויין שלו. 	7.2 חוק הכבידה
6		$U_G = -\frac{GMm}{r}$ $E_k = -\frac{U_G}{2}$ $E = -\frac{GMm}{2r}$	<ul style="list-style-type: none"> - המושגים: "עצמת שדה הכבידה", "שדה הכבידה", "שדה אחיד", "שדה רדיאלי". - יתרונות תיאור הכבידה באמצעות המושג "שדה". - שדה הכבידה כשדה משמר. - הביטוי המתמטי לאנרגיה הפוטנציאלית הכבידתית. - המרות אנרגיה בשדה הכבידה. - גודל מהירות המילוט ואנרגיית קשר. 	7.3 המושג "שדה", עבודה ואנרגיה בשדה הכבידה

כבידה: פירוט, דגשים, הערות דידיקטיות

7.1 רקע היסטורי וחוקי קפלר (2 שעות)

- א. יש להציג את הרקע ההיסטורי של האסטרונומיה כדוגמה חשובה להתפתחותה של תאוריה מדעית. מוצע שהרקע ההיסטורי יוצג בכיתה על-ידי תלמידים.
- ב. מומלץ לפתוח את הסקירה ההיסטורית בהצגה של:
 - (1) תצלום השמים שהתקבל לאחר ששרט הצילום היה חשוף לאור הכוכבים שעות מספר.
 - (2) מסלול תנועתו של כוכב לכת כפי שנצפה מן הארץ (תרשים או אנימציה ממוחשבת).
- ג. כדאי להציג את התאוריה של אריסטו בדבר ארבעה יסודות בעולם התת-ירחי (אדמה, מים, אש ואוויר) ויסוד אחד בעולם העל-ירחי (אתר), ולהדגיש כי תאוריה זו אינה "מודל" במובן המקובל היום, כיון שלא נובעות ממנה מסקנות הניתנות לבחינה. דיון שכזה יכול להוות נדבך נוסף בהבנת משמעות המושג "מודל" ותפקידו.
- ד. יש להדגיש כי ההנחה של אפלטון שמסלולו של כוכב לכת הוא צירוף של מעגלים, התבררה כהנחת יסוד שגויה רק כעבור כאלפיים שנה (קפלר), וכי במשך כל התקופה הזו היא לא הועמדה לביקורת. עניין זה עשוי לשמש דוגמה לכך שהנחות יסוד שגויות, שאינן נבחנות מחדש, עלולות לעכב התפתחות מדעית.
- ה. מומלץ להציג את המודל של אריסטרכוס, המציע את הסבר לתופעות אסטרונומיות בהנחה שהארץ סובבת סביב השמש ועל צירה, ולדון בקשיים לקבל את התפיסה הזו. בהקשר זה מומלץ לדון ביתרונות ובחסרונות של כל אחד משני המודלים - הגאוצנטרי וההליוצנטרי.
- ו. כדאי להסביר את תוצאות התצפיות של גלילאו גליליי על כוכבי השבת, מופעי נוגה וירחיו של צדק ואת השלכותיהן החברתיות-דתיות של התצפיות נוסף למשמעותן הפיזיקלית.
- ז. מומלץ להציג את השיטה שבעזרתה חישב אריסטוטנס את רדיוס כדור הארץ.
- ח. מומלץ להציג בעזרת מחשב כיצד נראים מסלולי כוכבי הלכת מן הארץ וכיצד הם נראים מן השמש.
- ט. מומלץ שהתלמידים יתנסו בסרטוט אליפסה בעזרת חוט הכרוך סביב שני מסמרים (מוקדי האליפסה).

7.2 חוק הכבידה (5 שעות)

א. הצעה לסדר הוראה:

- (1) על סמך חוקי קפלר, ובהנחה שמסלולי כוכבי הלכת הם מעגליים בקירוב, מראים כי:

- על כל כוכב לכת פועל כוח.
- כיוון הכוח הוא כלפי השמש.
- גודל הכוח: $F = \frac{4\pi^2}{k} \cdot \frac{m}{r^2}$ (k - קבוע הפרופורציה המופיע בחוק השלישי של קפלר).

(2) מעלים השערה הנסמכת על המסקנות הרשומות ב-(1) לעיל, כי הכוח המאיץ את כוכבי הלכת

$$\text{מופעל על-ידי השמש;} \quad \frac{4\pi^2}{k}$$

מייצג את יכולתה להפעיל כוחות על כוכבי הלכת.

(3) בהסתמך על החוק השלישי של ניוטון לגבי האינטראקציה בין השמש לכוכב לכת, מסיקים

$$\text{כי ניתן להציג:} \quad \frac{4\pi^2}{k} = GM$$

(4) הכוחות שהארץ מפעילה על הירח ועל גוף הנמצא על פני הארץ, נמצאים ביחס הפוך לריבוע מרחקי הגופים ממרכז הארץ וביחס ישר למסתם.

$$(5) \text{ מכלילים את הביטוי } F = G \frac{Mm}{r^2} \text{ לכל שני גופים נקודתיים (חוק הכבידה של ניוטון).}$$

(6) מציינים את המסקנה המתמטית (ללא הוכחה) כי הביטוי לכוח $F = G \frac{Mm}{r^2}$ תקף גם

לכדורים בעלי צפיפות אחידה, כאשר r מסמל את המרחק בין מרכזי שני כדורים. רצוי להסביר, ברמה העקרונית, את שיטת החישוב של כוח המשיכה בין שני גופים בעלי צורות כלשהן. (אין צורך לחשב אינטגרלים הלכה למעשה).

ב. יש להדגיש כי ניסוי קבנדיש (כ-130 שנה לאחר ניסוח חוק הכבידה) היה האישור הניסיוני הראשון להשערות של ניוטון כי :

1. קיימת אינטראקציה כבידתית גם בין גופים בעלי ממדים מעבדתיים.
2. הביטוי המתמטי לכוח הכבידה תקף גם לגבי גופים בעלי ממדים מעבדתיים.
- ג. כהצלחות של תאוריית הכבידה יש לתאר :
 1. את גילויי של כוכב הלכת נפטון תחילה 'על הנייר', ורק אחר כך בשמים.
 2. את תופעת הגיאאות והשפל. יש לתאר את התופעה ואת מחזוריותה ולציין כי ניתן לה הסבר מלא במסגרת תאוריית הכבידה.
 3. קיומם של לוויינים מלאכותיים.
- ד. ניתן להסתפק ביישום החוק השני של ניוטון לגבי לוויינים הנעים במסלולים מעגליים. עם זאת, יש לציין כי אם מהירותו של לוויין כזה משתנה (למשל כתוצאה ממעבר דרך ענן קוסמי), מסלולו יהיה אליפטי (ולא מעגלי עם רדיוס אחר, כפי שתלמידים נוטים לחשוב).

אף על פי שהטיפול המתמטי נעשה רק לגבי מסלולים מעגליים, יש להציג את התמונה הבאה לגבי מערכת סגורה של שני גופים שיש ביניהם אינטראקציה כבידתית: כל אחד משני הגופים נע במסלול אליפטי (סביב מרכז המסה המשותף). כאשר מסתו של אחד הגופים גדולה מאוד ביחס למסתו של הגוף האחר - הוא כמעט אינו נע, והגוף האחר נע במסלול אליפטי. בתנאים מיוחדים, מסלולו של הגוף הקטן הוא מעגלי.

ה. מומלץ שתלמידים יבנו בגיליון אלקטרוני הדמיה של תנועת לוויין ויחקרו את התנועה.

ו. מומלץ לסכם את הוראת הנושא "חוק הכבידה" בפירוט סעיפים אלה:

(1) העובדות התצפיתיות והניסיוניות שהיו ידועות לפני תאוריית הכבידה.

(2) תאוריית הכבידה והסבריה לעובדות הידועות.

(3) הניבוי של תאוריית הכבידה.

יש לציין כי בצד הצלחותיה המרשימות של תאוריית הכבידה, היא אינה יכולה להסביר את מסלול תנועתו של כוכב חמה. (לכוכב זה סטייה קטנה מן המסלול המחושב בעזרת חוק הכבידה). הסבר לכך ניתן במסגרת תורת היחסות הכללית.

7.3 המושג "שדה", עבודה ואנרגיה בשדה הכבידה (6 שעות)

א. יש להציג את המושג "שדה" כנקודת ראות חלופית לנקודת הראות של פעולה מרחוק.

ב. יש להדגיש כי:

(1) כאשר אין תנועה יחסית בין הגופים, אין יתרון מהותי לאף אחת משתי נקודות הראות (פעולה מרחוק ושדה).

(2) לנקודת הראות של השדה יש יתרון לעומת נקודת הראות של פעולה מרחוק כאשר מדובר במצבים משתנים. במצבים כאלה נקודת הראות של "פעולה מרחוק" עומדת בסתירה לעיקרון של תורת היחסות הקובע כי דרוש זמן כדי שמידע יעבור. לעומת זאת, התיאור באמצעות השדה מתיישב עם עיקרון זה.

ג. יש להדגיש ששדה הכבידה הוא שדה משמר. זאת כדי להכין את הרקע לדיון בנושא המרות אנרגיה בשדה כבידה ואף כהכנה להוראת השדה החשמלי סביב מטען נקודתי.

ד. הדיון בנושאי האנרגיה הכוללת של לוויין בשדה כבידה, אנרגיית הקשר ומהירות המילוט חשוב לא רק בהקשר לכבידה, אלא גם בגלל שהיבטיו השונים נוגעים למגוון נושאים שיידונו ב"אלקטרומגנטיות" ו"בקרינה וחומר". מומלץ כבר עתה להזכיר את המושגים "בור פוטנציאל", האנרגיה הכוללת של אלקטרון על פי מודל בוהר ו"אנרגיית קשר" במסגרת הדיון באנרגיה הקינטית והפוטנציאלית של לוויין בשדה הכבידה, כהכנה להוראתם בהמשך.

מכניקה – בעיות ותרגילים לדוגמה

קינמטיקה

1. כדי לחקור את תנועתו של גוף הנע על קו ישר, רשם תלמיד א' את מקומו של הגוף במרווחי זמן של 0.02 שניות. הוא הגדיר את הרגע שבו נערכה המדידה הראשונה כ- $t=0$ (ברגע זה מהירות הגוף אינה בהכרח אפס) ואת ציר המקום - x - בכיוון תנועת הגוף, כך שראשיתו בנקודת הימצאו של הגוף ברגע $t=0$. תוצאות המדידות רשומות בטבלה שלפניך.

0.16	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02	0	זמן - t (ש')
23.04	18.48	14.4	10.8	7.68	5.04	2.88	1.20	0	מקום - x (ס"מ)

- א. סרטט גרף המתאר את מקומו של הגוף כפונקציה של הזמן.
 ב. קבע על-פי הגרף האם מהירות הגוף גדלה כפונקציה של הזמן, קטנה או אינה משתנה. נמק.
 ג. תלמיד ב' העריך את מהירות הגוף ברגע $t=0.02s$ כך:

$$v_{0.02} \approx \bar{v}_{0.02 \rightarrow 0.04} = \frac{x_{0.04} - x_{0.02}}{0.04 - 0.02} = \frac{0.0288m - 0.012m}{0.02s} = 0.84m/s$$

- האם זו הדרך המדויקת ביותר להעריך את מהירות הגוף ברגע $0.02s$? אם כן - הסבר מדוע.
 אם לא - חשב את המהירות בדרך אחרת, והסבר מדוע היא מדויקת מזו של תלמיד ב'.
 ד. הכן טבלה שבה שתי עמודות: עמודה עבור הזמן $t(s)$ ועמודה עבור גודל המהירות. רשום בטבלה את המהירות שחישבת עבור $t = 0.02s$. חשב את גודלי מהירות הגוף ביחידה m/s ברגעים: $t = 0.14s$, $t = 0.10s$, $t = 0.06s$ ורשום את תוצאות החישובים במקומות המתאימים בטבלה שהכנת.

- ה. סרטט גרף המתאר את מהירות הגוף כפונקציה של הזמן.
 ו. האם תאוצת הגוף קבועה? אם לא - הסבר מדוע. אם כן - חשב את גודלה.

2. כדור נזרק כלפי מעלה במהירות התחלתית של $30m/s$. רגע זריקת הכדור מוגדר כ- $t=0s$.
 א. ציר y מוגדר כך שכיוונו החיובי כלפי מעלה וראשיתו בנקודה שממנה נזרק הכדור. עבור מרווח הזמן מרגע $t=0s$ עד לרגע שהכדור חוזר לנקודה שממנה הוא נזרק, סרטט גרפים המתארים:

- (1) את מקום הכדור כפונקציה של הזמן.
- (2) את מהירות הכדור כפונקציה של הזמן.
- (3) את תאוצת הכדור כפונקציה של הזמן.

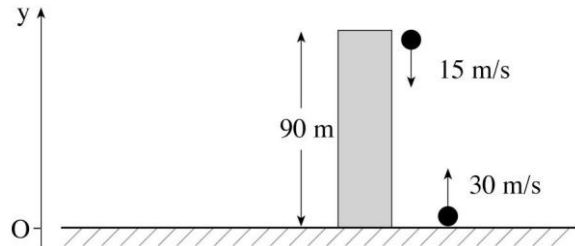
ב. ציר y מוגדר כך שכיוונו החיובי כלפי מטה וראשיתו בנקודה שממנה הכדור נזרק. סרטט גרף של מהירות הכדור כפונקציה של הזמן, ביחס לציר y , מרגע $t=0$ s עד לרגע שהכדור חוזר לנקודה שממנה הוא נזרק.

ג. מסוק עולה במהירות קבועה של 10 m/s . ציר אנכי y צמוד למסוק.

(1) כעבור כמה זמן מרגע הזריקה מתאפסת מהירות הכדור ביחס לציר y ?

(2) זמן עליית הכדור ביחס לציר y שהוגדר לעיל, שווה לזמן ירידתו. האם זמן עליית הכדור ביחס לציר y שווה לזמן ירידתו? נמק את תשובתך.

3. כדור א' נזרק כלפי מעלה מרגלי בניין שגובהו 90 m , במהירות שגודלה 30 m/s , ובו-זמנית נזרק כדור ב' מגובה גג הבניין כלפי מטה במהירות שגודלה 15 m/s , כמתואר בתרשים.



א. (1) כמה זמן לאחר זריקתם נפגשו הכדורים?

(2) באיזה גובה נפגשו הכדורים?

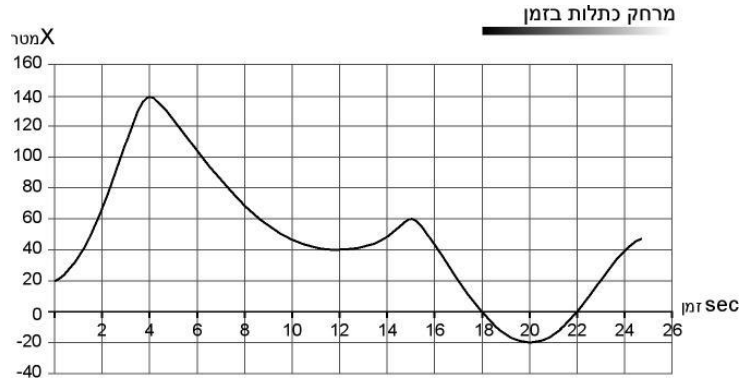
(3) מה כיוון תנועתו של כל כדור ברגע פגישתם? (הנח כי הכדורים אינם מתנגשים אלא חולפים זה ליד זה.)

ב. האם מהירותו של כדור ב' ביחס לכדור א' היא קבועה? אם כן - הסבר. אם לא - חשב את התאוצה של כדור ב' ביחס לכדור א'.

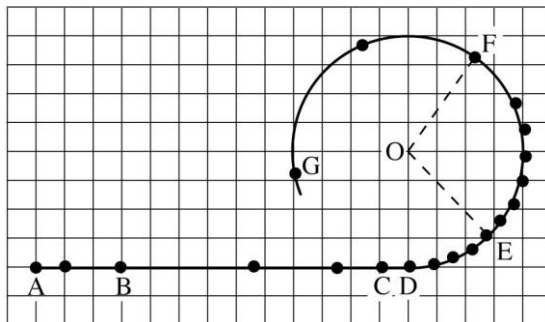
ג. סרטט גרף המתאר את המרחק בין שני הכדורים מרגע זריקתם עד לפגיעתו של אחד הכדורים בקרקע.

דינמיקה

4. הגרף מתאר את מהירותה של מכונית כפונקציה של הזמן. ברגע $t=0$ s המכונית מתחילה לנסוע ימינה, והיא נוסעת עד רגע $t=25$ s על כביש ישר.



- א. באיזה רגע או באלו רגעים תאוצת המכונית היא אפס?
- ב. באיזה רגע תאוצת המכונית היא מרבית?
- ג. האם המרחק שהמכונית עברה מרגע $t=0s$ עד רגע $t=4s$ קטן מהמרחק שהמכונית עברה מרגע $t=4s$ עד רגע $t=10s$, גדול ממנו או שווה לו? נמק.
- ד. האם במהלך תנועת המכונית מרגע $t=0s$ עד רגע $t=25s$, המכונית משנה את כיוון תנועתה (משנה את כיוון נסיעתה מימין לשמאל או להפך)? אם כן - ציין באיזה רגע או באלו רגעים המכונית משנה את כיוון תנועתה. אם לא - הסבר.
- ה. האם הכוח השקול הפועל על המכונית מרגע $t=0s$ עד רגע $t=2s$ קטן, קבוע או גדל כפונקציה של הזמן?
- ו. סרטט מלבן המייצג את המכונית במהלך נסיעתה, והוסף חצים המייצגים את כיוון המהירות, כיוון התאוצה וכיוון הכוח השקול הפועל על המכונית ברגע $t=16s$.
- ז. לאחר רגע $t=25s$, המכונית נסעה לאורך כביש מעוקל (לאו דווקא מעגלי), ומד-המהירות שלה (ספידומטר) הראה ערך קבוע. האם יש למכונית תאוצה בתנועתה לאורך הכביש המעוקל? נמק.



5. התרשים מתאר את מסלול תנועתו של גוף הנע מנקודה A עד נקודה G, וכן 'עקבות' של הגוף במרווחי זמן שווים. קטע המסלול ABCD הוא ישר, וקטע המסלול DEFG הוא קשת של מעגל שמרכזו O. א. העתק את התרשים למחברתך. בכל אחת

מהנקודות B, C, E ו-F סרטט את וקטורי המהירות, התאוצה והכוח השקול. התייחס לכיווני הווקטורים ולא לגדלים שלהם.

שים לב! אם לדעתך לא ניתן לקבוע במדויק את כיוונו של וקטור מסוים - סרטט את הווקטור בכיוון מקורב.

ב. (1) האם גודל המהירות בנקודה B שווה לגודל המהירות בנקודה C, גדול ממנו או שווה לו? נמק.

(2) האם גודל התאוצה בנקודה B שווה לגודל התאוצה בנקודה C, גדול ממנו או קטן ממנו? נמק.

6. גוף A, שמסתו $M=1.4\text{kg}$ מונח על שולחן אופקי. הגוף קשור בחבל הכרוך על גלגלת

למשקולת B שמסתה $m=0.6\text{kg}$. המערכת משוחררת ממנוחה כאשר גובה המשקולת B מעל

הרצפה הוא 0.54m (ראה תרשים). ניתן להזניח

את החיכוך בין החבל לבין הגלגלת.

הנח בכל שלבי השאלה שהמרחק בין הגוף A לבין

הגלגלת גדול מאוד, ושהגוף אינו פוגע בגלגלת.

א. בסעיף זה הנח כי מסת החבל וכן החיכוך בין

הגוף A לבין השולחן ניתנים להזנחה.

(1) חשב כעבור כמה זמן מגיע הגוף B לרצפה.

(2) סרטט גרף של מהירות הגוף A כפונקציה של הזמן, מרגע השחרור שיוגדר כ- $t=0\text{s}$ עד

הרגע $t=2\text{s}$.

ב. בסעיף זה הנח כי מסת החבל ניתנת להזנחה, אולם יש חיכוך בין הגוף A לבין המשטח (למרות

זאת, המערכת יוצאת לתנועה ברגע $t=0\text{s}$). סרטט גרף מקורב של מהירות הגוף A כפונקציה

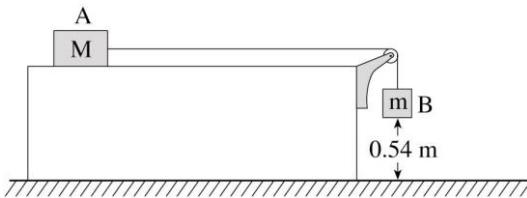
של הזמן, מרגע $t=0\text{s}$ עד הרגע שבו הגוף A נעצר (אינך נדרש לרשום ערכים מספריים על

הצירים). הסבר את שיקולך.

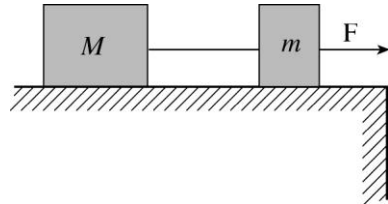
ג. בסעיף זה הנח כי החיכוך בין הגוף A לבין השולחן ניתן להזנחה, אולם מסת החבל אינה

ניתנת להזנחה. מהו סוג התנועה של הגוף A לפני שהגוף B מגיע לקרקע (שוות-מהירות, שוות-

תאוצה, בתאוצה הולכת וגדלה או בתאוצה הולכת וקטנה)? נמק.

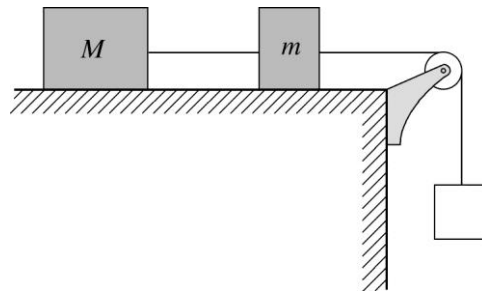


7. על משטח אופקי מונחים שני גופים שמסותיהם m ו- M , $M > m$. הגופים קשורים זה לזה בחוט שמסתו זניחה. על הגוף שמסתו m מפעילים כוח אופקי ימינה (ראה תרשים א'), והמערכת נעה בתאוצה.



תרשים א'

בסעיפים ב' ו- ג' בלבד הנח שהחיכוך בין הגופים לבין המשטח ניתן להזנחה.
 א. קבע והסבר באופן איכותי (במילים) על מי משני הגופים פועל כוח שקול גדול יותר.
 ב. בטא באמצעות נתוני השאלה את תאוצת הגופים ואת מתיחות החוט המקשר ביניהם.
 ג. קושרים לגוף שמסתו m , באמצעות חוט שמסתו זניחה, גוף שמשקלו שווה לכוח F שבתרשים א'. התאוצה במצב זה (תרשים ב') שונה בגודלה מן התאוצה במצב הקודם (תרשים א'). האם גודל התאוצה במצב זה קטן מגודל התאוצה במצב הקודם או גדול ממנו? נמק.



תרשים ב'

8. מכונית שמסתה 900kg גוררת קרון שמסתו 750kg על כביש אופקי. מנוע המכונית מסובב את זוג הגלגלים הקדמיים של המכונית. הקרון קשור למכונית באמצעות מוט גרירה. מסת המוט ניתנת להזנחה. המכונית עם הקרון נעים תחילה במהירות קבועה. גודל כוח ההתנגדות שפועל על הקרון נגד כיוון תנועתו הוא 2000N . גודל כוח ההתנגדות שפועל על המכונית נגד כיוון התנועה הוא 1700N .
 א. (1) חשב את גודל הכוח הפועל על המכונית בכיוון תנועתה.
 (2) קבע את הגודל ואת הכיוון של הכוח שמוט הגרירה מפעיל על הקרון.

הנח שאותם כוחות התנגדות שהוזכרו קודם (1700N ו-2000N) ממשיכים לפעול, ושגודלם אינו משתנה.

ב. בשלב מסוים, המכונית עם הקרוון נעים בתאוצה שגודלה 2m/s^2 וכיוונה ככיוון תנועת המכונית.

(1) חשב את גודל הכוח שהמוט מפעיל על הקרוון במצב זה, וקבע את כיוונו.

(2) חשב את גודל הכוח הפועל על המכונית בכיוון תנועתה.

ג. איזה גוף מפעיל על המכונית כוח בכיוון התנועה שלה?

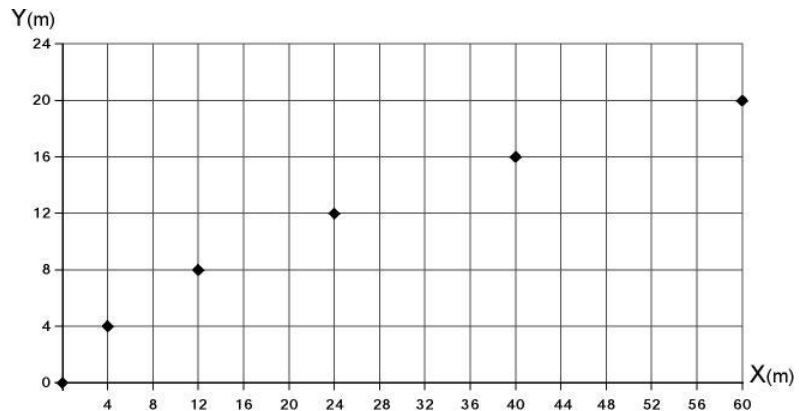
ד. האם ייתכן שהמתיחות במוט תהיה שווה לאפס? אם לא, הסבר מדוע. אם כן - מהי תאוצת המכונית במקרה זה?

תנועה במישור

9. התרשים מתאר את עקבותיו של גוף שמסתו $m=0.1\text{kg}$ ברגעים $t=0\text{s}, 1\text{s}, 2\text{s}, 3\text{s}, 4\text{s}, 5\text{s}$.

מישור התנועה של הגוף מתואר על-ידי ציר ה- x וציר ה- y .

גרף עקבות של תנועת הגוף בציר ה- x ובציר ה- y .



א. הכן טבלה ורשום בה את שיעורי ה- x ושיעורי ה- y של הגוף ברגעים שבהם נרשמו העקבות.

ב. מהו סוג התנועה בכיוון ציר ה- y ?

ג. חשב את רכיבי מהירות הגוף בציר ה- x , ברגעים $t=0\text{s}, 1\text{s}, 2\text{s}, 3\text{s}, 4\text{s}, 5\text{s}$, והוסף את הערכים לטבלה.

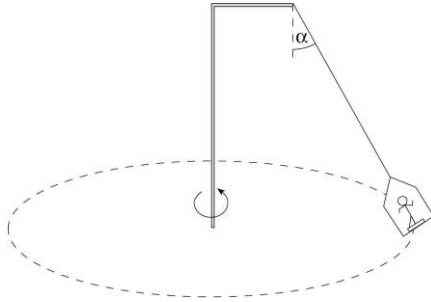
ד. (1) סרטט גרף של רכיב ה- x של המהירות כפונקציה של הזמן.

(2) האם רכיב ה- x של התאוצה קבוע? נמק.

ה. (1) מה רכיב המהירות בכיוון הציר x ברגע $t=0\text{s}$?

(2) מה גודלו ומה כיוונו של הכוח שפעל על הגוף? נמק.

(3) מהו מסלול התנועה של הגוף?



10. בתרשים שלפניך מתואר מתקן המורכב מעמוד אנכי,

שיוצאת ממנו זרוע אופקית. לקצה הזרוע קשור חבל שמתנועתו ניתנת להזנחה. לקצה החבל קשור כיסא שעליו מונחים מאזני קפיץ, ועל המאזניים עומד נער.

מסת הכיסא עם המאזניים והנער היא M .

המתקן מסתובב סביב ציר העמוד, כך שהכיסא (עם המאזניים והנער) נעים במסלול מעגלי אופקי במהירות

שגודלה קבוע, והחבל יוצר זווית α עם הכיוון האנכי (ראה תרשים).

א. בטא באמצעות נתוני השאלה את המתחחות בחבל.

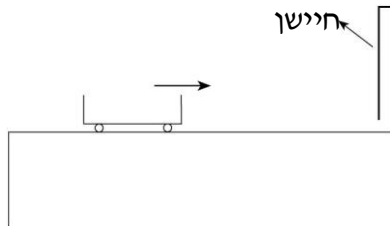
ב. בטא באמצעות נתוני השאלה את גודל התאוצה של הכיסא.

ג. סרטט את הנער ואת הכוחות הפועלים עליו. ציין לגבי כל כוח מי מפעיל אותו.

ד. בטא באמצעות מסת הנער, m , את משקל הנער כפי שנמדד על-ידי המאזניים שעליהם הוא

ניצב.

תנע ואנרגיה



תרשים א' – מבנה מערכת הניסוי

11. כדי לבחון את החוק הקובע כי "המתקף הכולל הפועל על

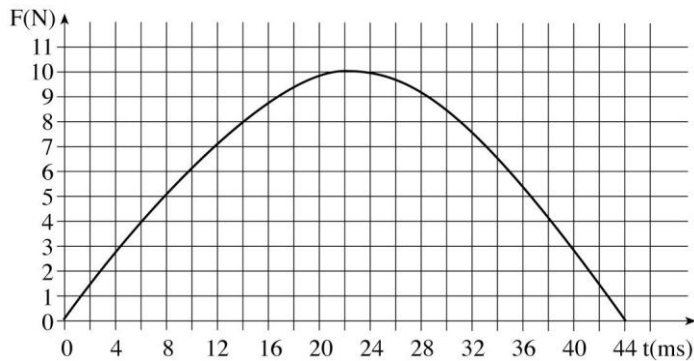
גוף שווה לשינוי בתנע של הגוף", ביצע תלמיד א' ניסוי. הוא

הדף קרונית שמסתה 0.46kg , וזו נעה על שולחן (ראה

תרשים א').

הקרונית התנגשה בחיישן כוח שהיה מוצמד לקצה השולחן. לאחר ההתנגשות נעה הקרונית בכיוון המנוגד לכיוון תנועתה לפני ההתנגשות. במהלך ההתנגשות של הקרונית בחיישן, מדד החיישן, במרווחי זמן קצרים, את הכוח שהקרונית הפעילה עליו. ערכי הכוח (בניוטון) כפונקציה של הזמן (באלפיות שנייה - ms) הוזנו למחשב, ובעזרת תוכנה מתאימה סורטט גרף המתאר את גודל הכוח כפונקציה של הזמן במהלך ההתנגשות (ראה תרשים ב').

גרף הכוח כתלות בזמן



תרשים ב'

זמן קצר לפני ההתנגשות מדד התלמיד ומצא שהקרונית עברה מרחק של 3.0cm במשך 0.090s, וזמן קצר לאחר תום ההתנגשות, בעת תנועתה בכיוון המנוגד לכיוון התנועה לפני ההתנגשות, מצא התלמיד שהיא עברה מרחק של 3.0cm במשך 0.102s.

א. (1) מצא, על-סמך תרשים ב', את גודל המתקף שהחיישן הפעיל על הקרונית במהלך ההתנגשות.

(2) האם המתקף שהחיישן הפעיל על הקרונית הוא המתקף הכולל שפעל על הקרונית?

ב. תלמיד ב', חברו של תלמיד א', חישב את השינוי בתנע של הקרונית:

$$v_2 = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0.03\text{m}}{0.102\text{s}} \approx 0.294\text{m/s} : \text{מהירות הקרונית לאחר ההתנגשות}$$

$$p_2 = mv_2 = 0.46\text{kg} \cdot 0.294\text{m/s} = 0.135\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} : \text{התנע לאחר ההתנגשות}$$

$$v_2 = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0.03\text{m}}{0.09\text{s}} \approx 0.333\text{m/s} : \text{מהירות הקרונית לפני ההתנגשות}$$

$$p_2 = mv_2 = 0.46\text{kg} \cdot 0.333\text{m/s} = 0.153\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} : \text{התנע לפני ההתנגשות}$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 = 0.153\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} - 0.135\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.018\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}} : \text{לכן השינוי בתנע הוא}$$

תוצאת החישוב של שינוי בתנע שנערכה על-ידי תלמיד ב' היא שגויה.

(1) מהי שגיאתו של תלמיד ב'?

(2) בלי להסתמך על תרשים ב', חשב את השינוי בתנע של הקרונית בעקבות ההתנגשות.

ג. בשאלה נתון כי לפני ההתנגשות, הקרונית עברה מרחק של 3.0cm במשך 0.09s . תאר שיטה ניסויית למדידת משך הזמן שבו קרונית שנעה על שולחן עוברת מרחק נתון.

ד. ציין שני גורמים אפשריים לאי-דיוק בערכים שהתקבלו בניסוי זה (המתקף הכולל והשינוי בתנע של הקרונית).

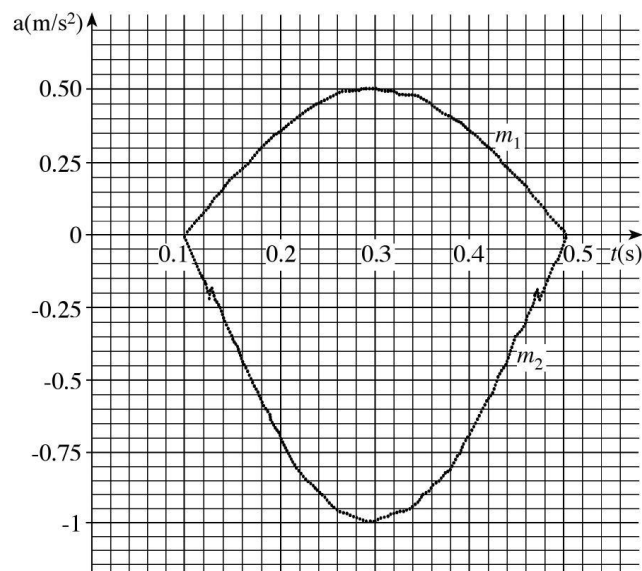
ה. האם בפרק הזמן המתואר בתרשים ב' התאפסה מהירות הקרונית? הסבר.

ו. האם החוק "המתקף הכולל הפועל על גוף שווה לשינוי בתנע של הגוף" היה מתקיים גם אילו חיישן הכוח היה מוצב על קרונית אחרת ולא צמוד לשולחן? הסבר.

ז. לפני ההתנגשות, הקרונית עברה 3.0cm במשך 0.090s , ואילו אחר ההתנגשות היא עברה מרחק זה במשך 0.102s . מדוע משך הזמן אחרי ההתנגשות ארוך מזה שלפני ההתנגשות?

12. שתי קרוניות נעות על מסילה אופקית חלקה זו לקראת זו. מסת הקרונית האחת היא m_1 וזו של הקרונית האחרת היא m_2 ומתקיים: $m_1 = 2m_2$. במהלך ההתנגשות נמדדו תאוצות הקרוניות במרווחי זמן קצרים. בתרשים מתוארת תאוצתה של כל קרונית כפונקציה של הזמן.

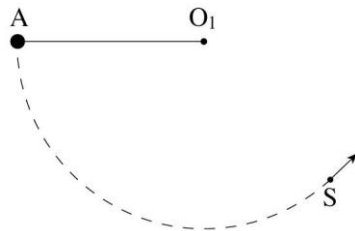
גרף תאוצת הקרוניות כתלות בזמן



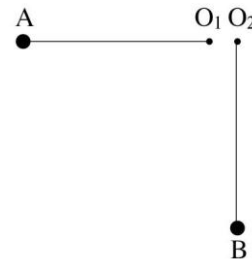
- א. הראה כי החוק השלישי של ניוטון מתקיים במהלך ההתנגשות.
- ב. הראה כי התנע הכולל של שתי הקרוניות נשמר במהלך ההתנגשות.

13. קרונית שמסתה $m=80\text{kg}$ נעה ימינה על מסילה אופקית חלקה במהירות $v_1=3\text{ m/s}$.
- א. מצא את מהירות הקרונית (גודל וכיוון) לאחר שאדם שמסתו $M=60\text{kg}$, שרץ בכיוון הקרונית במהירות $v=8\text{m/s}$, משיג אותה, קופץ עליה ומתיישב בתוכה.
- ב. מה תהיה התשובה לסעיף א', אם אותו אדם ירוץ לקראת הקרונית?
- ג. אותה קרונית עוברת מתחת לזרם של גרעיני חיטה הנשפכים לתוכה במאונך מלמעלה מתוך משפך. האם מהירות הקרונית תקטן, לא תשתנה או תגדל עקב כך? האם הגובה שממנו נשפכים החיטים משפיע על מהירות הקרונית? הסבר.
- ד. זרם החיטים מלמעלה פסק, והקרונית נעה כשהיא מלאה חיטה. לפתע נפער חור בקרקעיתה, והחיטה החלה להישפך מתוכה תוך כדי תנועתה. האם מהירות הקרונית תקטן, לא תשתנה או תגדל עקב כך? הסבר.

14. כדור A שמסתו $M_1=0.1\text{kg}$ מוחזק במנוחה בקצהו של חוט אופקי שאורכו $L=80\text{cm}$, הקשור לנקודה קבועה O_1 . כדור שני B, שמסתו $M_2=0.3\text{kg}$, תלוי במנוחה על חוט אנכי, בעל אותו אורך, הקשור לנקודה קבועה O_2 . משחררים את הכדור A ממנוחה, ותוך כדי תנועתו הוא מתנגש התנגשות מצח אלסטית (לחלוטין) בכדור B (ראה תרשים א').

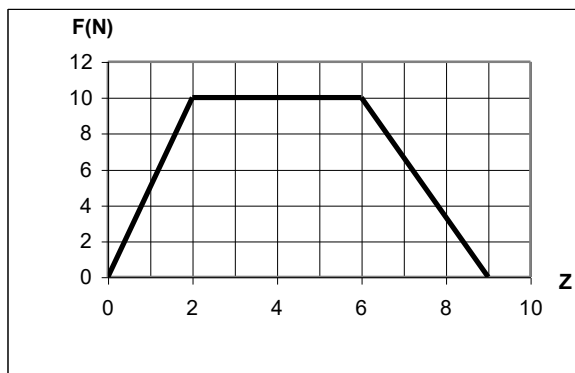


תרשים ב'



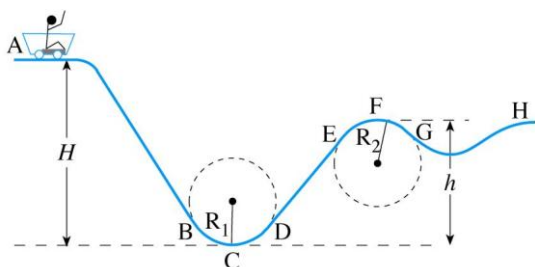
תרשים א'

- הנח כי מסת החבלים זניחה וכי ברגע ההתנגשות, שני החבלים נמצאים במצב אנכי.
- א. מצא את מהירות (גודל וכיוון) הכדור A כהרף עין לפני ההתנגשות.
- ב. מצא את המתיחות בחוט הקשור לכדור A כהרף עין לפני ההתנגשות.
- ג. מצא את הזווית המרבית לאנך, שאליה יגיע החוט הקשור לכדור B לאחר ההתנגשות.
- ד. מסירים את הכדור B ומשחררים שוב את הכדור A ממנוחה במצב אופקי. בהגיע הכדור A לנקודה S, ניתק הכדור מהחוט (ראה תרשים ב'). האם הגובה המרבי שאליו יגיע הכדור לאחר הניתוק יהיה גדול, קטן או שווה לגובה שממנו שוחרר ממנוחה? נמק.



15. הגרף שלפניך מתאר את הכוח השקול הפועל על גוף שמסתו 2 ק"ג. הגוף היה במנוחה עד שהכוח החל לפעול.

- א. אם ציר Z מציין זמן t בשניות, חשב את מהירות הגוף כאשר: $t=2s, 6s, 9s$.
- ב. אם ציר Z מציין מקום x במטר, חשב את מהירות הגוף כאשר: $x=2m, 6m, 9m$.
- ג. הסבר מדוע ציר Z אינו יכול לציין את תאוצת הגוף.



16. בתרשים מתוארת "רכבת הרים" בלונה-פארק. תלמיד נעמד בנקודה A, ליד הקרונית, ושחרר מידו אבן. האבן נפלה חופשית והגיעה לקרקע כעבור 3 שניות. לאחר מכן התלמיד נכנס לקרונית, הציב מאזניים על הכיסא והתיישב עליהם (כך שרגליו לא נגעו ברצפת הקרונית). המאזניים הראו את משקלו mg .

לאחר מכן התלמיד נוסע בקרונית מ-A במהירות התחלתית שווה לאפס. הקרונית נעה על פני המסילה ABCDEFGH, ללא חיכוך וללא מנוע. בנקודה C הראו המאזניים ערך השווה ל- $5mg$. כאשר התלמיד חלף בנקודה F, הוא שוב שחרר אבן (במהירות אפס ביחס לקרונית), וזו פגעה בקרקע 2.7 שניות לאחר שחרורה. הוריית המאזניים ב-F הייתה שווה לאפס.

- א. חשב את הגובה H של הנקודה A מעל הקרקע.
- ב. חשב את מהירות הקרונית בנקודה C.
- ג. קטע המסילה BCD הוא קשת של מעגל שרדיוסו R_1 . חשב את R_1 .

ד. חשב את הגובה h של הנקודה F מעל הקרקע.

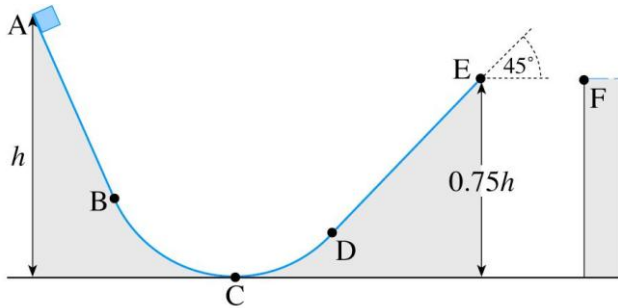
ה. מה הייתה המהירות ההתחלתית (ביחס לקרקע) של האבן ששחררה מ-F? (ציין גודל וכיוון).

ו. קטע המסילה EFG הוא קשת של מעגל שרדיוסו R_2 . חשב את R_2 .

17. מסילה חסרת חיכוך נמצאת במישור אנכי. נתונים לגבי המסילה: הנקודה A נמצאת בגובה

h מעל הנקודה C; קטע המסילה BCD הוא קשת מעגלית שרדיוסה $R=0.5h$; בקטע EF

המסילה קטועה; הנקודות E ו-F נמצאות בגובה $0.75h$ מעל הנקודה C; קטע המסילה



שמתחת לנקודה E הוא ישר, שיוצר זווית 45° עם הכיוון האופקי.

מהנקודה A, משחררים ממצב מנוחה גוף שמסתו m .

בטא באמצעות נתוני השאלה (h ו- m)

את תשובותיך לשאלות הבאות:

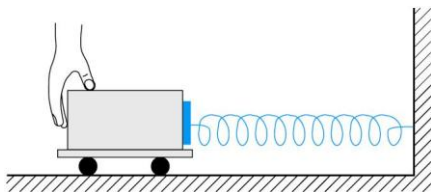
א. חשב את הכוח שבו הגוף מעיק על המסילה בנקודה C.

ב. חשב את תאוצת הגוף בקטע הישר של המסילה הנמצא לפני הנקודה E.

ג. עד כמה ניתן להגדיל את המרחק בין E ל-F ועדיין הגוף יפגע בקטע המסילה שמימין ל-F?

18. קפיץ שקבוע הכוח שלו k , קשור בקצהו האחד לנקודה קבועה, ולקצהו השני קשורה לוחית

שמסתה m . דוחפים את הלוחית כך שהקפיץ מתכווץ בשיעור A, מניחים לפניה קרונית



שמסתה m (ראה תרשים) ומשחררים את המערכת (ממנוחה). המשטח חסר חיכוך.

בטא את תשובותיך לשאלות הבאות באמצעות k , A ו- m .

א. באיזו נקודה ניתקת הקרונית מן הלוחית?

ב. כמה זמן לאחר השחרור מתרחש הניתוק?

ג. כמה זמן לאחר הניתוק נעצרת הלוחית לראשונה?

ד. באיזה מרחק מנקודת הניתוק נעצרת הלוחית לראשונה?

ה. מהו המרחק בין הלוחית לבין הקרונית כאשר הלוחית נעצרת לראשונה לאחר שחרורה?

מודל הגז האידיאלי

19. בתוך מכל שנפחו 1m^3 כלוא גז בטמפרטורה 30°C ובלחץ 10^4N/m^2 . הנח כי הגז מתנהג כגז אידיאלי.
- ציין שלוש הנחות של המודל הקינטי של גז אידיאלי.
 - (1) הטמפרטורה היא מדד לגודל מיקרוסקופי מסוים. מהו גודל זה?
(2) הסבר מדוע לא ניתן ליחס לריק (וואקום) טמפרטורה.
 - חשב את האנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולות הגז שבמכל.
 - חשב את מספר מולקולות הגז שבמכל.
20. בתוך מכל שנפחו 0.75m^3 כלוא גז בטמפרטורה של 60°C ובלחץ 10^4N/m^2 . הנח כי הגז מתנהג כגז אידיאלי.
- מה מקור הלחץ שהגז מפעיל על דפנות המכל?
 - חשב את האנרגיה התרמית (האנרגיה הקינטית הכוללת) של מולקולות הגז שבמכל.
 - הגז שבמכל מורכב משני סוגי מולקולות: מסת כל מולקולה מהסוג הראשון הוא m_1 ומסת כל מולקולה מהסוג השני הוא m_2 , ומתקיים: $m_2 > m_1$.
 - האם מהירותה הממוצעת של מולקולה מהסוג הראשון גדולה מהמהירות הממוצעת של מולקולה מהסוג השני, קטנה ממנה או שווה לה? נמק.
21. מכל מבוך בצורת קובייה שאורך צלעה 30cm ממולא בגז אידיאלי חד-אטומי בטמפרטורה של 80°C ובלחץ 10^5N/m^2 .
- חשב כמה מולקולות גז יש במכל.
 - חשב את האנרגיה התרמית (האנרגיה הקינטית הכוללת) של מולקולות הגז שבמכל.
 - במכל יש גוף חימום המוסיף לגז כמות חום של 2000J . חשב את הטמפרטורה הסופית של הגז לאחר החימום.
 - נתון מכל זה, אך סגור בקצהו העליון באמצעות בוכנה ניידת שעליה מופעל לחץ חיצוני של 10^5N/m^2 . ברגע מסוים מפעילים את גוף החימום, שמוסיף לגז 2000J . האם הטמפרטורה הסופית של הגז במכל זה תהיה שווה לזו של המכל הראשון, גדולה או קטנה ממנה? נמק.

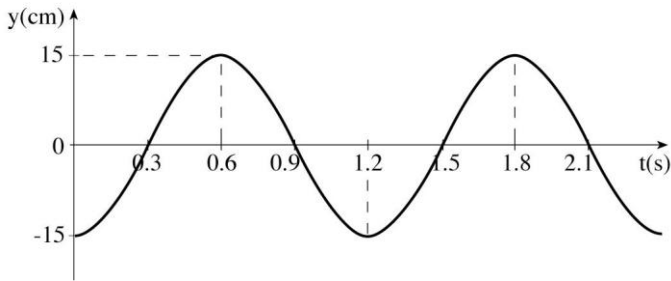
22. גז ארגון, המתנהג כגז אידיאלי, כלוא בתיבה מתכתית בטמפרטורה של 27°C . שטח פאה A הוא 50cm^2 ושטח פאה B הוא 100cm^2 . הגז מפעיל כוח של $5 \cdot 10^4 \text{ N}$ על הפאה B.
- א. האם הכוח הפועל על הפאה A זהה לכוח הפועל על הפאה B, גדול או קטן ממנו? הסבר.
- ב. חשב את הלחץ של הגז הכלוא בכלי.
- ג. חשב את האנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולות הגז.
- ד. מניחים את הכלי על משטח חימום המעלה את טמפרטורת הגז. האם חל שינוי בלחץ או בנפח של הגז? הסבר.
- ה. כאשר טמפרטורת גז הארגון בכלי היא 57°C והלחץ $5.5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$, מעבירים את כל הגז למכל חדש שנפחו גדול פי 2, המכיל גז ניאון באותה טמפרטורה, אך בלחץ קטן פי 2. מצא את הלחץ הסופי של תערובת הגזים, בהנחה כי התערובת מתנהגת גם היא כגז אידיאלי.
23. בתוך מכל שצורתו קובייה שאורך צלעה ℓ נמצאות N מולקולות הנעות כולן באותה מהירות v , וכולן נעות הלך ושוב בין שתי דפנות מקבילות – דופן ימינית ודופן שמאלית. המסה הכוללת של כל מולקולה היא m . המולקולות פוגעות בכל אחת משתי הדפנות בכיוון מאונך לה. הנח כי המולקולות ממלאות את התנאים של גז אידיאלי. ציר המקום x מכוון מהדופן הימינית לעבר הדופן השמאלית.
- א. ציין עובדה ניסויית המעידה שהתנגשויות של מולקולות גז עם דופן מכל שבו הגז כלוא הן אלסטיות.
- ב. בטא באמצעות נתוני השאלה את השינוי בתנע (ביחס לציר x שהוגדר לעיל) של מולקולה יחידה כתוצאה מהתנגשות בדופן הימינית.
- ג. התבסס על החוק השני של ניוטון בניסוח: "הכוח השקול החיצוני הפועל על גוף שווה לקצב שינוי התנע של הגוף", ובטא באמצעות נתוני השאלה את הכוח הממוצע שמפעילה כל דופן על מולקולות גז יחידה במהלך מחזור אחד של תנועת המולקולה. (המחזור כולל את ההתנגשות ואת התנועה הלך ושוב מדופן אל דופן.)
- ד. בטא באמצעות נתוני השאלה את הכוח הממוצע שמפעילה מולקולה יחידה על הדופן הימינית במהלך מחזור אחד של תנועת המולקולה.

ה. הוכח כי הלחץ שמפעילות N מולקולות על הדופן הימינית של מכל שנפחו V , נתונה על-

$$p = \frac{Nmv^2}{V} \quad \text{ידי הקשר:}$$

תנועה הרמונית פשוטה

24. משקולת, שמסתה $M=0.8\text{kg}$, תלויה על קפיץ אנכי שמסתו זניחה. תלמיד משך את המשקולת כלפי מטה מרחק A , ושחרר אותה (ממנוחה). חיישן המחובר למחשב מדד את מקום המשקולת בזמנים שונים, ועל צג המחשב התקבל הגרף המתואר בתרשים. מקום המשקולת, y , נמדד ביחס לציר אנכי שראשיתו בנקודת שיווי-המשקל, וכיוונו החיובי כלפי מעלה.



גרף ההעתק כתלות בזמן

א. מצא את A .

ב. מצא את זמן המחזור של התנודות ואת תדירותן.

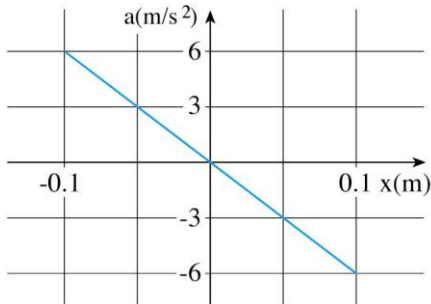
ג. חשב את קבוע הכוח של הקפיץ.

ד. מתי בפרק הזמן $0.1\text{s} < t < 1.4\text{s}$ מתאפסת מהירות המשקולת? הסבר.

ה. מתי בפרק הזמן $0.1\text{s} < t < 1.4\text{s}$ מתאפסת תאוצת המשקולת? הסבר.

ו. מהו הכיוון (כלפי מעלה או כלפי מטה) של הכוח

השקול הפועל על המשקולת ברגע $t=1\text{s}$? הסבר.



גרף התאוצה כתלות בהעתק

25. גוף שמסתו m היא 0.2 ק"ג מתנווד סביב נקודה

ששיעורה 0 . הגרף מתאר את תאוצת הגוף

כפונקציה של שיעור הנקודה x שבה הגוף נמצא.

ברגע $t=0\text{s}$, הגוף נמצא במנוחה בנקודה ששיעורה

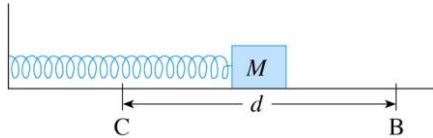
0.1 מטר.

א. מדוע תנועת הגוף היא הרמונית פשוטה?

ב. מהו הכוח הפועל על הגוף בנקודה ששיעורה (-0.1) מטר?

- ג. כמה זמן חולף מתחילת התנועה עד שהגוף מגיע לראשונה לנקודה ששיעורה 0?
 ד. מהי מהירות הגוף בנקודה ששיעורה 0?

26. בול עץ שמסתו M קשור לקצה קפיץ אופקי בעל קבוע k ומתנווד בתנועה הרמונית, שמשרעתה $d/2$, על פני שולחן אופקי חלק בין הנקודות B ו-C. בטא את התשובות לשאלות



שלפניך באמצעות M, k ו- d .

א. כתוב ביטויים עבור:

(1) זמן מחזור התנוודות.

(2) האנרגיה המכנית הכוללת האגורה במערכת המתנוודת.

ברגע שהבול עובר את נקודת שיווי המשקל נופל עליו מגובה קטן מאוד גוש פלסטלינה שמסתו m ונדבק לגוף המתנווד.

ב. ענה על סעיף א', במצב בו הפגיעה מתרחשת כאשר הגוף המתנווד נמצא בנקודה C.

ג. ענה על סעיף א', במצב בו הפגיעה מתרחשת כאשר הגוף המתנווד נמצא בדיוק באמצע הדרך בין B ל-C.

כבידה

27. א. בטבלה שלפניך רשומים נתונים על ארבעה ירחים של כוכב הלכת צדק. הנח שהירחים נעים במסלולים מעגליים.

ירח	מסה (10^{22} kg)	רדיוס מסלול ממוצע (10^3 km)	זמן מחזור (ימים)
איו (Io)	8.9	422	1.77
אירופה (Europa)	4.8	671	3.55
גנימד (Ganymede)	1.5	1070	7.16
קליסטו (Callisto)	1.1	1883	16.69

הראה כי ארבעה ירחים אלה מקיימים את החוק השלישי של קפלר. (שים לב: אין צורך לשנות יחידות).

ב. רוצים להכניס לוויין למסלול מעגלי סביב כוכב הלכת צדק, ושרדיוס מסלולו יהיה 10^5 km. חשב מה יהיה זמן המחזור של תנועת לוויין זה.

ג. בטא את המסה M של כוכב הלכת צדק באמצעות זמן מחזור T ורדיוס מסלול r של אחד מירחיו. (אין צורך להציב מספרים.)

ד. לוויין נע במסלול מעגלי שרדיוסו 10^5 km סביב כוכב לכת שונה מצדק. האם זמן המחזור שלו יהיה שווה לזמן המחזור שחישבת בסעיף ב? הסבר.

28. חללית מתקרבת לכוכב לכת שרדיוסו $R = 10^7 \text{ m}$. אסטרונוט הנמצא בתוך החללית מכניס

את החללית לתנועה מעגלית סביב הכוכב בגובה $H = 10^7 \text{ m}$ מעל פני הכוכב. לאחר מכן הוא מכבה את מנועי החללית ומוצא כי זמן מחזור-התנועה שלה סביב כוכב הלכת הוא 140 דקות. הנח כי צפיפות הכוכב אחידה.

א. חשב את מסת הכוכב.

ב. חשב את תאוצת הנפילה החופשית על פני הכוכב.

במהלך תנועת החללית במסלול המעגלי סביב הכוכב, האסטרונוט מחזיק בידו כדור, וברגע מסוים הוא מרפה ממנו.

ג. איזו מהאפשרויות הבאות מתארת את תנועת הכדור ביחס לחללית? נמק.

(1) הכדור ינוע כלפי דופן החללית הקרובה לכוכב.

(2) ירחף באוויר.

(3) ינוע כלפי דופן החללית הרחוקה מן הכוכב.

(4) יבצע תנועה אחרת.

ד. האסטרונוט נחת על כוכב הלכת וזרק כדור כלפי מעלה במהירות של 30 m/s . תוך כמה זמן הכדור ינחת לידו?

29. לוויין שמסתו 500 ק"ג מקיף את כדור הארץ במסלול מעגלי בגובה 25 ק"מ מעל הארץ.

האטמוספירה הדלילה מפעילה על הלוויין כוח חיכוך קבוע שגודלו 0.005 ניוטון. לאחר הקפה אחת, מצא:

א. מה השינוי שחל בגובהו של הלוויין מעל הארץ?

ב. מה השינוי שחל במהירותו?

מכניקה - הרחבה והעמקה

שעות	הנושא
2	1. קינמטיקה
2	2. דינמיקה
4	3. התנע ושימורו
4	4. אנרגיה מכנית ושימורה
4	5. תנועה הרמונית פשוטה
16	סה"כ

טבלת הנושאים ופירוטם

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2	- ניסוי: חקירת מהירות גוף הנע בתווך צמיג, כפונקציה של הזמן, בעזרת סרט וידאו.	$F = 6\pi\eta r v$	- תנועת חלקיק בתווך צמיג: <ul style="list-style-type: none"> • מרחק ומהירות כתלות בזמן. • הכוחות שמפעיל תווך על גוף הנע בו. • המהירות המרבית. 	1. קינמטיקה
2			- מערכות מכניות מורכבות: <ul style="list-style-type: none"> • תאוצה במערכות שני גופים או יותר, כאשר לכל גוף תאוצה השונה בגודלה (לדוגמה: מערכת עם גלגלת נחה וגלגלת ניידת). • מערכת המורכבת מגוף המונח על גוף, כאשר הגוף התחתון מונח על משטח. 	2. דינמיקה
4		$\Sigma F_{\text{ext}} = Ma_{\text{c.m.}}$	- המושג "מרכז המסה". <ul style="list-style-type: none"> - תנועת מרכז המסה בהתנגשות דו-ממדית. - דוגמאות לחישוב תנע של גופים לא נקודתיים. מרכז המסה כמערכת ייחוס. 	3. התנע ושימורו
4		$\Sigma F \cdot \Delta x_{\text{c.m.}} = \Delta E_{\text{k,c.m.}}$	- משוואת מרכז המסה; המושג "עבודה מדומה". <ul style="list-style-type: none"> - הבעייתיות בחישוב העבודה הנעשית על גוף שאינו נקודתי, והבעייתיות בהכלת משפט עבודה-אנרגיה עבור גוף שאינו נקודתי. 	3. אנרגיה מכנית ושימורה
4	- ניסוי ממוחשב: דגימת המקום של תנועה הרמונית מרוסנת כפונקציה של הזמן. <ul style="list-style-type: none"> - גיליון אלקטרוני: פתרון משוואה דיפרנציאלית באופן נומרי. 		- תנודות מרוסנות: <ul style="list-style-type: none"> • כוחות שזורים (נוזל או גז) מפעיל על גוף הנע בו. • ריסון תת-קריטי וריסון על-קריטי. • יישומים של ריסון. - תנודות מאולצות. 	4. תנועה הרמונית פשוטה

מכניקה - הערות דידקטיות לנושאי הרחבה והעמקה

1. קינמטיקה (2 שעות)

תנועת חלקיק בתווך צמיג

א. בהוראת סעיף זה, עבור מהירויות נמוכות, יש להשתמש בחוק סטוקס - $F = 6\pi\eta rv$, שבו ייעשה שימוש במושג צמיגות - η שהתלמידים אינם מכירים.

ב. מומלץ להסביר באופן עקרוני בליווי דוגמאות מהי צמיגות של נוזל וכיצד היא משפיעה על המהירות הסופית, ולהימנע מהגדרת הצמיגות כחס בין מאמץ הגזירה המופעל על הנוזל לשינוי מעוות הגזירה.

ג. כדי להגיע לנוסחת המהירות הגבולית $v_t = \frac{2r^2g}{9\eta}(\rho - \rho')$ יש להזכיר לתלמידים את המושג צפיפות ρ .

ד. כדאי להזכיר דוגמאות מספר הקשורות לנושא, כמו שימוש בחוק זה למציאת רדיוס טיפות השמן בניסוי מיליקן (למציאת מטען האלקטרון), או העובדה שעבור מהירויות גבוהות, גרר האוויר $\frac{1}{2}CA\rho v^2$ תלוי במקדם הגרר C של המשטח A (חזית המכונית או כנף המטוס), ובשונה מכדור, מוצאים אותו בניסוי.

ה. מומלץ להשתמש בפתרון נומרי בעזרת גיליון אלקטרוני.

2. דינמיקה (2 שעות)

מערכות מכניות מורכבות

א. חשוב להדגיש כי במערכות שבהן לגופים תאוצה שונה, יחס התאוצות נקבע על-ידי הגאומטריה של המערכת. לכן, כדי לחשב את יחס התאוצות, יש תחילה לברר את מבנה המערכת על-ידי מציאת יחס ההעתקים של הגופים.

ב. עיקר הקושי בבעיות שבהן גוף מונח על גוף הוא הטיפול בכוח החיכוך. חשוב לציין כי כוח החיכוך הפועל על גוף יכול לפעול בכיוון התאוצה של הגוף.

3. התנע ושימורו

תנע ותנועת מרכז מסה (4 שעות)

- א. מומלץ להתחיל את פיתוח הנושא "מרכז המסה" בניתוח מרכז המסה של שני גופים המתנגשים התנגשות לא מצחית, ולהשוות את התוצאות לתוצאות המתקבלות בניתוח המוכר לתלמידים כתנע דו-ממדי.
- ב. שימוש בהדמיית מחשב יסייע רבות בהדגמת המושגים ובמעקב אחר התהליכים המתרחשים במצבים שבהם חל שימור התנע או כאשר פועלים כוחות חיצוניים.
- ג. כדאי להדגיש כי החוק השני של ניוטון תקף לגבי גופים נקודתיים. אולם רוב היישומים נעשים לגבי גופים שאינם נקודתיים, כגון מכוניות וספרים. הנוסחה $\Sigma F_{\text{ext}} = Ma_{\text{c.m.}}$ המפותחת במסגרת "מערכות רב-גופיות", מצדיקה בדיעבד שימוש "לא כשר" שנעשה בעבר בחוק השני של ניוטון. יש להדגיש את הנוחות של מערכת מרכז המסה כמערכת ייחוס.

4. אנרגיה מכנית ושימורה (4 שעות)

משוואת מרכז המסה; המושג "עבודה מדומה"

- א. כדאי להדגיש כי החוק השני של ניוטון תקף לגבי גופים נקודתיים. אולם היישומים נעשים רובם לגבי גופים שאינם נקודתיים, כגון מכוניות וספרים. הנוסחה $\Sigma F_{\text{ext}} = Ma_{\text{c.m.}}$ המפותחת במסגרת "מערכות רב-גופיות" מצדיקה בדיעבד הכללת החוק השני של ניוטון לגופים לא נקודתיים.
- ב. כדי לדון בגופים שאינם נקודתיים, אין להכיל את "משפט עבודה-אנרגיה" מגוף נקודתי לגוף שאינו נקודתי באופן אוטומטי, אלא יש לחזור על הפיתוח לגבי גוף שאינו נקודתי. המשוואה המתקבלת:

$$\sum (F_x \cdot \Delta x_{\text{c.m.}}) = \frac{mv_{\text{f,c.m.}}^2}{2} - \frac{mv_{\text{i,c.m.}}^2}{2}$$

לגבי נוסחה זו יש לציין:

- (1) היא מהווה תמיד קשר נומרי נכון.
- (2) אגף שמאל שווה לעבודה רק אם העתק מרכז המסה של הגוף שווה להעתקי נקודות האחיזה של הכוחות. במקרים אלה, המשוואה מבטאת שימור.

(3) אם העתק נקודת האחיזה של אחד הכוחות שונה מהעתק מרכז המסה של הגוף, אגף שמאל אינו מבטא עבודה (הוא מכונה "עבודה מדומה"), והמשוואה בכללותה אינה מבטאת שימור, אם כי היא מהווה קשר נומרי נכון.

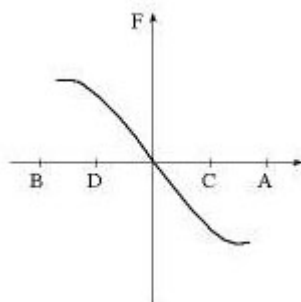
ג. מומלץ לנתח מספר דוגמאות פשוטות מנקודת ראות של משוואת מרכז המסה ומנקודת ראות של שימור אנרגיה, למשל: אדם קופץ, נער על גלגיליות דוחף קיר.

5. תנועה הרמונית פשוטה (4 שעות)

תנודות הרמוניות מרוסנות

א. כאשר גוף מבצע תנודות - הכוח המחזיר הפועל עליו אינו נמצא בהכרח ביחס ישר להעתק הגוף מנקודת שיווי-המשקל.

ב. אולם במקרים רבים, ככל שמשרעת התנודות קטנה, הקשר בין הכוח להעתק מבטא יחס ישר בקירוב טוב יותר. כך, למשל, חלק העקומה שבין C ל-D בתרשים סוטה מיחס ישר במידה פחותה מאשר חלק העקומה בתחום מ-A ל-B.



ג. לא כל תנודה ניתנת לייצוג כהרמונית בקירוב, גם כאשר משרעת התנודות קטנה. אפשר להיווכח בכך כאשר מפתחים את הביטוי המתמטי המתאר כוח מחזיר כלשהו (לא הרמוני) לטור טיילור סביב נקודת שיווי-המשקל (אין צורך להציג פיתוח זה בפני תלמידים):

$$F(x) = F(0) + F'(0)x + \frac{1}{2!}F''(0)x^2 + \frac{1}{3!}F'''(0)x^3 + \dots$$

$F(0) = 0$ (כי 0 היא נקודת שיווי משקל), לכן:

$$F(x) = F'(0)x + \frac{1}{2!}F''(0)x^2 + \frac{1}{3!}F'''(0)x^3 + \dots$$

ייתכנו שני מקרים :

1. $F'(0) \neq 0$ - במקרה זה אפשר להזניח איברים מסדרים יותר גבוהים, ומתקיים :

$$F(x) \approx F'(0)x, \text{ כאשר } F'(0) \text{ שלילי, ולכן התנועה היא הרמונית בקירוב.}$$

2. $F'(0) = 0$ - במקרה זה לא ניתן לתאר את התנודות כהרמוניות, גם כאשר המשרעת קטנה.

תנודות מאולצות

כדי לעקוף את הקשיים המתמטיים, מומלץ להציג סעיף זה באמצעות הדמיות מחשב.

אלקטרוֹמגנטיות

הקדמה לאלקטרוֹמגנטיות

על מטרות הוראת האלקטרוֹמגנטיות ועל קשיים בהשגתן

- א. אלקטרוֹמגנטיות היא אחד משלושת נושאי החובה בתכנית הלימודים. פרט למרכזיותה בפיזיקה הקלאסית ולתרומתה העצומה לכל תחומי הטכנולוגיה המודרנית, ראוי לציין את מעמדה המיוחד כחוליה מקשרת בין פרקי המכניקה הניוטונית לבין פרקי הנושא "קרינה וחומר" שיילמדו בהמשך. הפרק המסיים את לימודי המכניקה - "כבידה" - הציג בפני התלמידים את אחד הכוחות היסודיים בטבע והצביע, גם אם במרומז, על האפשרויות והיתרונות של שימוש במושג "השדה המשמר" לטיפול בכוח הכבידה, כמו גם בהוראת השדה החשמלי ב"אלקטרוֹמגנטיות" ובהוראת "אנרגיית הקשר" ב"קרינה וחומר".
- ב. בלימודי האלקטרוֹמגנטיות יכירו התלמידים כוח יסודי נוסף - הכוח החשמלי - האחראי למבנה החומר ולמרבית תכונותיו. חשוב להדגיש ששני כוחות יסודיים אלה - כבידה וכוח חשמלי - הם ארוכי טווח, ושהחוקים המבטאים את תלותם במרחק, דומים. (כלומר, עצמת כוח הכבידה בין חלקיקי מסה נקודתיים ועצמת הכוח החשמלי הפועל בין חלקיקים נקודתיים טעונים - נמצאים ביחס הפוך לריבוע המרחק בין החלקיקים).
- ג. סדר ההוראה המוצג בתכנית זו פותח בהוראת פרקי האלקטרוֹסטטיקה ולאחריהם הפרקים העוסקים במעגלי זרם ישר. קיימת אפשרות להוראה בסדר אחר: מנושאי הזרם הישר, הקלים יותר להבנה, אל האלקטרוֹסטטיקה הקשה יותר. יתרון נוסף של הגישה האחרונה הוא בהטמעת מושגים הקשורים לעולמם של התלמידים כמו: מתח, זרם, התנגדות ואנרגיה חשמלית, לפני מושגים מופשטים יותר כמו שדה ופוטנציאל.
- ד. נושאים פיזיקליים רבים הכלולים בפרקי הקרינה והחומר מבוססים על עובדות, על תאוריות ועל חוקים שנלמדים בפרקי האלקטרוֹמגנטיות. הדוגמאות רבות: בחקר האור מתבססים על משוואות מקסוול המצביעות על כך שהאור הוא גל אלקטרוֹמגנטי; העיסוק במבנה החומר, מתבסס על תכונותיו החשמליות. למעשה, הפעלת רוב השפופרות המדגימות אינטראקציה של אור עם חומר, מתבססת על חוקי האלקטרוֹמגנטיות.

על קשיים בהוראת האלקטרומגנטיות ועל דרכי הוראה מומלצות לטיפול

בקשיים האלה

למידה והוראה בנושאי חשמל, מגנטיות והשראה אלקטרומגנטית נחקרו באופן מעמיק גם בארץ וגם בעולם. להלן סקירה קצרה של הממצאים המרכזיים המתייחסת לקשיים של תלמידים ולדרכי טיפול שהוכחו כיעילות.

מושגים מופשטים

לימוד פרקי האלקטרומגנטיות כרוך בקליטה והפנמה של ידע פיזיקלי רב ומגוון, שחלקו אינו אינטואיטיבי ואינו שייך לעולם המושגים המוכר לתלמידים. המושגים "שדה", "שטף", "פוטנציאל", מושגים מרכזיים באלקטרומגנטיות, הם דוגמאות טובות לכך. על מנת לסייע לתלמידים בהבנת מושגים מופשטים, מומלץ להרבות בפעילויות מסוגים שונים שבהן שכחים המושגים האלה. יש להרבות בניסויים פשוטים, אך בעלי משמעות פיזיקלית רבה. ניסויים, הדגמות, הדמיות או אפילו איורים מוצלחים, יצרו במוחו של התלמיד מבני ידע עשירים שביב המושגים המופשטים.

קשיים מתמטיים

לימודי האלקטרומגנטיות מצריכים שימוש ביכלים מתמטיים כבדים. חשוב לזכור שאינטגרל לאורך קו $(\int \vec{E} \cdot d\vec{r})$ ואינטגרל על פני משטח $(\int \vec{E} \cdot d\vec{A})$ נראים מאיימים וקשים יותר מאשר הם בפועל. למעשה, כל מה שנדרש הוא להבין את משמעותם של סמלים אלה (כלומר שמדובר בביצוע פעולת סכימה מתאימה). במקרים הנדונים בתכנית הלימודים, "פעולות האינטגרציה" הן טריוויאליות לחלוטין ואינן מצריכות מיומנות טכנית בחשבון האינטגרלי. כנגד זאת, הבנת משמעותם של הסמלים חשובה ביותר, למשל כדי להגדיר בעזרת האינטגרל הקווי מושגים כמו "שדה חשמלי משמר" $(\int \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0)$, או "כא"מ במעגל סגור" $(\int \vec{E} \cdot d\vec{r} = \varepsilon)$, או כדי להגדיר שטף מגנטי בעזרת האינטגרל על פני משטח $(\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A})$. הרישום האינטגרלי חשוב בעיקר כדי לבטא, כגולת הכותרת של לימודי האלקטרומגנטיות, את משוואות מקסוול בריק בצורתן האינטגרלית.

מעגלי זרם

מחקרים מראים כי אף שתלמידים רוכשים מיומנות טובה למדי בטיפול באלגוריתמים מסובכים, כגון שימוש בחוקי קירכהוף, הם אינם מסוגלים לנתח איכותית מעגלים חשמליים פשוטים.

לדוגמה :

- א. תלמידים מנתחים מעגלים חשמליים באופן 'לוקאלי'. הם אינם מביאים בחשבון ששינוי במקום מסוים במעגל החשמלי גורם לשינויים במערכת כולה.
- ב. מושג הזרם נתפש כמושג המרכזי והראשוני במעגלים חשמליים. לפיכך, אצל חלקם מושרשת התפיסה כי הפרש הפוטנציאלים הוא התוצאה של זרימת הזרם. אם לא זורם זרם דרך נגד מסוים, תלמידים יטענו שהפרש הפוטנציאלים בין קצותיו שווה לאפס. בקטגוריה זו, כלולה גם הדעה הרווחת שהסוללה היא מקור לזרם קבוע.

מבין ההמלצות הרבות להוראה טובה יותר של מושגים הקשורים למעגלי זרם, נציין את הבאות :

- א. בשונה מגישה רווחת שלפיה מושג הזרם מוצג כמושג ראשוני, מומלץ להציג את המתח (הפרש הפוטנציאלים) כמושג ראשוני שממנו נובע הזרם.
- ב. כדאי להמעיט בתרגילים כמותיים מורכבים שאינם משפרים את ההבנה ולהרבות בתרגילים איכותיים. השינויים המרכזיים בסילבוס החדש באלקטרומוגנטיות, תואמים המלצה זו (כגון, חוקי קירכהוף רק ל-2 נקודות צומת).
- ג. כדאי לבקש מהתלמידים ניתוח של מערכות דינמיות, כגון השינויים החלים במעגל כאשר לנגד קיים מוסיפים נגד אחר במקביל.

זרמים חולפים (טרנזיאנטים) במעגלים חשמליים (סגירה ופתיחה של מעגל, טעינה ופריקה של קבל)

מחקרים מזהים חוליה חסרה בין האלקטרוסטטיקה לבין מעגלי זרם. תלמידים אינם מקשרים בין מושגים באלקטרוסטטיקה כמו "שדה" ו"פוטנציאל" לבין מושגים במעגלי זרם כמו "זרם", "מתח" ו"התנגדות". חסרונו של הקשר הזה אינו מאפשר הבנה של מנגנון הזרימה בזרם קבוע או הבנה של טרנזיאנטים במעגלים פתוחים. התלמידים בונים לעצמם הסברים חלופיים כמו: הזרם זורם בגלל ה'ינטייה להשוות ריכוזים'.

במעבר בין הוראת האלקטרוסטטיקה להוראת הזרם (או בין הוראת הזרם לאלקטרוסטטיקה) מומלץ:

- א. לשים דגש על טרנזיאנטים במעגלים חשמליים. ניתן להדגים זאת על-ידי הכנסת קבלים גדולים, המאפשרים מעקב אחרי השינויים ללא צורך במכשירי מדידה ממוחשבים.
- ב. לנתח באופן איכותי את המנגנון המסביר את זרימת הזרם. אין כאן המלצה לעיסוק נרחב במודל של פיזור מטעני השפה. ניתן להסביר את המנגנון האחראי לזרימת הזרם במעגל פשוט, באופן

איכותי, כך שיתקבל על דעתם של התלמידים. מומלץ להראות ניסוי הממחיש את קיומו של השדה החשמלי האלקטרוסטטי מחוץ ובתוך המוליכים נושאי הזרם. בהקשר הזה, חשוב להשתמש במושגים "שדה", "פוטנציאל" ו"מטענים" הלקוחים מהאלקטרוסטטיקה.

תמונת עולם של האלקטרומגנטיות

מחקרים לבדיקת רמת הידע וההבנה בנושאי אלקטרומגנטיות מראים שלתלמידים רבים אין בתום הלימוד תמונה קוהרנטית ונכונה של החומר. למרות שיש להם יכולת טכנית מסוימת בפתרון בעיות מספריות, הם חסרים לעתים קרובות הבנה מניחה את הדעת של היסודות הפיזיקליים שעליהם מבוסס הפתרון. כמו כן, תלמידים מתקשים לראות את הקשרים בין העקרונות הפיזיקליים לבין הניסוי, ההדמיה, ההדגמה או הבעיה.

נמצא שחסרונה של תמונה קוהרנטית מוביל בהכרח גם לקשיים בהבנה של המושגים והיסודות הפיזיקליים של האלקטרומגנטיות.

מספר דוגמאות לקשיים ולתפיסות שגויות בהבנת המושג "שדה" ולהשלכות על מושגים אחרים:

א. השדה האלקטרוסטטי נתפס כישות סטטית. תלמידים רבים מתעלמים מהשינויים החלים בשדה האלקטרוסטטי בעת הכנסת מטען נוסף לשדה קיים.

ב. תלמידים נוטים בטעות להתייחס לפוטנציאל בנקודה כמו לשדה באותה נקודה: אם ערכו של השדה הוא אפס, גם ערך הפוטנציאל יהיה אפס באותה נקודה, ולהפך.

יש לעזור לתלמידים בבניית תמונת עולם פיזיקלית ובשיפור ההבנה, וזאת באמצעות פעילויות המכוונות ליצירת הקשרים החסרים או הלקויים. בכך יסייעו הדגמות רבות של ניסויים פשוטים בעלי משמעות פיזיקלית, המפתחים גם יכולת ניתוח וחשיבה איכותית; וכן, בסיומו של כל פרק, שיעורי חזרה מובנים, המשלבים תרגילי קישור בין הניסוי והתאוריה, בין הבעיה והעקרונות הפיזיקליים הדרושים לפתרון וכדומה.

חלוקה לפרקים ושעות מומלצות

שעות מומלצות	שם הפרק	מס' הפרק
15	חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי	1
14	פוטנציאל חשמלי, קיבול וקבלים	2
25	מעגלי זרם ישר	3
19	השדה המגנטי	4
17	השראה אלקטרומגנטית	5
90	סה"כ	

פרק 1: חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי

שעות	הנושא
4	1.1 תופעות חשמליות
4	1.2 חוק קולון
6	1.3 השדה האלקטרוסטטי, המושג "שדה" בפיזיקה
1	1.4 חוק גאוס, הקשר בין חוק גאוס לחוק קולון
15	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה: כוחות דחייה ומשיכה בין לוחיות פלסטיק משופשות. - הדגמה: מוליכות חשמלית של חומרים, למשל: מעבר מטענים בין אלקטרוסקופים. - הדגמה: מבנה אלקטרוסקופ, השראה אלקטרוסטטית, טעינה באמצעות שפשוף וטעינה באמצעות השראה. - הדגמה: הדלקת נורת ניאון בקרבת מחולל אלקטרוסטטי. 		<ul style="list-style-type: none"> - שני סוגי מטען חשמלי והכוחות הפועלים ביניהם. - מוליכים ומבודדים - מבוא על המבנה החשמלי של חומרים. - השראה אלקטרוסטטית. - המושג "שיווי-משקל אלקטרוסטטי": הימצאות המטען העודף של המוליך על פני המוליך והצטופותו באזורי חודים. - תנועת מטענים במעבר בין מצבים של שיווי-משקל אלקטרוסטטי - "זרמים חשמליים חולפים". - שימור המטען החשמלי. 	1.1 תופעות חשמליות (הצגה איכותית בלבד)
4	<ul style="list-style-type: none"> - ניתוח סרט וידאו או הדמיה של חוק קולון. - הדגמה: טעינה ע"י הפרדה של מטענים. 	$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	<ul style="list-style-type: none"> - "חוק קולון" - חוק הכוח בין מטענים חשמליים נקודתיים. - המושג "מטען חשמלי נקודתי". - קולון - יחידת המטען החשמלי. - קיום מטען יסודי (אלמנטרי). - השוואה בין כוחות חשמליים וכוחות כבידה. - "עקרון הסופרפוזיציה" של כוחות חשמליים. 	1.2 חוק קולון

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
6	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה של מיפוי של שדות חשמליים בעזרת כדור בוחן או הדמיה של מיפוי של שדות חשמליים. - הדגמה: קווי שדה ומיפוי של שדות חשמליים עם "מצפנים חשמליים". 	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ $\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$	<ul style="list-style-type: none"> - שדות בתחומים שונים של הפיזיקה. - השדה החשמלי (האלקטרוסטטי) הנוצר ע"י מטען נקודתי - הגדרה ויחידות. - עקרון הסופרפוזיציה והשימוש בו לחישוב שדות חשמליים. - תיאור שדות חשמליים בעזרת קווי שדה. 	1.3 השדה האלקטרוסטטי, המושג "שדה" בפיזיקה
1	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה: סיכוך חשמלי ו"דלי פארדי". 	$\phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$ $\phi_E = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$ <p>(דרך משטח סגור)</p> $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$	<ul style="list-style-type: none"> - המושג "שטף חשמלי". - חוק גאוס והקשר עם חוק קולון. - חישוב של שדות חשמליים בעזרת חוק גאוס במקרים פשוטים: <ul style="list-style-type: none"> • סביב מטען נקודתי. • בתוך ומחוץ לקליפה טעונה. - השדה החשמלי האחיד בין לוחות קבל (ללא הוכחה). 	1.4 חוק גאוס, הקשר בין חוק גאוס לחוק קולון

חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

1.1 תופעות חשמליות (4 שעות)

מבוא

- א. רצוי להתחיל את לימודי האלקטרוסטטיקה בהקדמה איכותית מקיפה העוסקת בנושא "תופעות חשמליות". ההקדמה תתבסס בעיקר על הדגמות וניסויים ועל מודלים פשוטים המסבירים אותם.
- ב. בשלב זה עדיין אין להשתמש בנוסחאות. הבנת התופעות והסקת המסקנות תתבסס על התפיסה האינטואיטיבית, שלפיה הכוח החשמלי בין שני מטענים נקודתיים קטן כשהמרחק ביניהם גדל.

שני סוגי מטען חשמלי והכוחות ביניהם

- א. ניסויים (או הדגמות) של כוחות דחייה ומשיכה בין לוחיות משופשפות מצביעים על קיומם של שני סוגי מטען חשמלי.
- ב. הכוח האלקטרוסטטי מקורו בתכונה הקרויה "מטען חשמלי". זאת, בדומה לכוח הכבידה המוכר מלימודי המכניקה, שמקורו בתכונה הקרויה "מסה כבידתית".
- ג. השמות שניתנו לשני סוגי המטען החשמלי הם שרירותיים (כלומר, היה אפשר לתת להם גם שמות אחרים). בשלב מאוחר יותר של הלימוד, כדאי להצביע על הנוחות בקביעה שרירותית זו, המתבטאת בחוק שימור המטען החשמלי ובניטרליות של רוב החומרים.
- ד. חשוב להציג את קיומו של כוח משיכה בין גוף ניטרלי לגוף טעון ולהסביר כוח זה באמצעות המבנה החלקיקי של החומר.

מוליכים ומבודדים - מבוא על המבנה החשמלי של חומרים

- א. רצוי להזכיר לתלמידים שבאטומים מצויים פרוטונים (בגרעין) ואלקטרונים הנעים סביבם. יש לציין שמטען האלקטרון שווה (בערכו המוחלט) למטען הפרוטון, ומכיוון שבאטום מצויים מספרים שווים של פרוטונים ואלקטרונים - האטום ניטרלי מבחינה חשמלית. מטענו של גוף טעון הוא כפולות שלמות של מטען האלקטרון ("המטען היסודי"). דיון מקיף ומעמיק יותר במבנה האטום והחומר יתקיים בעת לימוד הנושא "קרינה וחומר".
- ב. נושא המוליכות החשמלית יידון בפרק זה באופן איכותי, רצוי בליווי הדגמות. המסרים המרכזיים יהיו אלה:

- במבדדים, כמעט כל האלקטרוניים קשורים היטב לאטומים ולמולקולות ואינם יכולים לנוע בחופשיות.
- במתכות, אלקטרון אחד או אלקטרוניים אחדים בכל אטום הם 'אלקטרוניים חופשיים'. אלקטרוניים אלה אינם קשורים עוד לאטום מסוים, אלא שייכים למתכת כולה. לפיכך ניתן להתייחס למתכות כאל חומרים המורכבים מיונים חיוביים, הקבועים פחות או יותר במקומם, ומאלקטרוניים הנעים בחופשיות בין היונים בכל חלקי המתכת.
- בתמיסות אלקטרוליטיות (מוליכות), נושאי המטען הם יונים.
- הערה: קיימים גם חומרים הנקראים מוליכים למחצה, והם בעלי תכונות ביניים - בין התכונות של מוליכים (מתכות) לתכונות של מבדדים. הולכה ובידוד אינן תכונות מנוגדות, אלא רמות שונות של אותה תכונה. בתכנית לימודי האלקטרומגנטיות, אין מעמיקים יותר בתכונותיהם ובשימושיהם של המוליכים למחצה באלקטרוניקה ובטכנולוגיה המודרנית.

השראה אלקטרוסטטית

השראה אלקטרוסטטית היא הפרדת מטענים (קטוב) הנוצרת בגוף כתוצאה מנוכחותו של גוף טעון בקרבתו. עקב כך פועלים כוחות משיכה בין הגוף הטעון לגוף הלא-טעון (בגלל תלות הכוח האלקטרוסטטי במרחק שבין המטענים). הודות לניידותם הרבה של האלקטרוניים החופשיים, תופעת ההשראה האלקטרוסטטית חזקה בהרבה במוליכים מתכתיים מאשר במבדדים. אחת השיטות לטעינת גופים מוליכים היא באמצעות השראה אלקטרוסטטית.

מוליך טעון בשיווי-משקל אלקטרוסטטי

- א. המטענים העודפים במוליך טעון נמצאים על פני המוליך. מצב של **שיווי-משקל אלקטרוסטטי**, הוא מצב שבו אין תנועה של מטענים במוליך, כלומר שקול הכוחות החשמליים הפועלים על המטענים החופשיים מתאפס.
- ב. בשלב זה ראוי לציין כי אם במוליך קיים זרם חשמלי, לא קיים שיווי-משקל אלקטרוסטטי, דהיינו שקול הכוחות החשמליים הפועלים על נושאי המטען החופשי בתוכו אינו מתאפס.
- ג. כשנוצר קשר מוליך בין מערכת מוליכים טעונה לבין כדור הארץ ("האדמה"), יש תנועת מטענים ביניהם עד להתאפסות פוטנציאל המערכת - הארקה.
- ד. השלמת ההסבר האיכותי לתופעת ההארקה תובא בפרקים הבאים, כאשר יידונו המושגים "פוטנציאל", "קיבול" וכן השתוות הפוטנציאלים של מוליכים שמחוברים ביניהם בקשר מוליך. בשלב זה של הלימוד, ניתן להסתפק בהסבר חלקי: המטענים החופשיים 'שואפים' להתרחק זה מזה ככל האפשר בגלל כוחות הדחייה הפועלים ביניהם.

קיום זרמים חולפים באלקטרוסטטיקה

באלקטרוסטטיקה אין עוסקים רק במערכות של מטענים הנמצאים במנוחה מתמדת. מעברים בין מצבים שונים של שיווי-משקל אלקטרוסטטי מלווים בתנועות של מטענים המהוות "זרמים חשמליים חולפים" (טרנזיאנטים). חשוב מאוד להתייחס לזרמים אלה, ובמידת האפשר אף להדגים. תהיה בכך תרומה משמעותית להקטנת הנתק בין הפרקים "אלקטרוסטטיקה" ו"זרם חשמלי".

שימור המטען החשמלי

- א. יודגש כי בטבע קיים "חוק שימור המטען החשמלי". בתהליכים של טעינת גופים לא נוצרים מטענים 'יש מאין'. בדרך כלל מדובר בהפרדת מטענים בלבד. התהליך של הפרדת מטענים כרוך בעבודה, לכן דרוש מקור אנרגיה כדי לבצעו. קיימים ניסויים פשוטים רבים המדגימים את חוק שימור המטען החשמלי. חשוב ביותר לבצעם, ובמידת האפשר לתת לתלמידים לבצעם.
- ב. למדידה ישירה של כמות מטען, מותר להשתמש במכשירים המאפשרים ביצוע מדידה כזו (קולונמטרים) גם בלי שמבינים את אופן פעולתם. בשלב זה, מכשירים אלה מהווים 'קופסאות שחורות'. מאוחר יותר, כשיכירו התלמידים את המושגים "מתח" ו"קיבול חשמלי", יסברו להם העקרונות הפיזיקליים שעליהם מבוססת פעולתם של מכשירים אלה.

1.2 חוק קולון (4 שעות)

מבוא

באלקטרוסטטיקה, כאשר עוברים מניסויים איכותיים לניסויים כמותיים, נוצרת בדרך כלל בעיה של דליפת מטענים מגופים טעונים בגלל לחות גבוהה באוויר. ניתן להקטין בעיה זו על-ידי ביצוע הדגמות (במקום ניסוי תלמידים) בחדר מעבדה ממוזג. הסיכוי להצלחת ההדגמות גדל אם הן נערכות בראשית השיעור (כלומר זמן קצר בלבד אחרי שהתלמידים נכנסו לחדר המעבדה). יש יתרון לביצוע או להדגמה טובה של ניסויים בסיסיים כמו "חוק קולון". אולם אם תנאי המעבדה אינם מאפשרים זאת, ניתן להדגים את הניסויים באמצעים אחרים, כגון הדמיות או סרטי וידאו.

חוק קולון, המושג "מטען נקודתי", יחידת המטען החשמלי, קיום מטען יסודי (אלמנטרי)

- א. יודגש כי חוק קולון הוא 'חוק הכוח' הפועל בין מטענים נקודתיים, בדומה לחוק הכבידה של ניוטון שהוא 'חוק הכוח' הפועל בין מסות נקודתיות. חשוב לציין כי בשני החוקים, הכוח משתנה ביחס הפוך לריבוע המרחק.

- ב. המטענים ה'נקודתיים', או המסות ה'נקודתיות', אינם בהכרח זעירים ביותר. מושג הנקודתיות הוא אידאליזציה, והכוונה היא לגופים או לחלקיקים שממדיהם קטנים מאוד ביחס למרחק המפריד ביניהם. אם מטענים אינם נקודתיים, אך התפלגותם במרחב אחידה וכדורית, אפשר להתייחס אליהם כאל מטענים נקודתיים המצויים במרכזי הכדורים.
- ג. בניסוי "חוק קולון", יש להסביר שניתן לקבוע את גודל הכוח כתלות בכמויות המטען (q_1 ו- q_2) גם אם לא מכירים עדיין שיטה למדידה ישירה של כמויות מטען. עושים זאת בעזרת רעיון החלוקה השווה של מטענים - מטעמי סימטרייה - בין כדורים מוליכים בעלי רדיוסים שווים. יחידת כמות המטען - הקולון - תוגדר באמצעות חוק קולון (הכוח הפועל בין שני מטענים שגודלם קולון אחד והנמצאים במרחק מטר אחד הוא $1/4\pi\epsilon_0$). מאוחר יותר, לאחר שהתלמידים יכירו את הגדרת האמפר, ניתן להגדיר את יחידת המטען באמצעות האמפר.
- ד. מכיוון שהקולון הוא יחידה 'ענקית', יש לאזכר את היחידות הנגזרות מיקרוקולון ($10^{-6} = \mu C$) וננוקולון ($10^{-9} = nC$) ולהשתמש בהן.
- ה. קיומו של מטען חשמלי יסודי יצוין בשלב זה **כעובדה**, וכן יצוין שכל מטען חשמלי הוא כפולה שלמה של המטען היסודי.

השוואה בין כוחות חשמליים וכוחות כבידה

חשוב לציין את הדמיון והשוני בין חוק קולון לחוק הכבידה ולהדגיש את ההבדל העצום בעצמה שבין הכוחות החשמליים לכוחות הכבידה. כמו כן, כוחות הכבידה הם כוחות משיכה בלבד, בעוד שהכוחות החשמליים הם כוחות משיכה ודחייה.

עקרון הסופרפוזיציה של כוחות חשמליים

על סמך ניסויים למדים כי עקרון הסופרפוזיציה קיים לגבי כוחות חשמליים, כשם שהוא קיים לגבי כוחות אחרים. משמעותו: הכוח בין שני מטענים נקודתיים אינו מושפע מנוכחותו של מטען נוסף.

1.3 השדה האלקטרוסטטי, המושג "שדה" בפיזיקה (6 שעות)

מבוא

א. המושג "שדה", שהוא רב-חשיבות בפיזיקה, הוא מושג מופשט, ורוב התלמידים מתקשים להבינו. עם זאת, קרוב לוודאי שהתלמידים כבר עסקו בו במסגרת לימודי המכניקה בפרק "כבידה" ועל המורה לנצל זאת לעריכת אנלוגיה בין השדה האלקטרוסטטי לשדה הגרביטציוני.

ב. ללימוד מעמיק יחסית של הנושא "שדה" בפיזיקה, דרוש ידע מסוים בחשבון הדיפרנציאלי והאינטגרלי. ההנחה היא שבשלב שבו עוסקים בנושא זה, אין לתלמידים הידע הנדרש. לפיכך אין צורך לדון בשלב זה במושג "הקפה של שדה" או חישוב שטף באמצעות אינטגרציה. לפיתוח נוסחאות, ניתן להיעזר בהדמיות או בפעילויות בגיליון אלקטרוני. על פי רמת התלמידים והיקף הזמן העומד לרשותו, יחליט המורה אם להשתמש במתמטיקה מסובכת, ובאיזו מידה.

המושג "שדה" בפיזיקה

א. כדי להקל על התלמידים את הבנת המושג "שדה" בפיזיקה, רצוי להזכיר את קיומם של שדות בתחומים שונים של הפיזיקה. דוגמאות לכך הן שדה הכבידה, שדה הקרינה של מקור אור נקודתי או זרימה של נוזל שניתן לתארה על-ידי שדה וקטורי - שדה המהירויות של הנוזל.
ב. כדאי לציין שמושגים שונים המשמשים לתיאור שדות וקטוריים, לקוחים מתיאור זרימה של נוזלים (המושג "שטף", למשל).

השדה החשמלי (האלקטרוסטטי) - הגדרה ויחידות

א. במבוא כדאי לציין שבנושא הפעולה ההדדית של מטענים חשמליים הנמצאים במנוחה, תיאור פעולת הכוחות ממרחק ופעולה באמצעות שדה חשמלי 'מתוך' הם אקוויוולנטיים.
ב. שדות חשמליים הנקראים "אלקטרוסטטיים", הם שדות הנוצרים על-ידי מטענים הנמצאים במנוחה.
ג. כאשר מצבם ההדדי של מטענים משתנה עם הזמן, דרוש זמן כדי להעביר 'הודעה' על השינוי. תופעה זו מעניקה לשדה משמעות פיזיקלית: השדה נושא תנע ואנרגיה.
ד. להגדרת השדה החשמלי, חשוב שמטען חשמלי הבא לבדוק ולמדוד את השדה יהיה קטן במידה כזו שהכנסתו לתוך השדה לא תשפיע על השדה ולא תשנה אותו במידה משמעותית. (מטען כזה נקרא "מטען בוחן").
ה. השדה החשמלי הוא **שדה וקטורי**, זאת אומרת שבכל נקודה במרחב יש לשדה החשמלי גודל (הנקרא "עצמת השדה") וכיוון. מאחר שתלמידים נוטים להתבלבל בין כיוון הכוח לכיוון השדה, רצוי להביא מגוון דוגמאות שבהן מציגים כיווני שדה או כוח הפועלים על מטענים בעלי סימנים שונים, ויש למצוא את הגודל החסר.

עקרון הסופרפוזיציה והשימוש בו לחישוב שדות חשמליים

א. עקרון הסופרפוזיציה של שדות חשמליים נובע מהעיקרון המוכר בדבר סופרפוזיציה של כוחות. רצוי להדגישו על-ידי ניסויים מתאימים בעזרת כדור הבוחן, המשמש מד-E.

- ב. על-ידי שימוש בכל הידוע על שדה חשמלי של מטען נקודתי ובעקרון הסופרפוזיציה, אפשר לחשב שדות חשמליים הנוצרים על-ידי מספר מטענים נקודתיים הקבועים במקומם.
- ג. כבר בשלב זה כדאי לציין כעובדה, שפרט לשדות החשמליים הקבועים בזמן, הנוצרים על-ידי מטענים חשמליים הנמצאים במנוחה (שדות "אלקטרוסטטיים"), קיימים גם שדות חשמליים הנוצרים בתהליך אחר (שדה מגנטי המשתנה עם הזמן). בשדות מסוג זה נעסוק בשלב מאוחר יותר של הלימוד.

תיאור שדות חשמליים בעזרת קווי שדה

יש לציין בפני התלמידים שקיימות אפשרויות שונות לייצוג ולתיאור של שדות וקטוריים, בכלל, ושל השדה החשמלי, בפרט. קיים מגוון של תוכנות מחשב והדמיות שבאמצעותן ניתן להדגים ייצוגים שונים של השדה החשמלי.

(1) תרשים חצים: לכל נקודה במרחב שיש בה שדה חשמלי, אפשר להתאים חץ שגודלו פרופורציוני לעצמת השדה וכיוונו השדה בנקודה. אלא שהמרחב מלא נקודות, והתאמת חץ לכל נקודה היא אפוא משימה בלתי אפשרית; מסתפקים בציור של חצים אחדים בלבד, המייצגים את כל השאר. כל חץ יצויר לפי קנה מידה אחיד, מתכונתי לעצמת השדה בנקודת מוצאו.

(2) תרשים קווי שדה: קווי שדה הם קווים דמיוניים, שכיוונם בכל נקודה (כלומר כיוון המשיק להם באותה נקודה) הוא ככיוון השדה החשמלי בנקודה. קווי השדה הם קווים רציפים וחלקים, היוצאים ממטענים חיוביים והמסתיימים במטענים שליליים או באין-סוף. קווי השדה אמנם מתארים את כיוונו של השדה, אך לא את עצמתו. ניתן להעריך את עצמת השדה לפי צפיפות קווי השדה.

עם זאת, חייבים כמובן להביא בחשבון מגבלה רצינית של שני התיאורים החזותיים הללו: הם דו-ממדיים, בעוד שהמרחב הוא תלת-ממדי. יש להדגיש שקווי השדה הם 'יצירת אדם', לנוחות הייצוג; אין ישות פיזיקלית כזאת במציאות.

1.4 חוק גאוס, הקשר בין חוק גאוס לחוק קולון (1 שעה)

המושג "שטף חשמלי", חוק גאוס

- א. ניתן להיעזר בהדמיה ולהראות כי מספר קווי השדה החוצים משטח סגור הוא פרופורציוני לכמות המטען שבתוך המשטח. את המושג "מספר קווי השדה החוצים" יש לקשור למושג "השטף החשמלי" ולהשתמש במושגים אלו ל'הוכחה' איכותית של חוק גאוס. הוכחה מפורטת יותר ניתן ללמד במסגרת הרחבה והעמקה. לחלופין, ניתן לנצל הדגמה של דלי פארדיי כדי לאשר את העובדה שהשדה החשמלי בתוך מוליך במצב סטטי, מתאפס, והמטען העודף מצטבר על פניו כפי שנובע מחוק גאוס.
- ב. רצוי להצביע על כך שהמושג "שטף חשמלי" שאול מתורת הנוזלים, אף שבאלקטרוסטטיקה אין מייחסים לווקטור E משמעות של 'משהו זורם'.
- ג. חשוב מאוד להדגיש שההוכחה של חוק גאוס מבוססת על כך שהשדה של מטען נקודתי נמצא ביחס הפוך ל- r^2 (כלומר, היא מבוססת על חוק קולון). לפיכך, חוק גאוס וחוק קולון אקויוולנטיים במובנים מסוימים.
- ד. כדאי להצביע על כך שבגלל התלות ב- r^2 , חוק גאוס תקף גם לגבי כוחות הכבידה.

חישוב של שדות חשמליים בעזרת חוק גאוס

- א. בכיתות טובות, מומלץ להראות כמה דוגמאות פשוטות של חישובי שדות חשמליים בעזרת חוק גאוס, כגון: השדה החשמלי סביב מטען נקודתי והשדה בתוך ומחוץ לקליפה כדורית טעונה. דוגמאות אלו עשויות לעזור לתלמידים להבין את הנושא, אך עם זאת לא מומלץ לגלוש לחישובים מסובכים.
- ב. מומלץ להסביר כי העובדה שהמטען החשמלי העודף במוליך טעון נמצא על פני המוליך, נובעת מהיותו בשיווי-משקל אלקטרוסטטי ומחוק גאוס (השדה החשמלי בתוך המוליך מתאפס).
- אין חובה להראות שהשדה החשמלי המאונך לפני המוליך שווה ל- $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$, כאשר σ היא צפיפות השטח של המטען על פני המוליך (באזור קטן סביב הנקודה שבה נמדד השדה), אף על פי שעובדה זו מסייעת להבהרת המושג "אפקט החודים".

פרק 2: פוטנציאל חשמלי, קיבול וקבלים

שעות	הנושא
8	2.1 פוטנציאל והפרש פוטנציאלים
6	2.2 קיבול וקבלים
14	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
8	<ul style="list-style-type: none"> - ניסוי או הדמיה : מדידת הפרש פוטנציאלים בקרבת כדור מוליך טעון. - ניסוי : מיפוי שדה חשמלי בעזרת משטחים שווי-פוטנציאל באמבט אלקטרוליטי או בנייר מוליך. - הדמיות מחשב להמחשת שדות ופוטנציאלים שונים. - ניסוי : הטיה חשמלית של אלומת אלקטרונים בשפופרת טלטרון. - הדגמה : האוסילוסקופ כמד-מתח. 	$V_{A,B} = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$ $V = \frac{W}{q}$ $V = \sum \left(\frac{kq}{r} \right)$ $E = -\frac{\Delta V}{\Delta r}$	<ul style="list-style-type: none"> - המושגים "כוח משמר", "שדה משמר". - השדה האלקטרוסטטי כשדה משמר. - "אנרגיה פוטנציאלית" ו"הפרש פוטנציאלים" בשדה האלקטרוסטטי. - "וולט" - יחידת הפוטנציאל. - הפוטנציאל של מטען נקודתי ושל מערך מטענים נקודתיים. - חישוב הפרש פוטנציאלים. - פוטנציאל של כדור מוליך טעון. - "הארקה". - חיבור שני מוליכים טעונים. - משטחים שווי-פוטנציאל וקווי שדה. - הקשר בין הפרש פוטנציאלים ושדה חשמלי. - האצה של מטענים על-ידי שדות חשמליים. - הטיה של אלומת אלקטרונים בשדה חשמלי אחיד. - יישומים : "תותח אלקטרונים", אוסילוסקופ. - היחידה "אלקטרון-וולט" (eV). 	2.1 פוטנציאל והפרש פוטנציאלים
6	<ul style="list-style-type: none"> - ניסוי : מדידות קיבול של קבלים. - ניסוי או הדמיה : תלות הקיבול של קבל-לוחות בפרמטרים. 	$C = \frac{q}{V}$ $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$ $U = \frac{1}{2} qV$	<ul style="list-style-type: none"> - המושג "קיבול חשמלי". - "פרד" - יחידת הקיבול החשמלי. - המושג "קבל". - הקיבול של קבל-לוחות - תלות הקיבול בפרמטרים. - הקבוע הדיאלקטרי, הסבר איכותי לתכונות של דיאלקטרן. - חיבור קבלים במקביל ובטור. - האנרגיה של מוליך טעון. - דיון וטיפול איכותי בטעינה ופריקה של קבל. - שימושים של קבלים. 	2.2 קיבול וקבלים

פוטנציאל חשמלי, קיבול וקבלים: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

מבוא

המושגים "כוח משמר", "אנרגיה פוטנציאלית" ו"משפט עבודה-אנרגיה" ידועים לתלמידים מלימודי המכניקה. ניתן היה להניח שהדיון בכוח משמר נוסף (הכוח האלקטרוסטטי) יוכל לשמש חזרה פורייה, עם הרחבה והעמקה, על נושא מוכר. למעשה, מחקרים בהוראת הפיזיקה מראים שאנרגיה פוטנציאלית חשמלית, הקשר שלה לנקודת ייחוס והפרש פוטנציאלים – כל אלה הם מושגים מופשטים וקשים להבנה. אנו ממליצים בפרק זה להרבות ולגוון באמצעים דידקטיים כדי לקרב את המושגים הקשים לעולמם של התלמידים.

2.1 פוטנציאל והפרש פוטנציאלים (8 שעות)

א. התלמידים מתקשים בהבנתו וביישומו של המעבר מכוח משמר ואנרגיה פוטנציאלית לשדה משמר ופוטנציאל.

ב. חייבים להדגיש שכשם שאין משמעות לאנרגיה פוטנציאלית בנקודה בשדה האלקטרוסטטי ללא הגדרת רמת ייחוס, גם אין משמעות לפוטנציאל חשמלי בנקודה בשדה האלקטרוסטטי ללא רמת ייחוס. בדרך כלל, נוח ומקובל לקבוע את ה"אין-סוף" כרמת הייחוס שבה הפוטנציאל החשמלי מתאפס. חשוב ביותר שתלמידים יבינו כי שינוי במקומה של רמת הייחוס, משנה את ערכו של הפוטנציאל החשמלי בכל נקודה בשדה אלקטרוסטטי, אך לא את ערכו של הפרש הפוטנציאלים בין כל שתי נקודות בשדה.

ג. הפרש הפוטנציאלים $V_{A,B} = V_B - V_A$ בין שתי נקודות A ו-B בשדה אלקטרוסטטי מוגדר כמינוס העבודה ליחידת מטען שעובד השדה האלקטרוסטטי בהעבירו מטען חיובי מהנקודה A

$$\text{לנקודה B. בכתוב מתמטי: } V_{A,B} = V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

מקובל להשתמש גם בהגדרה האקוויולנטית: הפרש הפוטנציאלים $V_B - V_A$ בין שתי נקודות A ו-B בשדה אלקטרוסטטי הוא העבודה ליחידת מטען שכוח חיצוני עובד נגד השדה, כאשר הוא מעביר מטען חיובי מנקודה A לנקודה B ללא שינוי בגודל המהירות.

ד. חשוב לציין שהמטען המועבר מ-A ל-B צריך להיות קטן עד כדי כך שלא ישנה את השדה האלקטרוסטטי שבו הוא נע.

ה. כדאי להדגיש שהפוטנציאל החשמלי הוא גודל סקלרי, בניגוד לשדה החשמלי שהוא גודל וקטורי. הפוטנציאל בנקודה A הנמצאת במרחקים r_1, r_2, \dots, r_n מ- n מטענים נקודתיים q_1, q_2, \dots, q_n ,

$$V_A = k \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

הוא הסכום האלגברי של הפוטנציאלים הנוצרים על-ידי כל מטען בנפרד:

ו. מומלץ לתרגל עם התלמידים מצבים שבהם נחוץ לחשב גם פוטנציאל וגם שדה באותה נקודה, למשל - חישוב השדה והפוטנציאל במרכז ריבוע שבקדקודיו מטענים זהים. כדאי להביא דוגמאות למצבים שבהם השדה מתאפס והפוטנציאל לא מתאפס, ולהפך.

ז. המסרים המרכזיים בנושא משטחים שווי-פוטנציאל ובנושא הקשר שבין הפרש הפוטנציאלים והשדה החשמלי הם אלה:

1. משטחים שווי-פוטנציאל הם משטחים שבהם הפוטנציאל שווה בכל הנקודות: $V = \text{Const}$. בהקשר למשטחים שווי-פוטנציאל, כדאי להזכיר קווי גובה במפה טופוגרפית.

2. בהעברת מטען על פני משטח שווה-פוטנציאל מנקודה אחת לשנייה, לא נעשית עבודה.

3. מוליך טעון בשיווי-משקל אלקטרוסטטי הוא גוף שווה-פוטנציאל.

4. קווי השדה מאונכים למשטחים שווי-הפוטנציאל.

5. חשוב מאוד לדון בקשר שבין הפרש הפוטנציאל ושדה חשמלי. כדאי להצביע על כך שבשדה חשמלי אחיד מתקיים: $\Delta V = -E \Delta x$.

ח. במסגרת הפוטנציאל של מוליך טעון, אין צורך לדון אלא במקרה של כדור מוליך או של קליפה כדורית.

ט. כאן המקום להסביר באופן איכותי כי "הארקה" היא פריקת מטענו החשמלי של גוף טעון על-ידי חיבורו לכדור הארץ, עד שהגוף מפסיק להיות טעון חשמלית.

י. דיון במעבר מטען חשמלי בין שני גופים מוליכים בעלי קיבול או פוטנציאל שונה, יסייע לתלמידים להבנת הקשר שבין הפרשי פוטנציאלים והזרם החשמלי.

יא. כשדנים בהאצת חלקיקים טעונים בשדות חשמליים, יש להזכיר את המאיץ האלקטרוסטטי "ואן דה גראף".

יב. האוסילוסקופ הוא אחד היישומים החשובים ביותר של האצת אלקטרונים על-ידי "תותח אלקטרונים" והטייתם על-ידי שדות חשמליים אחידים בין לוחות קבל. פרט לכך שהאוסילוסקופ משמש מכשיר הדגמה מעולה בידי המורה, רצוי שמכשיר זה יופעל גם על-ידי התלמידים, שיווכחו לדעת שזהו מד-מתח רגיש ורב-שימושי.

יג. כבר בשלב זה של הלימוד, רצוי להצביע על מרכזיותה של יחידת האנרגיה אלקטרון-וולט בפיזיקה אטומית וגרעינית. חשוב שתלמידים ידעו שאנרגיות הקשר של אלקטרונים לאטומים הם בסדר גודל של אלקטרון-וולטים אחדים. כדאי לציין שאנרגיות הקשר של החלקיקים בגרעיני האטומים (פרוטונים וניוטרונים) הם בסדר גודל של MeV.

2.2 קיבול וקבלים (6 שעות)

- א. אף שדיון ראשון בקיבול חשמלי ובקבלים מתקיים כאן בפרקי האלקטרוסטטיקה, חשיבותם העיקרית של אלה מתגלה דווקא בפרקים מאוחרים יותר העוסקים בזרם חשמלי - זרם ישר וזרם חלופין.
- ב. יש לפתח את הנוסחאות לקיבול של קבל-לוחות בלבד.
- ג. אין צורך בהתייחסות לקבל הבנוי משתי קליפות כדוריות מוליכות.
- ד. יש להדגיש שהקיבול של קבל אינו תלוי במטען שלו ובמתח בין מרכיביו. הוא תלוי אך ורק בגאומטריה של רכיבי הקבל ובחומר המפריד בין המוליכים הטעונים, הנקרא דיאלקטרן או חומר דיאלקטרי.
- ה. בנושא קבל-לוחות, יש ללוות את הדיון התאורטי בניסויים מתאימים המדגימים את תלות הקיבול בפרמטרים השונים.
- ו. בנושא חומרים דיאלקטריים יש להסתפק בהסברים איכותיים, המסתמכים על היבטים מיקרוסקופיים של מבנה החומר. ניסוי עם קבל-לוחות יעזור לתלמידים בהבנת המושג "קבוע דיאלקטרי יחסי" וכמו כן בהבנת תפקידו של הדיאלקטרן.
- ז. להפרדת מטענים בין שני מוליכים המהווים קבל, דרושה עבודה (נגד כוח המשיכה הפועל בין המטענים המופרדים), ולכן נאגרת בקבל אנרגיה חשמלית (אלקטרוסטטית).
- ח. תלמידים נוטים לראות את מטענו של הקבל כשווה לאפס. יש להדגיש כי מדובר בערך המוחלט של המטען באחד הלוחות.
- ט. בנושא האנרגיה האגורה בקבל טעון, יש לפתח את הנוסחה וגם רצוי לבצע ניסוי מתאים.
- י. על חיבור קבלים בטור ובמקביל יש להתעכב בקצרה בלבד. התלמידים אינם מתבקשים לנתח מעגלים המכילים יותר משני קבלים בחיבור טורי או מקבילי.
- יא. בפרק זה יש לדון בתהליכי הטעינה והפריקה של קבל באופן איכותי בלבד. התיאור המתמטי והחישובים הכמותיים יידונו אחרי היכרות כמותית עם המושג "זרם חשמלי".

פרק 3: מעגלי זרם ישר

שעות	הנושא
2	3.1 הזרם החשמלי ועצמת הזרם החשמלי
2	3.2 המתח החשמלי, חוק אום
2	3.3 התנגדות
3	3.4 כא"מ ומתח הדקים
4	3.5 טיפול כמותי בטעינה ופריקה של קבל
3	3.6 הספק ואנרגיה במעגל חשמלי, נצילות
8	3.7 מעגלים חשמליים
1	3.8 מכשירי מדידה
25	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2		$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ $I = nqAv *$	<ul style="list-style-type: none"> - הגדרת הזרם החשמלי ועצמתו. - תופעות לוואי של הזרם החשמלי. - הזרם הרגעי כשיפוע גרף מטען-זמן. - המטען כשטח שמתחת לגרף זרם-זמן. - יחידת עצמת הזרם והקשר בין עצמת הזרם החשמלי למהירות הסחיפה של האלקטרונים. 	3.1 הזרם החשמלי ועצמת הזרם החשמלי
2	- ניסוי: אופייני נגד ונורת להט.	$V = RI$	<ul style="list-style-type: none"> - הגדרת המתח החשמלי. - חוק אום. 	3.2 המתח החשמלי וחוק אום
2	<ul style="list-style-type: none"> - ניסוי או הדמיה: תלות ההתנגדות בפרמטרים. - ניסויים בעזרת נייר מוליך. - ניסוי: גילוי תוכנה של קופסה סגורה (שני הדקים). 	$R = \rho \frac{l}{A}$	<ul style="list-style-type: none"> - תלות ההתנגדות בפרמטרים שונים. - נגד משתנה, חיבור כראוסטט וכפוטנציומטר. 	3.3 התנגדות
3	- תלות מתח ההדקים בזרם.	$\varepsilon = V + rI$	<ul style="list-style-type: none"> - מקור מתח. - הגדרת כא"מ ומתח הדקים. - התנגדות פנימית. - הקשר בין כא"מ ומתח הדקים. 	3.4 כא"מ ומתח הדקים
4	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמת טעינה ופריקה של קבל גדול דרך נורה. - ניסוי טעינה ופריקה של קבל. 	$I = I_0 e^{-t/RC}$	<ul style="list-style-type: none"> - הגדרת RC. - גרפי המתח והזרם כתלות בזמן בפריקה וטעינה. - השטח מתחת גרף הזרם כתלות בזמן. 	3.5 טיפול כמותי בטעינה ופריקה של קבל

* הנוסחה אינה נכללת בחומר החובה.

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
3	- ניסוי או הדגמה : אנרגיה בקבל טעון (פריקת קבל דרך נגד הנמצא בקלורימטר).	$P = VI$ $W = VIt$ $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$	- אנרגיה חשמלית והספק חשמלי. - יחידות אנרגיה והספק, ה- kWh. - נצילות של תהליך המרת אנרגיה. - הפסדי אנרגיה חשמלית.	3.6 הספק ואנרגיה במעגל חשמלי, נצילות
8	- ניסוי : גילוי תוכנה של קופסה סגורה (ארבעה הדקים).	$R = \sum_{i=1}^n R_i$ $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$ $\sum I = 0$ $\sum \varepsilon = \sum RI$	- חיבור נגדים. - חיבור מקורות. - חוקי קירכהוף (רק עבור מעגלים עם 2 צמתים).	3.7 מעגלים חשמליים
1	- הדגמה : הצגה של גלונומטר.		- מד-זרם ומד-מתח אידאליים. - השפעת מכשירים לא אידאליים על המעגל.	3.8 מכשירי מדידה

מעגלי זרם ישר: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

בפרק זה יש להדגיש יותר את הצדדים הפיזיקליים ופחות את התרגול הטכני.

3.1 הזרם חשמלי ועצמת הזרם החשמלי (2 שעות)

א. "זרם חשמלי" הוא מושג המתאר מטענים חשמליים בתנועה מכוונת. בכל מקרה שבו מטען חשמלי עבר מגוף אחד לגוף אחר, אנו אומרים כי זָרָם חָרַם חשמלי.

ב. על מנת להסביר את תופעת הזרם החשמלי במוליך, יש להשתמש במושגים שהוצגו לתלמידים באלקטרוסטטיקה. השדה החשמלי בתוך מוליך, מפעיל כוח על נושאי המטען במוליך בכיוון מסוים. נושאי המטען החיוביים נעים בכיוון זה, וזהו כיוונו של הזרם החשמלי במוליך (כיוון הזרם החשמלי במוליך ככיוון השדה החשמלי שבו).

ג. מאחר שכיוון השדה האלקטרוסטטי הוא מהפוטנציאל הגבוה לנמוך, כיוון הזרם החשמלי, בכל קטע של המעגל, הוא מהפוטנציאל הגבוה לנמוך. בסוללה קיים מנגנון ההופך אנרגיה לא חשמלית (כימית, למשל) לאנרגיה חשמלית, מנגנון הגורם להעברת מטענים מהפוטנציאל הנמוך לפוטנציאל הגבוה.

ד. כדי לחזק את הקשר בין המודל המיקרוסקופי למודל המקרוסקופי, מומלץ להביא את הנוסחה - $I = nqAv$ ולהסביר את הפרמטרים שלה. חשוב להדגיש את ההבדל שבין "מהירות הסחיפה" לעצמת הזרם. בכיתות חזקות כדאי לפתח את הנוסחה.

ה. האפיון הכמותי של הזרם החשמלי הוא על-ידי עצמת הזרם החשמלי, המוגדרת על-ידי $I = \frac{dq}{dt}$.

יש להראות כי עצמת הזרם מתארת מבחינה מתמטית את שיפוע הגרף מטען-זמן (עצמת הזרם כנגזרת המטען בזמן), ואילו כמות המטען ניתנת על-ידי 'שטח' שמתחת לגרף זרם-זמן. בשלב זה אין צורך בתרגול.

ו. בעזרת תיאור גרפי של זרם כתלות בזמן, ניתן להציג את המושגים: "זרם ישר", "זרם קבוע", "זרם משתנה", "זרם חלופין".

ז. יש לציין את התחממות המוליך שזורם בו זרם וכן שהעברת זרם בתמיסה אלקטרוליטית גורמת להתפרקות התמיסה. בשלב זה של הלימוד, רצוי להתייחס לקשר שבין עצמתן של תופעות חשמליות (כגון סטיית מחט מצפן) לעצמת הזרם.

ח. חשוב לציין כי זרם חשמלי במוליך הוא תוצאה של תנועת אלקטרונים, ואילו בתמיסות אלקטרוליטיות הזרם נוצר כתוצאה מתנועת יונים.

3.2 המתח החשמלי וחוק אום (2 שעות)

- א. את הקשר בין מתח לזרם במוליך רצוי להראות בעזרת ניסוי. בשלב זה, חשוב להראות שתלות זו ייחודית למוליך, וזאת על-ידי השוואה בין אופייני נגד ונורת להט (ואולי אף דיודה תרמיונית).
- ב. תלמידים נוטים לחשוב שהמתח על הנגד נגרם על-ידי הזרם העובר דרכו. למעשה, המושג הראשוני הוא השדה החשמלי בחומר, המפעיל כוח על המטענים ויוצר זרם חשמלי. (אם פרק זה נלמד לאחר הוראת האלקטרוסטטיקה, ניתן לעמוד על הקשר שבין השדה החשמלי במוליך ובין עצמת הזרם במעגל). ה"שדה החשמלי" ו"הפרש הפוטנציאלים" ("מתח") הם מושגים הנגזרים זה מזה. קיומו של הפרש פוטנציאלים מעיד על קיומו של שדה חשמלי הגורם לזרם.
- ג. המתח בין שתי נקודות במעגל לאורכו של מוליך הומוגני, נמצא ביחס ישר למרחק ביניהן. ניתן להראות כי מעובדה זו נובע שהשדה החשמלי במוליך הומוגני הוא אחיד.
- ד. הנגד הופך אנרגיה חשמלית לחום. כאשר מטען נע בנגד, העבודה שביצע עליו השדה החשמלי שווה לכמות החום שנפלטה בנגד. תנועת המטען החשמלי בנגד היא תוצאה של כוח שמפעיל השדה החשמלי בנגד. יש לציין שללא התנגדות החומר, המטען היה יכול לשמור על מהירותו ללא עבודה (על מוליך).
- ה. עבודת השדה החשמלי ליחידת מטען מוגדרת כמתח על הנגד.

3.3 התנגדות (2 שעה)

- א. יש להדגיש את תלות ההתנגדות בגדלים גאומטריים של אורך הנגד ושטח-החתך שלו. כן תלויה ההתנגדות בסוג החומר. מומלץ לבצע ניסוי הממחיש תכונות אלו.
- ב. נגד משתנה מהווה יישום של אפשרות שינוי התכונות הגאומטריות.
- ג. יש להסביר בקצרה מהו חיבור פוטנציומטרי ומהו חיבור ריאוסטטי. הסבר מפורט יותר יינתן בעת הדיון במעגלים חשמליים.

3.4 כא"מ ומתח הדקים (3 שעות)

- א. יש להתייחס למושג "כא"מ" בהיבט האנרגטי: האנרגיה שהסוללה מעניקה ליחידת מטען (אפשר לומר גם: כא"מ – כמות אנרגיה למטען).
- ב. אפשר למדוד את הכא"מ בעזרת אלקטרומטר (אלקטרוסקופ מכויל), או בעזרת וולטמטר אידאלי.

ג. יש להדגיש שמתחם ההדקים הוא פונקציה של הזרם במעגל, לעומת הכא"מ וההתנגדות הפנימית שהם קבועים ומאפיינים את מקור המתח.

3.5 טיפול כמותי בטעינה ופריקה של קבל (4 שעות)

א. מומלץ לפתוח את הנושא בהדגמה בעזרת קבל גדול מאוד (סדר גודל של 1F) הנטען ונפרק דרך נורה, או בניסוי ממוחשב. אם אין לתלמידים רקע בנושא הפונקציה המעריכית, יידחה הטיפול הכמותי לשלב מאוחר יותר. גם אז, אין צורך לפתור את המשוואה הדיפרנציאלית, אולם יש להציג את משוואת הזרם כפתרון שלה. לא נדרש שימוש בפונקציה $\ln(i)$.

ב. למדידה בעזרת חיישנים המחוברים למחשב מספר יתרונות:

- ביצוע הניסוי מהיר יותר, ולכן מסגרת הזמן מאפשרת לבחון את השפעת שינויי המתח, ההתנגדות והקיבול על זמני הטעינה והפריקה.
- ניתן לחשב בקלות את השטח מתחת לגרף הזרם כתלות בזמן ($\int Idt$), ולבחון מה הם הגורמים המשפיעים על המטען המצטבר בקבל.

ג. הטעם העיקרי לטיפול כמותי בטעינה ופריקה של קבל הוא שזוהי הפעם הראשונה שהתלמידים נתקלים ביישום מדעי של הפונקציה המעריכית. לכן חשוב לציין כי קיימים תהליכים נוספים בטבע המתנהגים לפי פונקציה זו. כמו כן, תהליך הטעינה והפריקה של קבל ממחיש את העובדה שהתהליך שבו המעגל מגיע למצב עמיד אינו מתרחש באפס זמן.

3.6 הספק ואנרגיה במעגל חשמלי, נצילות (3 שעות)

א. רצוי להציג את האנרגיה החשמלית כאחד מסוגי האנרגיה השונים ולנצל את הידע שהתלמידים רכשו בנושא בתחומים אחרים.

ב. התלמידים יתבקשו להביא דוגמאות של תהליכי המרת אנרגיה כאשר אחת משתי האנרגיות המעורבות היא חשמלית.

ג. יש להדגיש את ההבדל בין אנרגיה לבין הספק: האנרגיה היא גודל מצטבר לאורך הזמן, ואילו ההספק מבטא את האנרגיה ביחידת זמן. לכן נכון יהיה להשוות בין מכשירי חשמל רק לפי ההספקיהם ולא לפי האנרגיה שהם צורכים.

ד. ההספק הרשום על כל מכשיר חשמלי נכון רק בתנאי שהמכשיר מחובר למתח הרשום עליו. אחרת ההספק ישתנה ביחס ישר לריבוע המתח.

- ה. כאן גם המקום להזכיר את היחידה המקובלת למדידת אנרגיה חשמלית במשק החשמל – הקילוואט-שעה (kWh).
- ו. מומלץ לדון עם התלמידים בתלותה של הנצילות ביחס שבין ההתנגדות החיצונית של המעגל להתנגדות הפנימית שלו.
- ז. כבר בשלב זה ניתן לדון עם התלמידים ביתרון שבהעברת אנרגיה למרחק במתח גבוה ובזרם נמוך.

3.7 מעגלים חשמליים (7 שעות)

- א. בחיבור נגדים יש להסביר את משמעותו של המושג "התנגדות שקולה".
- ב. חיבור מקורות במקביל יתייחס רק למקורות זהים.
- ג. כדאי להביא דוגמאות לחיבורים שונים של נגדים לוויסות מתח או זרם במכשירי חשמל. כאן המקום לדון בהבדל שבין החיבור הראוסטטי לבין החיבור הפוטנציאומטרי.
- ד. אין צורך לדון במעגלים מורכבים המכילים יותר משני צמתים ושני מקורות כא"מ (הוספת מכשירי מדידה או מתגים לא תחשב כהוספת צמתים).
- ה. חשוב להדגיש את חוקי קירכהוף כמקרים פרטיים של חוק שימור המטען ("חוק הצומת") ושל חוק שימור האנרגיה ("חוק העניבה").

3.8 מכשירי מדידה (1 שעה)

- א. יש לציין את הדרישות ממכשיר מדידה אידאלי.
- ב. יש להסביר את אופן חיבור מכשירי המדידה במעגל ואת השפעתם על המעגל. במסגרת הדיון האיכותי, יש לדון בהשפעת מכשירי מדידה לא אידאליים על הגדלים הנמדדים.
- ג. אין צורך בדיון כמותי בשינוי תחומי המדידה.

פרק 4: השדה המגנטי

שעות	הנושא
2	4.1 שדות מגנטיים של מגנטים וזרמים
3	4.2 השפעת השדה המגנטי על זרם, עצמת השדה המגנטי
	4.3 הקשר בין השדה המגנטי ומקורותיו - בקרבת תיל ארוך מאוד,
5	במרכז כריכה מעגלית, בסילונית
2	4.4 כוח בין זרמים מקבילים, הגדרת האמפר
4	4.5 כוח הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי
3	4.6 יישומים של הכוח המגנטי
19	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2	- הדגמת מיפוי שדות מגנטיים בעזרת מצפן.		- האופי הווקטורי של השדה המגנטי. - זיהוי השדה המגנטי בנקודה. - השוואה בין קווי השדה המגנטי לבין קווי השדה האלקטרוסטטי. - השדה המגנטי של כדור הארץ.	4.1 שדות מגנטיים של מגנטים וזרמים
3	- ניסוי או הדמיית מחשב: תלות הכוח המגנטי בפרמטרים.	$F = Bil \sin \alpha$	- השדה המגנטי מפעיל כוח על מטענים נעים. - כיוון הכוח המגנטי. - תלות הכוח המגנטי בפרמטרים. - הגדרת עוצמת השדה המגנטי והשוואה להגדרת עוצמת השדה החשמלי.	4.2 השפעת השדה המגנטי על זרם, עוצמת השדה המגנטי
5	- ניסוי: מדידת השדה המגנטי בתוך סילונית (מאזני זרם). - ניסוי: גליונומטר טנגנטי.	$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$ $B = \frac{\mu_0 NI}{l}$	- הזרם כמקור השדה המגנטי. - חוק אמפר. - הקשרים בין השדות המגנטיים והזרמים בקרבת תיל ישר ארוך, במרכז כריכה מעגלית, בסילונית.	4.3 הקשר בין השדה המגנטי ומקורותיו - בקרבת תיל ארוך מאוד, במרכז כריכה מעגלית, בסילונית
2	- הדגמה: כוח בין שני תילים נושאי זרם.	$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$	- הגדרת האמפר. - כיוון הכוח ביחס לכיוון הזרמים.	4.4 כוח בין זרמים מקבילים, הגדרת האמפר
4	- ניסוי או הדמיית מחשב: מדידת e/m . - הדמיית מחשב: הדגמת תנועת מטען במרחב.	$F = qvB \sin \alpha$ $* \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$	- מעבר מכוח הפועל על תיל נושא זרם לכוח הפועל על מטען נע (כוח לורנץ). - הכוח המגנטי אינו משנה את גודל המהירות (עבודתו אפס). - השוואה בין הכוח המגנטי והכוח החשמלי. - הצגת המכפלה הווקטורית.	4.5 כוח הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי
3	- הדמיה: ספקטרוגרף מסות וציקלוטרון.		- בורר מהירויות. - ספקטרוגרף מסות. - ציקלוטרון.	4.6 יישומים של הכוח המגנטי

* הנוסחה אינה נכללת בחומר החובה.

השדה המגנטי: פירוט, דגשים, הערות דיזקטיות

מבוא

רוב המושגים הנלמדים באלקטרומגנטיות הם מופשטים ורחוקים מחיי היום-יום של התלמידים. די בעובדה זו לגרום להם קשיי הבנה. יתרה מזאת; לתלמידים רבים תפיסה מרחבית לקויה, והיות והבנת המושגים הקשורים במגנטיות מצריכה גם ראייה מרחבית, הם מתקשים מאוד בהבנת המושגים ובראיית הקשרים ביניהם. הדגמות, ניסויים והדמיות יסייעו כאן.

קיימות שתי גישות מרכזיות להגדרת כיוון השדה המגנטי, ושתיהן קובעות את סדר הוראת המושגים בפרק זה:

גישה א': כיוון השדה המגנטי ככיוון שלאורכו מסתדרת מחט מגנטית. לפי גישה זו, סדר הוראת הנושאים יכול להיות כדלהלן:

- **שדות מגנטיים** של מגנטים וזרמים (ללא התייחסות לתכונות המגנטיות של חומרים).
- השפעת השדה המגנטי על זרם, הגדרת עצמת השדה המגנטי.
- הקשר בין השדה המגנטי ומקורותיו, דוגמאות: בקרבת תיל ארוך מאוד, במרכז כריכה מעגלית, בסילוניית.
- כוח בין זרמים מקבילים: הגדרת האמפר.
- כוח הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי.
- יישומים של הכוח המגנטי, דוגמאות: אפקט הול, ספקטרוגרף המסות, ציקלוטרון ובורר מהירויות.

גישה ב': כיוון השדה המגנטי נגזר מהכוח שהשדה המגנטי מפעיל על מטען נע: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$. זוהי הגדרה אופרטיבית, הדומה להגדרת כיוון השדה החשמלי ככיוון הכוח הפועל על מטען חיובי.

לפי גישה זו, ניתן להתחיל בשני הנושאים האחרונים בגישה א' (סעיפים 4.5 ו-4.6), ולהמשיך בקשר שבין השדה המגנטי למקורותיו.

ההערות והפירוט שבהמשך ערוכים לפי הגישה הראשונה, אולם כל מורה יכול לאמץ את הגישה הרצויה לו.

4.1 שדות מגנטיים של מגנטים וזרמים (2 שעות)

- א. התלמידים יתוודעו לאופי הווקטורי של השדה המגנטי. חשוב להדגיש כי שדות מגנטיים מקיימים את עקרון הסופרפוזיציה וכלל החיבור שלהם הוא וקטורי. כיוון השדה המגנטי בנקודה זהה לכיוון מחט מגנטית באותה הנקודה.
- ב. ניתן לתאר שדה מגנטי באמצעות קווי שדה.
- ג. יש להדגיש שקווי השדה המגנטי הם תמיד קווים סגורים, בעוד שקווי השדה האלקטרוסטטי מתחילים במטען חיובי או באין-סוף ומסתיימים במטען שלילי או באין-סוף.
- ד. בשלב זה כדאי להציג ניסויים המנצלים את אופיו הווקטורי של השדה המגנטי הארצי להדגמת אופיו הווקטורי של השדה המגנטי.

4.2 השפעת השדה המגנטי על זרם, עוצמת השדה המגנטי (3 שעות)

- א. רצוי לבצע ניסויים שונים (למשל, מאזני זרם) שידגימו את הכוח שהשדה המגנטי מפעיל על מטענים נעים, דהיינו על זרם חשמלי. בניסויים אלו ניתן לחקור את תלות הכוח בפרמטרים השונים: עוצמת השדה, עוצמת הזרם והזווית שבין כיוון השדה וכיוון הזרם.
- ב. יש להראות שכיוון הכוח המגנטי מאונך לכיוון השדה המגנטי ולכיוון תנועת המטענים.

4.3 הקשר בין השדה המגנטי ומקורותיו (5 שעות)

- א. רצוי להתייחס לזרם החשמלי כאל אחד ממקורות השדה המגנטי.
- ב. הניסוי עם הגליונומטר הטנגנטי מדגים גם את העובדה שהשדה המגנטי הוא וקטור.
- ג. יש להדגיש כי הקוטב הצפוני של כדור הארץ הוא למעשה קוטב מגנטי דרומי (S).
- ד. כדאי להדגים מצפן אנכי, להסביר את המושג "רכינה" ולציין מניין היא נובעת.
- ה. כדאי להזכיר כי יש סטייה קטנה (כ- 2 מעלות) בין ציר הסיבוב של כדור הארץ ובין הקו המחבר בין הקטבים.
- ו. אין צורך להשתמש בחוק אמפר ובחוק ביו-סָוור בצורתם הכללית לחישוב השדה במרכז סילונית ובמרכז כריכה מעגלית. אימות נוסחאות אלו ייעשה באמצעות ניסוי.

4.4 כוח בין זרמים מקבילים והגדרת האמפר (2 שעות)

- האמפר מצטרף ליחידות המדידה הבסיסיות ב-SI המוכרות מהמכניקה. האמפר, היחידה של עוצמת הזרם החשמלי, מוגדר בעזרת הכוח הפועל בין שני תילים מקבילים נושאי זרם.

4.5 כוח הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי (4 שעות)

- א. בדיון הראשוני בכוח המגנטי, עוסקים בשדה מגנטי קבוע בזמן. בהקשר זה יש להדגיש כי מאחר שהכוח המגנטי מאונך תמיד לכיוון תנועת המטען הנע בשדה המגנטי, עבודתו על המטען היא אפס. שדה מגנטי, קבוע בזמן, אינו משנה את האנרגיה הקינטית של המטען. משמעות מסקנה זו היא שלא ניתן להשתמש בשדה מגנטי בלבד לשינוי גודל מהירות המטענים. על אף שקיים שדה מגנטי המשתנה עם הזמן, המלווה שדה חשמלי המסוגל להאיץ מטענים, לא מומלץ להזכירו בשלב זה. הדיון בנושא יהיה בשלב מאוחר יותר.
- ב. הסיבה לכך שחלקיק טעון הנכנס לשדה בניצב לכיוון השדה, נע בתנועה מעגלית - אינה רק הכוח הפועל עליו המכוון במאונך למהירות, אלא העובדה שגודל הכוח הוא קבוע, אם השדה אחיד.
- ג. אפשר להציג את הכוח המגנטי $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ כמכפלה וקטורית.
- ד. כדאי להשוות בין הכוח על מטען הנע בשדה מגנטי: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ ובין הכוח בשדה האלקטרוסטטי $\vec{F} = q\vec{E}$. חשוב שהמורה יהיה מודע לאנלוגיה מוטעית העלולה להיווצר בין שני כוחות ושדות אלה - החשמלי והמגנטי, ועליו להדגיש את הדומה והשונה ביניהם.

כוח מגנטי	כוח חשמלי
- פועל על מטען נע.	- פועל גם על מטען נע וגם על מטען נח.
- כיוונו על מטען חיובי הוא מאונך למישור שנוצר על-ידי וקטור השדה המגנטי ווקטור המהירות של המטען.	- כיוונו על מטען חיובי הוא ככיוון השדה החשמלי.
- אינו עושה עבודה.	- עושה עבודה.

- ה. קיימת נטייה להדגיש במיוחד תנועה במסלול מעגלי בשדה מגנטי, וזאת על חשבון דיון בתנועה במסלולים אחרים ודיון בתנאים הדרושים לקיומה של תנועה זו. נטייה זו עלולה ליצור אצל התלמידים את הרושם כאילו תנועה במסלול מעגלי היא התנועה הבלעדית האפשרית בשדה מגנטי. כדאי לנתח איכותית תנועות במסלולים אחרים ולהצביע על שני רכיבי המהירות - המאונך לשדה המגנטי והמכוון לאורך קו השדה. בהקשר זה אפשר להזכיר את חגורות ון-אלן.

4.6 יישומים של הכוח המגנטי (3 שעות)

כיישום פשוט של הכוח המגנטי, ניתן להזכיר כאן מכשירים פשוטים, כמו ממסרים אלקטרומגנטיים, רשמי-זמן ומנופים אלקטרומגנטיים. כיישומים מתקדמים של הכוח המגנטי, ניתן לדון בספקטרוגרף המסות, בציקלוטרון ובמאיצי חלקיקים מעגליים.

פרק 5: השראה אלקטרומגנטית

שעות	הנושא
10	5.1 כא"מ מושרה, חוק פארדיי וחוק לנץ
3	5.2 יישומים טכנולוגיים
2	5.3 השראה עצמית
2	5.4 משוואות מקסוול
17	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
10	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמת זרם מושרה בסליל הנע בקרבת מגנט. - הדגמות בעזרת אוסצילוסקופ. - הדגמה: מדידת B בעזרת סליל בוחר. - ניסוי: כא"מ במנוע מרים משא. - ניסוי: בלימת מנוע מרים משא. - הדגמה: מגנט נופל בתוך צינור אלומיניום. 	$\varepsilon = B \ell v \sin \alpha$ $\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$	<ul style="list-style-type: none"> - כא"מ הנוצר בין קצות מוליך הנע בשדה מגנטי אחיד - הסבר בעזרת כוח לורנץ. - כא"מ הנוצר בלולאה כתוצאה מתנועתה יחסית לשדה מגנטי. - שטף מגנטי דרך משטח. - חוק פארדיי. - כא"מ הנוצר בלולאה כתוצאה משינוי בזמן של השדה המגנטי. - חוק לנץ וקביעת כיוון הזרם המושרה. - חוק לנץ כנובע משימור אנרגיה. 	5.1 כא"מ מושרה, חוק פארדיי וחוק לנץ
3	<ul style="list-style-type: none"> - ניסויים במערכת שנאי מתפרק. 	$\varepsilon = -\omega NBA \sin \omega t$ $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1}$	<ul style="list-style-type: none"> - גנרטור AC - הכא"מ המושרה בסליל הטבעתי המסתובב בשדה מגנטי. - מתח זרם אפקטיביים. - שנאי אידאלי. - העברת אנרגיה. 	5.2 יישומים טכנולוגיים
2	<ul style="list-style-type: none"> - ניסויים במערכת שנאי מתפרק. - הדגמה: הדלקת נורה בהשהיה. 	$\varepsilon = -L \frac{di}{dt} *$	<ul style="list-style-type: none"> - המושג "השראות". - התנהגות משרן במעגל זרם ישר (דיון איכותי). 	5.3 השראה עצמית
2	<ul style="list-style-type: none"> - סרט בסדרה: "מעבר ליקום המכני" (או"פ). 		<ul style="list-style-type: none"> - הצגת המשוואות ללא פיתוח כסיכום לנושא האלקטרומגנטיות. 	5.4 משוואות מקסוול

* הנוסחה אינה נכללת בחומר החובה.

השראה אלקטרומגנטית: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

מבוא

- הכא"מ המושרה הוא תוצאה של הפרדת מטענים, שנוצרה מפעולת כוח לורנץ על נושאי המטען החופשיים או משדה חשמלי הנוצר משדה מגנטי משתנה בזמן.
- השדה החשמלי הנוצר מהפרדת מטענים הוא משמר, בניגוד לשדה החשמלי הנוצר משדה מגנטי המשתנה בזמן.
- חשוב להראות כי העבודה החשמלית המתפתחת במעגל, שווה לעבודת הכוח החיצוני הדרוש לשמירת מהירות קבועה של הלולאה.

5.1 כא"מ מושרה, חוק פארדיי וחוק לנץ (10 שעות)

- א. ראוי לשים לב שבתהליכים המתוארים בהמשך נוצר תמיד כא"מ מושרה ולא בהכרח זרם מושרה. כדי שייוצר זרם מושרה, המעגל צריך להיות סגור. הערה: גם במעגל הפתוח, בשלב הפרדת המטענים, יש תנועה רגעית של נושאי המטען, המהווה זרם חשמלי רגעי.
- ב. בעת השתנותו של השטף המגנטי דרך המעגל החשמלי, נוצר כא"מ מושרה במעגל. הכא"מ המושרה מזרים במעגל סגור זרם מושרה, המעכב את סיבת יצירתו (חוק לנץ).
- ג. שינוי השטף המגנטי דרך המעגל יכול להיגרם על-ידי תהליכים שונים, כגון:

1. קיימת תנועה יחסית בין המעגל ובין השדה המגנטי; בתהליך זה הכא"מ המושרה הוא תוצאה של כוח לורנץ, הפועל על המטענים בחלקי המעגל הנמצאים בתנועה ביחס לשדה המגנטי.
2. המעגל נמצא במנוחה ביחס לשדה המגנטי, אולם השדה המגנטי משתנה - בעצמתו או בכיוונו או בשניהם. בתהליך זה, חלק מהמטענים במעגל מצויים באזור שהוא כולו מחוץ לשדה המגנטי, ולכן אי-אפשר לראות בכוח לורנץ את הגורם להיווצרות הכא"מ המושרה. מכאן שהכוח הפועל על המטענים נגרם על-ידי שדה חשמלי, הנוצר על-ידי השדה המגנטי המשתנה.
- ד. על אף אופיים השונה מאוד של התהליכים, מפתיע לגלות כי הכא"מ המושרה, הנוצר על-ידי כל

אחד מהם, מוצא את ביטויו באותה נוסחה מסכמת: $\mathcal{E} = -\frac{d\phi_B}{dt}$. במילים אחרות, הכא"מ

המושרה שווה לקצב שינוי השטף המגנטי דרך המעגל, בלי להיות תלוי באופן שבו מושג שינוי השטף. (אין צורך לדון במצבים כדוגמת "דיסקת פארדיי" שבהם הכא"מ המושרה נוצר על-ידי אחת מהסיבות שהוזכרו, אך לא ניתן להסבירו על-ידי חוק פארדיי.)

- ה. עיקר השימוש בחוק לנץ הוא בקביעת כיוון הזרם המושרה.
- ו. יש להדגיש את חשיבות חוק לנץ מבחינת שימור האנרגיה.
- ז. ניתן להדגים את חוק לנץ בצורה יפה בעזרת ניסויים כגון:
- מערכת מנוע מרים משא - הסל היורד נבלם ברגע שנוצר זרם מושרה במעגל המנוע.
 - מגנט הנופל בצינור אלומיניום.
- ח. יש להדגיש כי ההספק המתפתח במעגל שבו זורם זרם מושרה, הוא תוצאה של עבודה חיצונית.

5.2 יישומים טכנולוגיים (3 שעות)

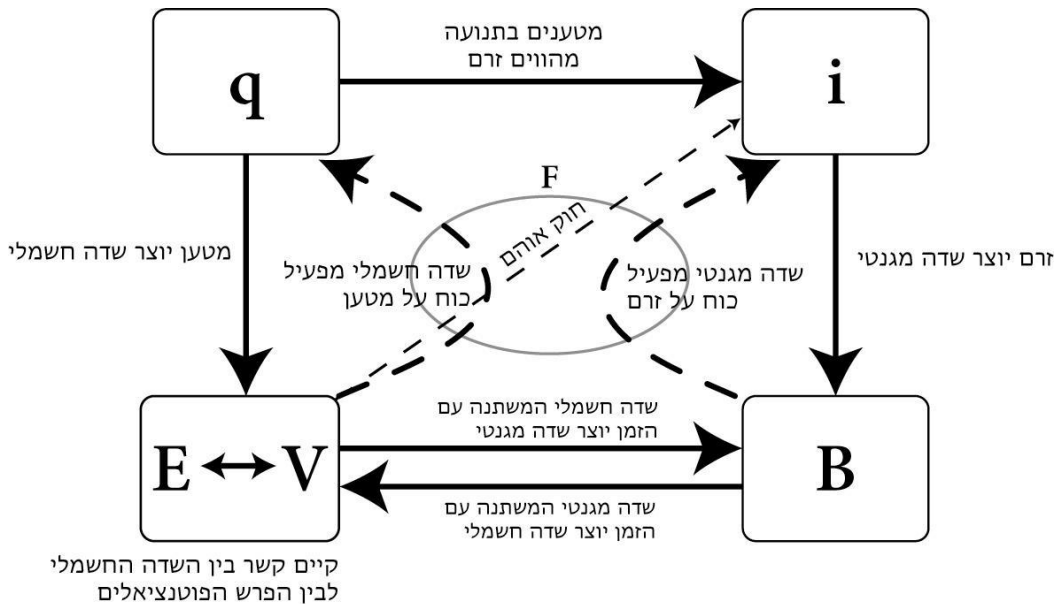
- א. יש לנמק, בצורה איכותית בלבד, את הנוסחה $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{N_2}{N_1}$ (יחס השנאה), בנימוק המסתמך על שימור אנרגיה וכא"מ מושרה.
- ב. יש להסביר כיצד נוצר כא"מ מושרה בלולאה או בסליל המסתובבים בשדה מגנטי בהקשר של מחולל (גנרטור).
- ג. זה הזמן להציג לפני התלמידים את המושג "זרם חלופין" ולדבר באופן איכותי על ערכים אפקטיביים של מתח וזרם במעגל AC. על התלמידים לדעת שהערך האפקטיבי של מתח וזרם חלופין הוא הערך של מתח וזרם קבועים שעבורם מתפתח אותו הספק.
- ד. יש ללמד על השנאי בהקשר של העברת אנרגיה למרחקים.

5.3 השראה עצמית (2 שעות)

- א. מומלץ לבצע הדגמה של תופעת ה"השראות העצמית" (נורה מחוברת בטור למשרן) ותלותה האיכותית בפרמטרים השונים.
- ב. מומלץ לקיים דיון איכותי על השפעת המשרן על עצמת הזרם הישר במעגל בעת ההדלקה או הכיבוי. ניתן לראות בהשראות תכונה המבטאת 'התמדה' (אינרציה) של המטענים.
- ג. ניתן להציג התקנים המבוססים על משרן למתחים גבוהים בפרקי זמן קצרים, כגון: 'סטרטר' של פלורנסנט, סליל הצתה של מכונית.

5.4 משוואות מקסוול (2 שעות)

- א. באמצעות מפת המושגים המופיעה להלן ניתן להסביר כיצד ארבע המשוואות הקרויות על שם מקסוול מסכמות את כל ההיבטים של האלקטרומגנטיות, שנלמדו במסגרת נושא זה.
- ב. חשוב להראות לתלמידים שלמרות המראה הלא מוכר של הביטויים המתמטיים היוצרים את משוואות מקסוול, המשמעות הפיזיקלית שלהן מוכרת להם.
- ג. התלמידים לא יידרשו לבצע כל פעילות מתמטית הקשורה למשוואות מקסוול.
- ד. מומלץ להיעזר גם בטבלה שבעמוד הבא כדי להבין את המשמעות הפיזיקלית של משוואות מקסוול.



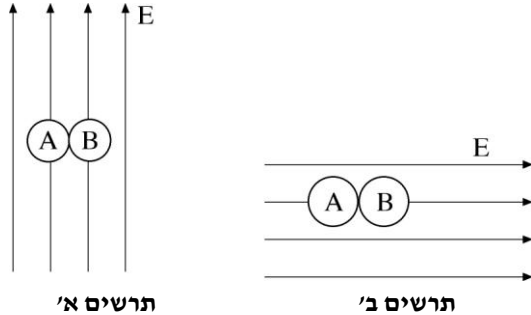
- ה. חשוב לציין את המשמעות ההיסטורית של משוואות מקסוול: משוואות אלה משלימות את חוקי ניוטון, המפרשים את עולם המכניקה, ובעזרתן חשבו הפיזיקאים של תחילת המאה ה-20 שניתן להסביר כמעט את כל התופעות בעולם הטבע. מומלץ לנצל את הוראת הנושאים "גלים אלקטרומגנטיים" ו"משוואות מקסוול" להרחבת אופקי התלמידים ולהקניית היבטים היסטוריים הנוגעים להתפתחות הפיזיקה.

משמעות	החוק	ביטוי מתמטי	משוואת מקסוול*
מטענים יוצרים שדות אלקטרוסטטיים. קווי השדה מתחילים ומסתיימים במטענים.	חוק גאוס באלקטרוסטטיקה	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{\Sigma q}{\epsilon_0}$	1
אין מונופולים מגנטיים. קווי השדה נסגרים בעצמם.	חוק גאוס במגנטיות	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	2
שטף מגנטי משתנה יוצר כא"מ.	חוק פארדיי וחוק לנץ	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d\phi_B}{dt}$	3
זרם ושדה חשמלי המשתנה בזמן יוצרים שדה מגנטי.	חוק אמפר הכולל את זרם ההעתק	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \Sigma I + \mu_0 \epsilon \frac{d\phi_E}{dt}$	4

* משוואות מקסוול אינן נכללות בחומר החובה.

אלקטרומגנטיות – בעיות ותרגילים לדוגמה

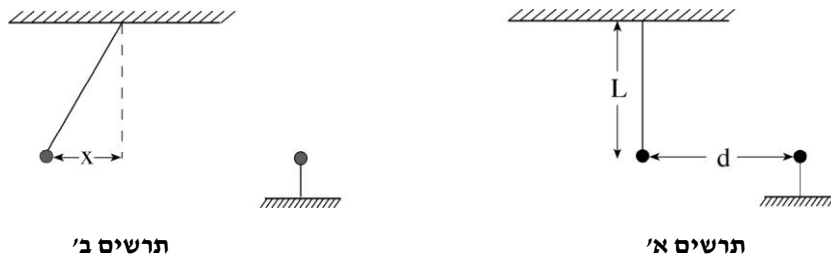
חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי, פוטנציאל, קיבול וקבלים



1. נתונים שני כדורים לא טעונים A ו-B העשויים מחומר מוליך, הזהים בגודלם ונוגעים זה בזה. מפעילים על הכדורים שדה חשמלי אחיד, שכיוונו **מעלה**, כמתואר בתרשים א'.

- א. קבע לכל אחד מהכדורים אם הוא נטען, ואם כן - מהו הסימן של המטען. נמק את קביעותיך.
- ב. מפעילים על הכדורים שדה חשמלי אחיד, שכיוונו **ימינה**, כמתואר בתרשים ב'. קבע לכל אחד מהכדורים אם הוא נטען, ואם כן - מהו הסימן של המטען.
- ג. מפרידים בין הכדורים זה מזה בתוך השדה החשמלי, מוציאים את כדור A מהשדה החשמלי ותולים אותו על חוט מבודד מחוץ לשדה. מקרבים את כדור B לכדור A וכדור A סוטה ומתייצב כך שמרכזי הכדורים A ו-B הם באותו גובה, והמרחק ביניהם הוא 2cm. במצב זה נוצרת זווית של 5^0 בין החוט לאנך. מסת הכדור A היא 5gr. מהו הערך של המטען החשמלי על פני כל אחד משני הכדורים A ו-B?

2. תלמיד הכין מערכת למדידת מטענים חשמליים. הוא לקח שני כדורים מוליכים קטנים זהים. את האחד הוא תלה בקצה חוט שאורכו L ואת השני הצמיד לקצה של מוט. הוא התקין את המערכת כך ששני הכדורים היו באותו גובה ובמרחק d זה מזה (ראה תרשים א'). החוט והמוט עשויים מחומר מבודד.



התלמיד טען את שני הכדורים באותו מטען q , וכתוצאה מכך סטה הכדור התלוי בשיעור x (ראה תרשים ב').

התלמיד שינה את d כמה פעמים, ובכל פעם מדד את x . להלן תוצאות מדידותיו:

d (m)	x (m)	$r = d + x$	$1/r^2$
0.62	0.02		
0.47	0.03		
0.35	0.05		
0.24	0.08		
0.14	0.12		

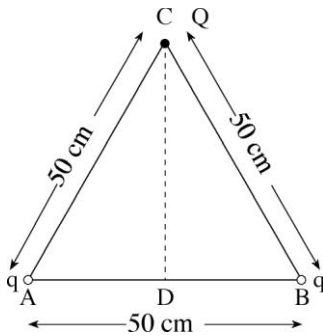
א. העתק את הטבלה למחברתך והשלם אותה. סרטט גרף של x כפונקציה של $1/r^2$.

ב. הראה כי כאשר $L \gg x$ (כך ששיעור עליית הכדור זניח), גודל כוח הדחייה החשמלי F הפועל בין

שני הכדורים מקיים: $F \approx mg \frac{x}{L}$, כאשר m היא מסת הכדור התלוי.

ג. בהסתמך על חוק קולון ועל סעיף ב', הסבר את צורת הגרף שקיבלת.

ד. חשב את המטען q בהסתמך על הגרף שסרטטת, אם נתון כי $L = 1\text{m}$; $m = 10\text{gr}$.



3. שני כדורים קטנים, שמטען כל אחד מהם הוא $q = +10^{-6}\text{C}$,

קבועים בנקודות A ו B במרחק של 50cm זה מזה. בנקודה C,

הנמצאת במרחק של 50cm מכל אחד מהמטענים האלה, נמצא

כדור מוליך שמסתו 31gr, והוא טעון במטען של $Q = -5 \cdot 10^{-6}\text{C}$

(ראה תרשים).

משחררים את הכדור הנמצא בנקודה C. בהנחה שהכוחות

היחידים הפועלים במערכת זו הם הכוחות החשמליים הפועלים בין הכדורים:

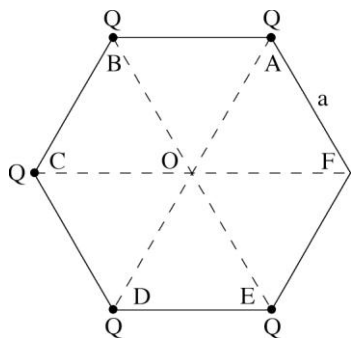
א. חשב את גודלה ואת כיוונה של תאוצת הכדור ברגע בו שוחרר.

ב. תאר את תנועתו של הכדור. התייחס בתשובתך לנקודות הבאות: כיוון המהירות והתאוצה בכל

שלב; האם הכדור מגדיל או מקטין את מהירותו; היכן (אם בכלל) המהירות גדולה ביותר, קטנה

ביותר, מחליפה כיוון.

- ג. חשב את הפוטנציאל בנקודה C ונקודה D (נקודת האמצע בין A ל B) בהשפעת המטענים הקבועים בנקודות A ו B.
- ד. מה גודל מהירותו של הכדור הנע כשהוא עובר בנקודה D ?



4. בכל אחד מחמשת הקדקודים A, B, C, D, E של משושה משוכלל, שאורך צלעו a, נמצא מטען נקודתי חיובי Q. בקדקוד F אין מטען (ראה תרשים).
- בטא את תשובותיך לשאלות באמצעות נתוני השאלה.
- א. מהו השדה החשמלי השקול (גודל וכיוון) במרכז הסימטריה O של המשושה? הסבר.
- ב. מעבירים מטען נוסף Q ממקום רחוק מאוד ("אין-סוף") אל הנקודה O. מהי העבודה שנעשתה נגד כוחות השדה החשמלי?

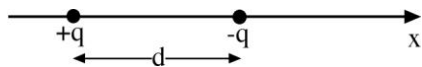
- ג. מעבירים את המטען הנוסף Q מהמרכז O לקדקוד השישי F. (בכל אחד מקדקודי המשושה נמצא עתה מטען Q).

(1) מהו השדה החשמלי בנקודה O? נמק.

(2) האם דרושה עבודה כדי להביא מטען q מאינסוף אל מרכז המשושה? נמק.

- ד. בכל אחד משלושת הקדקודים A, C, E מחליפים את המטען Q במטען שלילי -Q. (בכל אחד משלושת הקדקודים האחרים נמצא מטען Q, ונקודה O אין מטען). האם פעולה זו תגרום לשינוי בפוטנציאל החשמלי במרכז המשושה? הסבר.

5. שני מטענים +q ו -q נמצאים על ציר ה-x, והמרחק ביניהם הוא d (ראה תרשים א').



תרשים א'

א. האם קיימת נקודה לאורך ציר ה-x:

(1) שבה השדה החשמלי מתאפס? נמק.

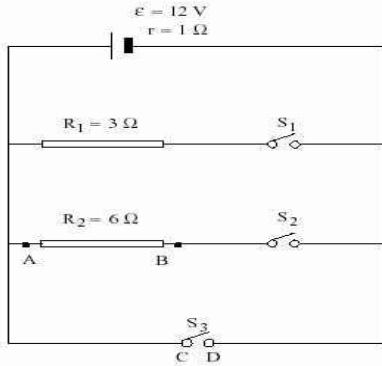
(2) שבה הפוטנציאל החשמלי מתאפס? נמק.

בתשובותיך התייחס לציר ה-x כולו - לקטע שבין שני המטענים ולתחום שמחוץ לקטע זה.

- ב. מהי העבודה שיש לעשות, כדי להגדיל את המרחק בין שני המטענים ל-2d? (בטא את תשובותך באמצעות נתוני השאלה).

מעגלי זרם ישר

6. בתרשים שלפניך מוצג מעגל חשמלי, הכולל מקור מתח שהכא"מ שלו $\varepsilon=12V$ והתנגדותו הפנימית $r=1\Omega$; שני נגדים שהתנגדותיהם $R_1=3\Omega$ ו- $R_2=6\Omega$ שלושה מתגים S_1, S_2 ו- S_3 ותילים שהתנגדותם זניחה.



א. מהו מתח ההדקים כאשר שלושת המתגים פתוחים?

ב. סוגרים את המתגים S_1 ו- S_2 ומשאירים את מתג S_3 פתוח. מצא את:

(1) מתח ההדקים של מקור המתח.

(2) המתח בין הנקודות A ו- B המסומנות בתרשים.

נמק את קביעתך.

(3) המתח בין הנקודות C ו- D המסומנות בתרשים

ג. פותחים את המתג S_2 (S_1 נשאר סגור)

(1) האם מתח ההדקים משתנה? אם לא – נמק מדוע. אם כן – הסבר האם הוא גדל או קטן.

(2) מהו המתח על המתג S_2 ?

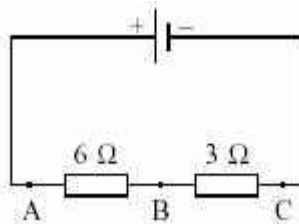
7. לרשותו של תלמיד היו מקור מתח שהכא"מ שלו $12V$

והתנגדותו הפנימית 1Ω ; שני נגדים שהתנגדותיהם 3Ω

ו- 6Ω ותילים אידאליים (שהתנגדותיהם ניתנות

להזנחה). התלמיד חיבר בטור את שני הנגדים אל מקור

המתח כמתואר בתרשים א'.



תרשים א'

א. חשב את המתח בין קצות הנגד שהתנגדותו 3Ω .

ב. נתון כי הפוטנציאל של ההדק השלילי של מקור

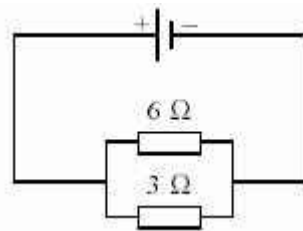
המתח הוא אפס. חשב את הפוטנציאל בנקודה A ובנקודה

B.

ג. האם הזרם העובר בנקודה B גדול מהזרם העובר בנקודה

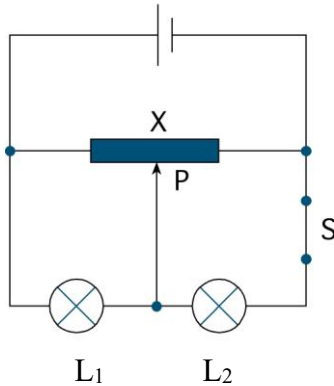
C, קטן ממנו או שווה לו? נמק.

ד. חשב את ההתנגדות השקולה של המעגל החיצוני.



תרשים ב'

ה. התלמיד חיבר במקביל את שני הנגדים אל מקור המתח כמתואר בתרשים ב'. האם מתח ההדקים במצב זה גדול ממתח ההדקים במעגל המתואר בתרשים א', קטן ממנו או שווה לו? נמק.



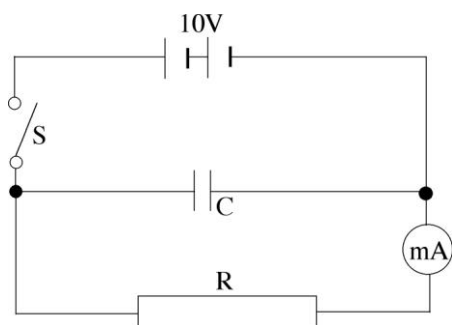
8. התרשים שלפניך מתאר מעגל חשמלי, הכולל סוללה שהכא"מ שלה 12V והתנגדות הפנימית ניתנת להזנחה; נגד משתנה X, שהתנגדותו הכוללת 100Ω ; נורות L_1 ו- L_2 , שעל כל אחת מהן רשום הסימון 6V 18W; ומפסק S. המגע הנייד P של הנגד המשתנה X מחלק את התנגדות הנגד המשתנה לשתי התנגדויות שוות.

א. מהי משמעות הסימן 6V 18W הרשום על הנורות?

ב. חשב את ההתנגדות של כל נורה כאשר היא מופעלת באורה המלא (בהתאם לרשום עליה).

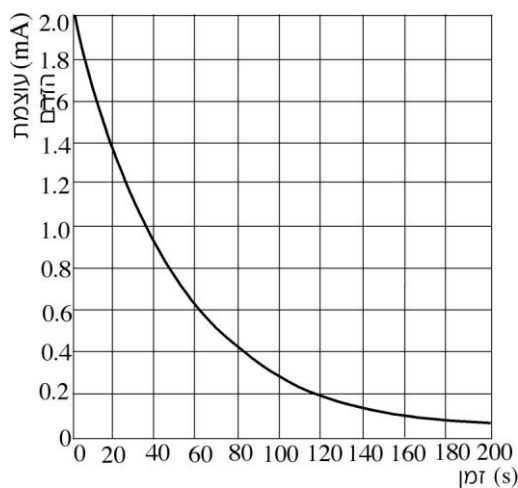
ג. האם הנורה L_1 מאירה באורה המלא במצב המתואר בתרשים? הסבר.

ד. מה תהיה ההשפעה של פתיחת המפסק S על עצמת האור שתיפלט מנורה L_1 ? הסבר. (תוכל להניח שהתנגדות הנורות נשארת קבועה.)



תרשים א'

9. כדי לחקור פריקה של קבל דרך נגד, בנה תלמיד את המעגל החשמלי המתואר בתרשים א', הכולל מקור מתח שהכא"מ שלו 10V והתנגדותו הפנימית ניתנת להזנחה. בתחילה היה המפסק S סגור עד טעינתו המלאה של הקבל, ולאחר מכן, ברגע $t = 0$, פתח התלמיד את המפסק.



תרשים ב

תרשים ב מראה את קריאת המיליאמפרמטר (שהתנגדותו זניחה) בעת הפריקה כפונקציה של הזמן.

א. השתמש בתרשים ב כדי לחשב את הגדלים הבאים (בסדר הנוח לך):

(1) המטען ההתחלתי שבו היה הקבל טעון

ברגע $t = 0$.

(2) קיבול הקבל C .

(3) התנגדות הנגד R .

ב. האם תשובתך בסעיף א(1) מבטאת את כמות

המטען על לוח אחד של הקבל או את סכום

ערכיהם המוחלטים של המטענים על שני

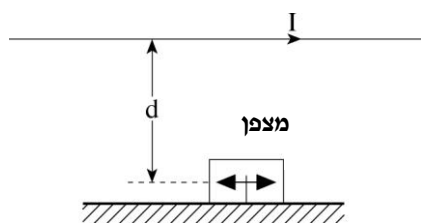
לוחותיו? הסבר.

ג. אילו הפריקה הייתה נעשית דרך נגד בעל התנגדות גדולה מ- R , האם התלמיד היה מקבל עקום

שונה? אם לא - הסבר מדוע; אם כן - העתק למחברתך את העקום המקורי והוסף באותה מערכת-

צירים סרטוט מקורב של העקום שהיה מתקבל עם נגד בעל התנגדות גדולה מ- R .

השדה המגנטי



10. מצפן מונח על שולחן אופקי. בגובה d מעל מחט המצפן

נמצא תיל ישר וארוך מאוד, המקביל למחט המצפן (ראה

תרשים). כאשר מזרימים דרך התיל זרם קבוע $I = 3A$,

סוטה מחט המצפן בזווית θ . משנים את הגובה d ומודדים

את הזווית θ .

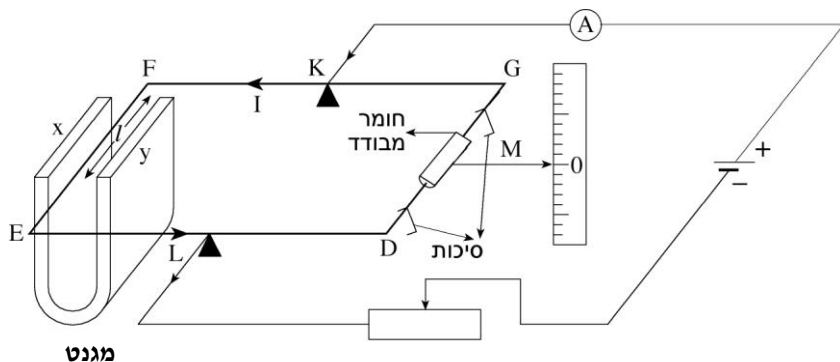
לפניך טבלת תוצאות הניסוי:

d (מטר)	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
θ (מעלות)	51	40	32	27	23

א. סרטט גרף של $\tan\theta$ כפונקציה של d .

ב. על פי הגרף שסרטטת, חשב את הרכיב האופקי של השדה המגנטי של כדור הארץ.

ג. מחזירים את התיל העליון למרחק $d = 0.04 \text{ m}$. מותחים במקביל אליו, ובמרחק של 0.04 m מתחת למצפן, תיל שני ארוך מאוד. בכל אחד מהתילים זורם של 3 A באותו כיוון. מה תהיה, במקרה זה, הסטייה של מחט המצפן? נמק.



11. התרשים מתאר מערכת מאזני זרם. מסגרת DEFG העשויה מתיל מוליך, נתמכת בשתי נקודות K ו L, כך שהיא חופשייה לנוע סביב הציר KL. המסגרת

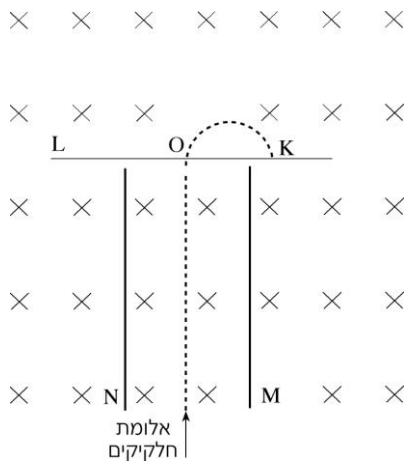
פתוחה בקטע שבו נמצא חומר מבודד, שבמרכזו מחוג M.

קטע מסגרת, שאורכו $l = 2 \text{ cm}$, נמצא בתוך שדה מגנטי אחיד שבו קוטבי מגנט. כאשר לא עובר זרם במסגרת, היא נמצאת במצב אופקי, והמחוג M מצביע על אפס. כשמחברים את מקור המתח, פועל על המסגרת כוח מגנטי F, שאותו מאזנים באמצעות סיכות מהדק. המסה של סיכה אחת היא 0.02 גרם .

בטבלה שלפניך רשום מספר הסיכות (N) המאזנות את הכוח המגנטי עבור זרמים שונים (I).

N מספר הסיכות	1	2	3	4	5
I עוצמת זרם באמפר	0.50	0.95	1.50	2.05	2.50

- מהו כיוון השדה המגנטי (סמן $x \rightarrow y$ או $y \rightarrow x$)? הסבר.
- סרטט גרף המתאר את הכוח המגנטי F בניוטונים כפונקציה של עוצמת הזרם I שזורם במסגרת.
- ג. (1) חשב את שיפוע הגרף שסרטטת.
(2) ציין את היחידות של השיפוע.
(3) חשב את עוצמת השדה המגנטי.



12. בשדה מגנטי אחיד, שעצמתו B וכיוונו "לתוך הדף", נמצא קבל טעון. בין לוחות הקבל, M ו- N , הניצבים למישור הדף, שורר שדה חשמלי אחיד שעצמתו E . אלומת חלקיקים נכנסת אל בין לוחות הקבל בניצב לשדות E ו- B . החלקיקים נעים בין הלוחות במסלול ישר. חלקם עוברים דרך חריץ O שבחיץ L , ולאחר מכן הם פוגעים בחיץ בנקודה K (ראה תרשים). מטענו של כל חלקיק הוא q ומסתו m . כוחות הגרביטציה הפועלים על החלקיקים ניתנים להזנחה.

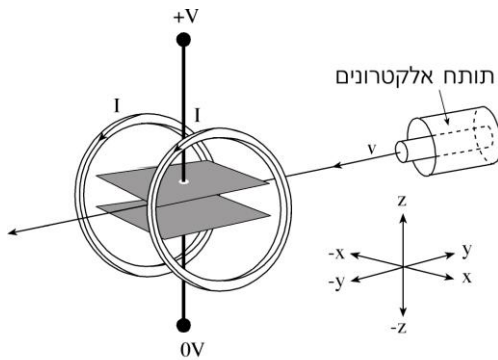
א. האם מטען החלקיקים הוא חיובי או שלילי? נמק.

ב. מהו כיוון השדה החשמלי? נמק.

ג. בטא את המרחק OK באמצעות q , m , B ו- E .

ד. רוצים שהחלקיקים יפגעו בחיץ בנקודה קרובה יותר לחריץ O (כלומר, רוצים להקטין את OK).

ניתן לשנות אך ורק את עצמות השדות E ו- B (ולא, למשל, את מהירות החלקיקים). מה יש לעשות לשם כך? הסבר.

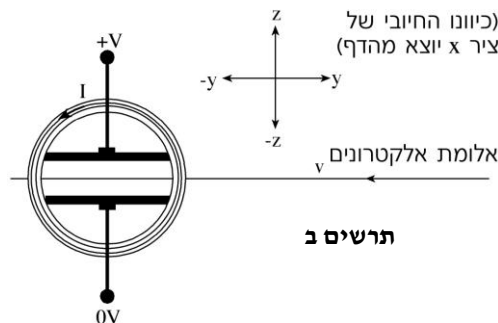


תרשים א

13. מתקן שעשוי משפופרת זכוכית המרוקנת מאוויר, כולל: "תותח אלקטרוניים" הפולט אלומה מקבילה של אלקטרוניים שגודל מהירותם v , שני לוחות אופקיים של קבל שביניהם שורר שדה חשמלי שעצמתו E , ושני סלילים זהים המאונכים ללוחות.

בכל אחד מהסלילים זורם זרם I , היוצר ביניהם שדה מגנטי אחיד שעצמתו B .

בתרשימים א ו-ב מתוארים החלקים העיקריים של השפופרת, ומסומנים כיווני הזרמים בסלילים. הלוח העליון של הקבל מחובר



תרשים ב

לפוטנציאל חיובי, והלוח התחתון מחובר לפוטנציאל אפס.

הזנח את הכוח שמפעיל כדור הארץ על אלומת האלקטרונים, וענה על הסעיפים א' – ג'.

א. היעזר במערכת הצירים x , y ו- z שמתוארת בכל אחד מהתרשימים א' ו-ב', וקבע את כיווני השדות והכוחות שבתת-סעיפים (1)–(4) שלהלן. רשום את הכיוון על-ידי ציון הציר באמצעות האות x או y או z ולידה הסימן + (פלוס) או הסימן - (מינוס).

(1) כיוון השדה החשמלי \vec{E} .

(2) כיוון השדה המגנטי \vec{B} .

(3) כיוון הכוח שמפעיל השדה החשמלי \vec{E} בלבד על אלומת האלקטרונים בהיכנסה לשדה החשמלי.

(4) כיוון הכוח שמפעיל השדה המגנטי \vec{B} בלבד על אלומת האלקטרונים בהיכנסה לשדה המגנטי.

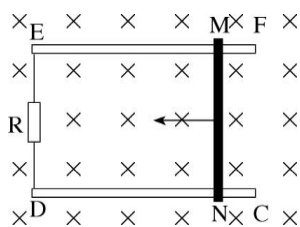
ב. העצמות של השדות \vec{E} ו- \vec{B} נקבעו כך שאלומת האלקטרונים נעה בקו ישר. בטא את מהירות האלקטרונים v באמצעות E ו- B .

ג. (1) מבטלים את השדה החשמלי בין לוחות הקבל (השדה המגנטי נשאר כמו שמתואר בסעיף ב). אלומת האלקטרונים נעה במצב זה בקשת של מעגל שרדיוסו R .

בטא את היחס e/m של האלקטרון באמצעות E , B ו- R .

$$(2) \text{ מצא את הערך של } R \text{ עבור הערכים } B = 8 \cdot 10^{-4} \text{ T}; E = 2 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

השואה אלקטרומגנטית



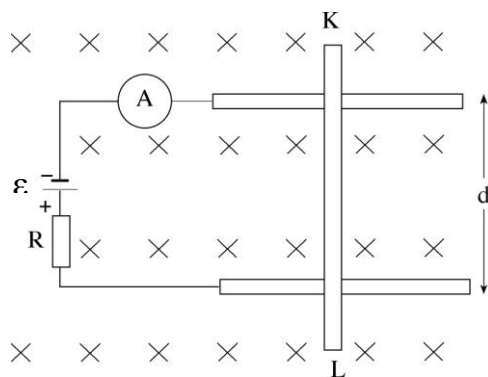
14. לאורך של המסילות המתכתיות FE ו- CD המחוברות ביניהן בקצה באמצעות הנגד R שהתנגדותו 2Ω , נע ללא חיכוך מוט מתכתי MN שאורכו 10cm והתנגדותו 0.5Ω . המוט נע שמאלה במהירות 3m/s . המערכת הני"ל נתונה בתוך שדה מגנטי אחיד שעוצמתו 0.4T וכיוונו מאונך למישור הדף (ראה תרשים). התנגדותן של המסילות FE ו- CD זניחה.

א. חשב את עצמת הזרם בנגד R .

ב. קבע את כיוון הזרם במוט MN .

ג. חשב את הכוח (גודל וכיוון) המופעל על המוט MN (ע"י השדה המגנטי).

ד. כיצד היו משתנות התוצאות בסעיפים א', ב' ו- ג' אילו כיוון השדה המגנטי היה מימין לשמאל במישור הדף? נמק.



15. שני מוטות מוליכים מקבילים ואופקיים, שהמרחק ביניהם d , נמצאים בשדה מגנטי אחיד B , המאונך למישור הנוצר על-ידי שני המוטות וכיוונו "לתוך הדף". המוטות מחוברים למקור מתח ε , לנגד R ולמד-זרם A . על גבי שני המוטות, ובמאונך להם, מניחים מוט מוליך שלישי KL (ראה תרשים). ההתנגדויות

החשמליות של מקור המתח, של מד-הזרם ושל שלושת המוטות זניחות, וכן זניח החיכוך בין המוט KL לבין המוטות המקבילים. על המוט KL מפעילים כוח חיצוני אופקי F , כדי להחזיקו במנוחה.

א. (1) מצא את כיוון הזרם I במוט KL ובטא את עצמתו באמצעות נתוני השאלה.

(2) מצא את כיוונו של הכוח החיצוני F ובטא את גודלו באמצעות נתוני השאלה.

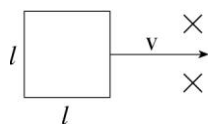
ב. מפסיקים את פעולת הכוח החיצוני F .

(1) האם המוט KL ינוע שמאלה, ימינה או יישאר במקומו? הסבר.

(2) האם עצמת הזרם I תגדל, תקטן או לא תשתנה? הסבר.

ג. עתה מסיעים את המוט KL ימינה במהירות קבועה v . האם עצמת הזרם דרך המוט תהיה גדולה או קטנה מזו שזרמה דרכו כאשר הוחזק במנוחה על-ידי הכוח F ? הסבר.

16. מתיל מוליך שהתנגדותו R בנו ריבוע שאורך צלעו l .



הריבוע מונע בכיוון אופקי במהירות קבועה v . בזמן $t = 0$ מתחיל הריבוע להכנס לתוך שדה מגנטי אחיד B הניצב למישור הריבוע. השדה המגנטי משתרע לאורך אזור שרוחבו $w > l$, w (ראה תרשים).

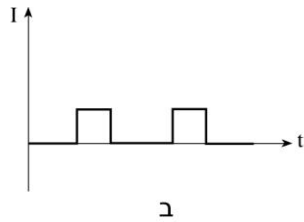
א. איזה מבין הגרפים הבאים מבטא את הזרם שיזרום בריבוע?

ב. נתון כי:

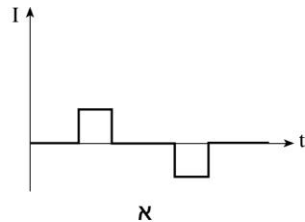
$$B = 2T; R = 5\Omega; v = 0.25 \text{ m/s}$$

$$w = 0.75 \text{ m}; l = 0.5 \text{ m}$$

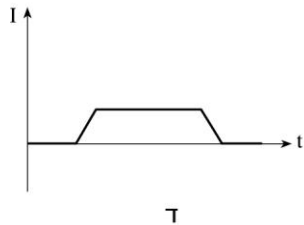
סרטט גרפים מדויקים המתארים את התלות בזמן של:



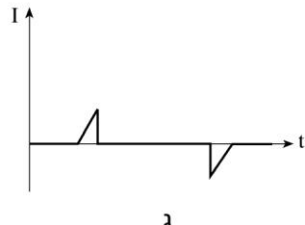
ב



א



ד

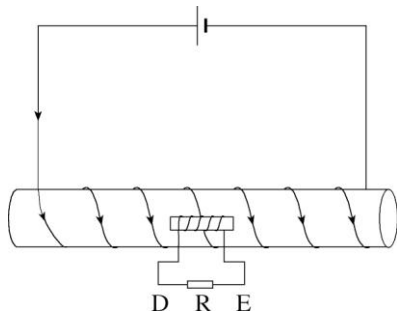


א

(1) השטף המגנטי Φ_B דרך הריבוע.

(2) עצמת הזרם I בתיל. (בחר זרם נגד כיוון הסיבוב של מחוגי השעון כזרם חיובי.)

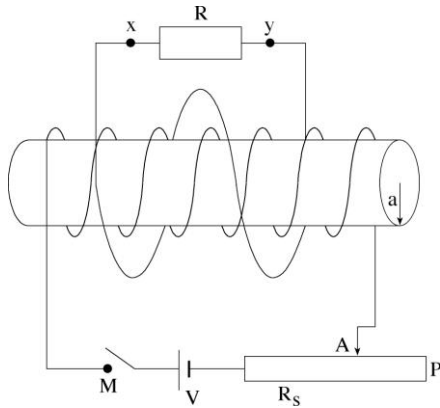
(3) הכוח שיש להפעיל על התיל כדי שינוע במהירות הקבועה. (כוח הפועל ימינה יחשב כחיובי.)



17. סילונית ארוכה, שבה 6000 ליפופים לכל מטר, מחוברת למקור מתח המזרים בה זרם I . עצמתו של זרם זה משתנה עם הזמן t לפי הפונקציה $I = 3t$ (t נמדד בשניות; I נמדד באמפרים). במרכז הסילונית מצוי סליל דק, שרדיוסו 2cm , ובו 25 ליפופים. ציר הסליל מתלכד עם ציר הסילונית. הסליל מחובר לנגד R , שהתנגדותו 5Ω . (התנגדות הסליל ניתנת להזנחה.)

א. מהי עצמת הזרם המושרה בנגד ברגע $t = 2\text{s}$?

ב. מהו כיוונו של הזרם בנגד R (מ- D ל- E או מ- E ל- D)? נמק!



18. נתונה סילוניית בעלת N_1 כריכות שאורכה L . הסילוניית מחוברת למעגל חשמלי המכיל: מקור מתח V , נגד משתנה R_s , מפסק M . סביב הסילוניית נמצא סליל משני שמספר כריכותיו N_2 וקצותיו מחוברים לנגד R (ראה תרשים).

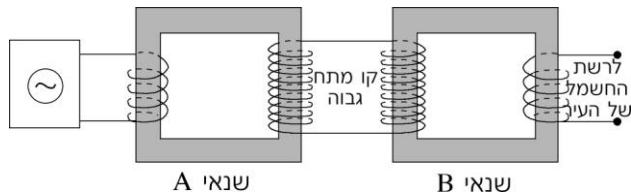
א. ציין את כיוון הזרם שעובר דרך הנגד R (סמן $x \leftarrow y$ או $x \rightarrow y$):

(1) תוך כדי סגירת המפסק M . הסבר.

(2) כאשר המפסק M סגור, תוך כדי הזזת המגע הזחית A לכיוון הנקודה P . הסבר.

ב. מחליפים את מקור המתח הישר במקור מתח חלופין. האם עובר זרם דרך הנגד R כשהמפסק M סגור? הסבר.

(הערה: שאלה כזו לא תופיע כשאלה מלאה (כי היקף הנושא אינו מצדיק שאלה מלאה), אולם סעיפים ממנה יכולים להופיע בשאלות אחרות.)



19. גנרטור בתחנת כוח מייצר מתח חלופין, שערכו האפקטיבי הוא $20,000V$. הגנרטור מחובר לשנאי A , שמתח היציאה שלו מסופק לקו מתח גבוה.

בקרבת עיר מסוימת קו המתח הגבוה מחובר לשנאי B , שמתח היציאה שלו מתאים לרשת החשמל של העיר (ראה תרשים).

א. הסבר מהו עקרון פעולתו של גנרטור לזרם חלופין.

ב. מהי משמעות המשפט "הערך האפקטיבי של מתח החלופין הוא $20,000V$ "?

ג. כיצד נוצר הזרם בסליל משני של שנאי?

ד. הסבר מדוע משתמשים בשנאי להעברת אנרגיה חשמלית למרחקים גדולים.

אלקטרומוגנטיות - הרחבה והעמקה

שעות	הנושא
4	1. חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי
3	2. פוטנציאל חשמלי, קיבול וקבלים
10	3. מעגלי זרם ישר
5	4. השדה המגנטי
7	5. השראה אלקטרומוגנטית
29	סה"כ

טבלת הנושאים ופירוטם

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4			<ul style="list-style-type: none"> - חוק גאוס : • הוכחת חוק גאוס. • יישומי חוק גאוס למקרים סימטריים (שדות סביב תיל טעון, כדור טעון באופן אחיד וכו'). • מודל האטום של תומסון. 	1. חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי
3	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה : משטחים שווי-פוטנציאל וקווי שדה אלקטרוסטטי על-ידי ניסוי והדמיית מחשב. 	$E = -\text{grad}V$ $U_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$	<ul style="list-style-type: none"> - משטחים שווי-פוטנציאל וקווי שדה אלקטרוסטטי - הכללת הקשר בין השדה האלקטרוסטטי לבין הפוטנציאל. - צפיפות אנרגיה בשדה אלקטרוסטטי. 	2. פוטנציאל חשמלי, קיבול וקבלים
10	<ul style="list-style-type: none"> - ניסוי ממוחשב : טעינה ופריקה של קבל - גרף $\ln(I)$ כתלות בזמן. - הדגמה : חיבור מכשירי מדידה לא-אידאליים, מדידת השפעתם ומציאת התנגדותם. 		<ul style="list-style-type: none"> - השדה החשמלי במוליך נושא זרם : • מנגנון היווצרות השדה (מטעני שפה). • מעבר ממעגל פתוח לזרם במצב עמיד. • מודל דרודה (Drude) ומגבלותיו. - יישומים פשוטים של מעגלים חשמליים. - טיפול כמותי בטעינה ופריקה של קבל : • מציאת הגודל RC מתוך גרף $\ln(I)$ כתלות בזמן. - מכשירי מדידה : • דיון ומדידה כמותיים בהשפעת מכשירים לא-אידאליים על המעגל. • הרחבת תחומי מדידה. 	3. מעגלי זרם ישר

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
5	<p>- הדגמה : מדידת השדה המגנטי באמצעות Hall-Probe.</p>	<p>דרך משטח סגור</p> $\oint \mathbf{B}d\mathbf{A} = 0$ $\mu_0 \sum I = \oint \mathbf{B}d\mathbf{l}$	<p>- תכונות מגנטיות של חומרים :</p> <ul style="list-style-type: none"> • חומרים דיא-מגנטיים, פרה-מגנטיים, פרו-מגנטיים. <p>- שדות מגנטיים :</p> <ul style="list-style-type: none"> • השדה המגנטי והשוואתו לשדה האלקטרוסטטי. • חוק ביו-סוור וסופרפוזיציה של שדות מגנטיים. <p>- אפקט הול.</p>	4. השדה המגנטי
7	<p>- ניסוי או הדגמה : שינוי השטף הנוצר על-ידי שינוי בזמן של השדה המגנטי.</p>	$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$ $E = \frac{1}{2} LI^2$	<p>- מנגנונים להיווצרות כא"מ מושרה :</p> <ul style="list-style-type: none"> • הפרדת מטענים : האופי המשמר של השדה החשמלי הנוצר. • שדה מגנטי משתנה בזמן : האופי הלא משמר של השדה הנוצר. <p>- בטטרון.</p> <p>- הסבר העיקרון של מחולל פארדיי.</p> <p>- השראות עצמית, האנרגיה האגורה בשדה מגנטי של סליל.</p> <p>- היבטים יחסותיים של השדה המגנטי.</p>	5. השראה אלקטרומגנטית

אלקטרומגנטיות – הערות דידקטיות לנושאי הרחבה והעמקה

1. חוק קולון והשדה האלקטרוסטטי

חוק גאוס (4 שעות)

א. את חוק גאוס רצוי להציג תחילה באמצעות הדוגמה הפשוטה של מטען נקודתי q המצוי במרכזה של קליפה כדורית המהווה "משטח גאוס". אם מקיפים קליפה זו במשטח גדול יותר, שצורתו אינה דווקא כדורית, קל להוכיח כי השטף דרך משטח זה שווה לשטף דרך הקליפה הכדורית. מתברר אפוא שאין זה משנה מהי צורתו של המשטח שבו בחרנו להקיף את המטען; השטף דרכו פרופורציוני לגודל המטען הנקודתי. בעזרת שימוש במסקנה זו ובעיקרון הסופרפוזיציה ניתן להגיע לחוק גאוס.

ב. נוכל לבחור בכל משטח שצורתו תקל עלינו לחשב את השטף דרכו. מכאן נובע שחישובים של שדות בעזרת חוק גאוס אפשריים ופשוטים יחסית במקרים שבהם קיימת מידה מסוימת של סימטריה בפיזור המטען במרחב.

ג. חישוב השדה החשמלי של תיל ישר וארוך, הטעון בצפיפות-מטען אורכית אחידה - λ , חשוב למורה המתעתד להשתמש בדמיון המתמטי המתקבל בין השדה החשמלי שבמקרה זה לבין השדה המגנטי של תיל ישר וארוך, לגזירת משוואת לפלס.

ד. בעזרת חישוב השדה החשמלי בתוך כדור טעון באופן אחיד (וקבלת הכוח ההרמוני - הפרופורציוני מהמרכז), ניתן לחשב את תדירות תנודתו של אלקטרון של אטום המימן לפי מודל תומסון.

ה. כדאי לדון ביישומים טכנולוגיים של אלקטרוסטטיקה, כגון שיקוע אלקטרוסטטי (בתחנות כוח), מכונות צילום, מאיצים קוויים.

ו. אם לתלמידים שליטה סבירה בחשבון אינטגרלי (ולמורה זמן), ניתן להגיע בעזרת עקרון הסופרפוזיציה לביטויים של עצמת השדה החשמלי במקרים שונים. לדוגמה: חישוב עצמת

השדה האחיד של שכבה מישורית אין-סופית הטעונה בצפיפות-שטח אחידה σ $\left(E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \right)$

בעזרת חישוב השדה על ציר הסימטריה הניצב לטבעת מישורית הטעונה בצפיפות-מטען אחידה. בהסתמך על עקרון הסופרפוזיציה, אפשר גם להראות שהשדה בין שתי שכבות מישוריות אין-סופיות ומקבילות, הטעונות בצפיפויות מטען אחידות $\sigma + \sigma$ ו- $\sigma - \sigma$ בהתאמה, הוא שדה אחיד

שעצמתו $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$. זהו, בקירוב טוב, גם השדה בין שני לוחות מתכת גדולים וקרובים של קבל לוחות טעון (הרחק מקצותיו).

2. פוטנציאל חשמלי, קיבול וקבלים

משטחים שווי-פוטנציאל וקווי שדה אלקטרוסטטי (2 שעות)

- כדאי לבצע ניסויים או הדגמות של מיפוי משטחים שווי-פוטנציאל ולהראות שקווי השדה מאונכים למשטחים אלה. ניתן לעשות זאת גם באמצעות הדמיית מחשב.
- שימוש בהדמיות מאפשר לתלמידים להבין מדוע פוטנציאל יכול להתאפס במקום שהשדה אינו מתאפס, ולהפך.
- כיוון שבמסגרת שעות הליכה הוצג הקשר בין הפרש הפוטנציאל לבין השדה החשמלי במקרה הפשוט של שדה אחיד, במסגרת הרחבה והעמקה אפשר לעסוק גם בקשר הכללי יותר:
 $E = -\text{grad}V$
- כדי לסרטט באופן איכותי מפות של קווי שדה ומשטחים שווי-פוטנציאל בקרבת מוליכים, ניתן להיעזר בעובדה שפני מוליך במצב אלקטרוסטטי מהווים משטח שווה-פוטנציאל. ניתן להוסיף לכך מטעני דמות ולחשב שדות בקרבת משטחים מוליכים ולהדגים את אפקט החודים, למשל.

צפיפות אנרגיה בשדה אלקטרוסטטי (1 שעה)

אחרי שלומדים על השדה החשמלי בין לוחות קבל, על האנרגיה האגורה בקבל לוחות ועל חומרים דיאלקטריים - רצוי לדון גם ב"צפיפות אנרגיה חשמלית בשדה חשמלי". מנוסחת האנרגיה האגורה בקבל לוחות, מגיעים לנוסחה $\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$ עבור צפיפות האנרגיה בשדה חשמלי. בהמשך ניתן להיעזר בקשר זה לדיון באנרגיה האגורה בגל אלקטרומגנטי.

3. מעגלי זרם ישר

השדה החשמלי במוליך נושא זרם (3 שעות)

מטעני שפה

- מומלץ להסביר את האופן שבו השדה החשמלי נוצר במעגל בעזרת מטעני השפה. השדה נוצר

כתוצאה מגרדיינט של התפלגות מטעני השפה על פני המוליך. הסבר על מטעני השפה יעזור לתלמידים להבין את האופן שבו הזרם מתייצב במעגל, כלומר: שבהיעדר מצב של שיווי-משקל אלקטרוסטטי, יש שדה גם בתוך המוליך וכיוונו מתאים לכיוון הזרם.

- ב. חשוב שהתלמידים יבינו שמטעני המקור אינם אלה היוצרים את השדה בנקודה כלשהי לאורך המוליך. התרומה המשמעותית לשדה בנקודה זו היא מטעני השפה הנמצאים בקרבתה.
- ג. מקור המתח יוצר הפרדת מטענים בין קצותיו שגורמת לשינוי בהתפלגות מטעני השפה, שינוי שיוצר את השדה החשמלי. במקור המתח, לשדה החשמלי יש חלק לא משמר, האחראי להיפוך אנרגיה לא-חשמלית לאנרגיה חשמלית. עבודת הרכיב הלא-משמר הזה ליחידת מטען היא הכא"מ.
- ד. דיון מפורט יותר ניתן למצוא בספרות. חשוב לציין שפותחו ניסויים רבים הממחישים את גרדיאנט מטעני השפה לאורך המוליך באמצעות נייר מוליך (או נגדים גדולים בחיבור טורי).

מודל דרודה

חשוב להדגיש את הנחות המודל ומגבלותיו ולהבהיר לתלמידים שדיון מעמיק יותר בהולכה מצריך כלים שאין ברשותם בשלב זה.

יישומים פשוטים של מעגלים חשמליים (2 שעות)

- א. אחת הבעיות בלימודי האלקטרומגנטיות היא שהתלמידים אינם מבינים כי הנושא הוא קונקרטי בחיי היום-יום. דיון בשימושים יום-יומיים במעגלים חשמליים יתרום להבנת התאוריה ויגביר את העניין בנושא.
- ב. יישומים בסיסיים הם פוטנציומטרים המשמשים כפתור בקרה לעצמת קול במכשירים ביתיים (כפתור ה"ווליום"), וסתי מהירות של מאווררים, גופי חימום בתנורים חשמליים ועוד.
- ג. יישומים נוספים הם שינויים בממדי הנגדים כתוצאה מחימום המשמשים תרמוסטטים (דו-מתכת), נגדים משתנים המשמשים מדי-מפלס של נוזלים ועוד.

טיפול כמותי בטעינה ופריקה של קבל (2 שעות)

- א. ניתן לראות כי קבוע הזמן RC הוא פרק הזמן שבו הקבל היה מגיע לפריקה מלאה אילו תהליך הפריקה היה מתבצע בזרם קבוע (הזרם I_0 שבו הפריקה החלה).
- ב. כדאי לבצע ניסויים המציגים את האנרגיה האגורה בקבל והמדגימים טעינת קבל בקצב קבוע (בעזרת ריאוסטט גדול) כדי להראות שהמתח על הקבל הוא פרופורציוני למטענו.

ג. גרף $\ln(I)$ המתקבל כקו ישר, מאפשר חישוב מידי של הזמן RC ומראה כי התהליך הוא מעריכי. יש לשים לב כי תלמידים שאינם שולטים די צורכם בתכונות הפונקציה הלוגריתמית, עלולים להגיע למסקנה שגויה כי הזרם הוא ביחס ישר לזמן!

מכשירי מדידה (2 שעות)

- א. כדאי להציג בפני התלמידים קריאת מד-מתח בעל התנגדות פנימית ידועה, לעומת התוצאה שהייתה מתקבל אילו מד-מתח היה אינדאלי.
- ב. ניתן להדגים הרחבת תחומי מדידה בעזרת מכשירי מדידה אנלוגיים.

4. השדה המגנטי

תכונות מגנטיות של חומרים (1 שעה)

יש להסביר באופן כללי מהם חומרים דיא-מגנטיים, פרה-מגנטיים, פרו-מגנטיים ולהסביר באופן איכותי כיצד תכונות אלו נובעות מהתכונות המגנטיות של האטום.

שדות מגנטיים (1 שעה)

- א. מהדמיון המתמטי שבין נוסחת השדה החשמלי של תיל ישר וארוך לבין הנוסחה של שדה מגנטי שיוצר תיל אין-סופי הנושא זרם, ניתן להסיק את חוק ביו-סבר.
- ב. בעזרת חוק ביו-סבר ניתן לחשב את השדה במרכז כריכה מעגלית.
- ג. ניתן להמחיש שימוש של חוק אמפר על-ידי חישוב השדה המגנטי במרכז סילונית, טורוס, או מישור אין-סופי.

אפקט הול (3 שעות)

- א. אפקט הול יכול להוות פתיחה יפה להוראת הנושא "כא"מ מושרה".
- ב. רצוי להסביר לתלמידים באופן איכותי את המקור ל"מתח הול". יש לפתח את הנוסחה למתח ולהסביר מדוע מתח הול גדל ככל שצפיפות נושאי המטען קטנה.
- ג. ניתן להראות כיצד כיוון המתח תלוי בסימנם של נושאי המטען.
- ד. ניתן להיעזר בניסויים המבוססים על Hall-probe למדידת שדה מגנטי של סילונית או תיל. בהקשר זה כדאי לציין לתלמידים כי חיישן השדה המגנטי בניסויי המעבדה הממוחשבת מבוסס על שיטה זו.

5. השראה אלקטרומגנטית

מנגנונים להיווצרות כא"מ מושרה (4 שעות)

- א. את השטף המגנטי ניתן לשנות בשני אופנים: האחד, על-ידי שינוי השטח שבו עובר השדה המגנטי, והשני, על-ידי שינוי עוצמת השדה המגנטי.
- ב. השדות החשמליים הנוצרים בכל אחד משני האופנים, שונים במהותם זה מזה. במקרה הראשון, המנגנון להיווצרות השדה החשמלי הוא כוח לורנץ, הנובע מהתנועה היחסית שבין המטענים לשדה המגנטי, והגורם להפרדת מטענים במוליך. מטענים אלו יוצרים שדה חשמלי משמר. המנגנון השני הוא שדה חשמלי בעל אופי רוטציוני לא-משמר (קווי שדה סגורים), הנוצר במהלך השינוי בשדה המגנטי, והוא המניע את נושאי המטען במוליך.
- ג. הבטטרון יכול להוות דוגמה לשימוש בשדה חשמלי רוטציוני.
- ד. יש מקרים שבהם לא ניתן להסביר את היווצרות הכא"מ באמצעות חוק פארדיי – למשל במקרה של מחולל פארדיי (דיסקה המסתובבת בשדה מגנטי). במקרה זה יש לחפש את המקור לכא"מ באחד מהמנגנונים שהוזכרו לעיל (כוח לורנץ).

השראות עצמית, האנרגיה האגורה בשדה מגנטי של סליל (2 שעות)

- א. במסגרת לימודי החובה קיבלו התלמידים הסבר איכותי של התופעה. במסגרת הרחבה זו יש להציג את הנוסחה $\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$ ולהסביר את מקורה.
- ב. כדוגמה, ניתן לחשב את ההשראות העצמית של סילוניית כדי להראות שההשראות היא גודל התלוי במבנה של הסליל.
- ג. ניתן להיכנס לעומק התיאור המתמטי של הזרם במעגל RL ולהשוות את התוצאה למקרה של מעגל RC.

היבטים יחסותיים של השדה המגנטי (1 שעה)

מורה המלמד "מערכות ייחוס" או "תורת היחסות" כפרק בחירה, מוזמן לדון בהיבטים יחסותיים של השדה החשמלי והשדה המגנטי ולהראות לתלמידים כיצד תופעות שהן מגנטיות מנקודת מבט של צופה אחד, יתפרשו על-ידי צופה שני כתופעות חשמליות, ולהפך.

קרינה וחומר

הקדמה לקרינה וחומר

עקרונות כלליים

הנושא "קרינה וחומר" הוא נושא החובה השלישי בתכנית הלימודים המוצגת כאן לצד הנושאים "מכניקה" ו"אלקטרומגנטיות". חלוקת "קרינה וחומר" לנושאי-משנה שונה מעט מהחלוקה המסורתית שהיא: "אופטיקה גיאומטרית", "תורת הגלים", "אופטיקה פיזיקלית" ו"פיזיקה מודרנית"; מטרת החלוקה החדשה היא להקל על הקישור והגישור בין תת-הנושאים השונים, כגון בין אופטיקה גאומטרית לאופטיקה פיזיקלית ובין אופטיקה פיזיקלית לפיזיקה מודרנית.

בתכנית הלימודים המוצגת כאן, הנושא "קרינה וחומר" מחולק מבחינה תוכנית לשני נושאי-משנה:

א. התפתחות חקר האור (פרקים 1 – 3).

ב. התפתחות חקר מבנה החומר (פרקים 4 – 7).

בכל אחד משני נושאי-המשנה הללו מומלץ לפתוח בהצגת תופעות בסיסיות: בהקשר לאור – בתופעות כגון החזרה ושבירה; בהקשר למבנה החומר – בתיאור של גילוי האלקטרון והספקטרום הניסויי של אטום המימן.

לאחר הצגת התופעות הבסיסיות, בכל אחד משני נושאי-המשנה, מומלץ לבנות מודל. המושג "מודל" (או "תאוריה") הוא מושג מרכזי במדע, ומרכזיותו מודגשת בלימוד שני תת-הנושאים של "קרינה וחומר". המודל הראשוני עבור האור הוא המודל החלקיקי שפותח על-ידי ניוטון. המודל הראשוני לגבי מבנה החומר הוא מודל "האבטיח וגרעיני האבטיח" (או "עוגת הצימוקים") שפותח על-ידי תומסון. לאחר שבונים את המודל הראשוני מנסים, להסביר בעזרתו את התופעות הבסיסיות שנדונו קודם ולנבא תופעות חדשות. כאשר יש התאמה בין ניבויי המודל לבין תוצאות הניסויים – מצטרפות למודל עובדות חדשות; כאשר אין התאמה – שוקלים לערוך שינויים במודל, לתקנו, או אף לבנות מודל חדש.

לצד הצגה זאת, המדגישה את ההיבט המדעי של הטיפול בנושא "קרינה וחומר", חשוב להציג גם את הרלוונטיות של הנושא לחיי היום-יום הן בתופעות טבע והן ביישומים טכנולוגיים.

בבניית תוכני הלימוד יש לזכור כי אחת המטרות המרכזיות של הנושא "קרינה וחומר" היא להביא את התלמיד להיכרות, לפחות בסיסית, עם מושגים ראשוניים של תורת הקוונטים – הן בהקשר לאור, והן בהקשר למבנה החומר. נביא לדוגמה את אחד המאפיינים המובהקים של הפיזיקה

הקוונטית מראשיתה - מושג הדואליות "חלקיק-גל", שתחילתו בדואליות של האור (פלאנק 1900; איינשטיין, 1905) והמשכו בדואליות של החלקיקים היחומריים (דה-ברויי, 1924). כדי להבין את תופעת הדואליות יש להכיר את ההתנהגות הגלית ואת המושגים הקשורים בה (סופרפוזיציה, התאבכות בונה והורסת וכדומה), והדבר מחייב מידה של עיסוק מקדים בתופעות גליות – במיוחד באור.

התפתחות חקר האור

אופטיקה גאומטרית

דיון בתורה הגלית של האור אי-אפשר לנתק לחלוטין מן המודל של האופטיקה הגאומטרית, ומכאן שיחידה העוסקת ב"קרינה וחומר" אמורה לכלול גם מושגי יסוד באופטיקה גאומטרית. גם במסגרת המצומצמת הנדרשת, ראוי לשים לב להיבטים חשובים בהוראת האופטיקה הגאומטרית. הנושאים שידונו הם: אפיון האור באמצעות קרניים, תופעות של החזרה ושבירה, עדשות דקות ויצירת דמויות. אמצעי ההמחשה יהיו ניסויי מעבדה, שימוש בסרטונים במסגרת מודל הקרניים ופתרון בעיות תוך שימוש בנוסחאות (לא לינאריות). ידוע לנו כי מודל הקרניים, שהוא הכלי הדידקטי המרכזי, סובל מכשלים בהבנה, והנושא יידון במסגרת ההערות הדידקטיות. נציין כי שימוש בהדמיות מחשב עשוי לעזור באופן חלקי, והתלמיד אינו נדרש להתמחות בפתרון בעיות מורכבות.

מודל הגלים המכניים ומודל הגלים האלקטרומגנטיים

לימודי הגלים אמורים לכוון את התלמיד להכרת הגלים האלקטרומגנטיים. ברור שלא נוכל לגשת ישירות לגלים אלקטרומגנטיים, ולכן יש להתחיל את לימוד הנושא בדוגמה פשוטה של גל מכני: הפרעה רוחבית במיתר חד-ממדי. במסגרת זו אפשר לדבר על מהירות הגל, תדירות, אורך-גל, החזרה וסופרפוזיציה. אין מקום במסגרת הזאת לטפל גם בגלי קול. אלה נמצאים כיום בסטטוס של "הרחבה והעמקה", וכל המעוניין, ראוי שיעסוק גם בהם. (העיסוק בגלי קול מעניין כשלעצמו ועשוי לבסס את הבנת מושג הגל.)

בדרך כלל, הדיון הראשוני בגלים בשני ממדים יעסוק בהתפשטות של הפרעה על פני מים ויכול הצגת התאבכות בשני ממדים והצגת עקיפה. לאחר התוועדות לאופי הגלי בממד אחד ובשני ממדים, תבחן תופעת התפשטות האור, ויסתבר כי יש בה היבטים גליים. בסיום הוראת הפרק יש להבהיר את המודל האלקטרומגנטי של האור ולהכיר את התחומים השונים של הספקטרום האלקטרומגנטי.

הדיון בשני המודלים (המודל הגאומטרי והמודל הפיזיקלי) מחייב התייחסות לאופי האור ולשאלות הבאות: האם שני המודלים חיים בשלום? האם האחד הוא מקרה גבולי של השני? באיזה מובן? האם האופטיקה הגאומטרית מייצגת מודל חלקיקי? בסיום לימודי הגלים ראוי לחדד בפני התלמיד את

הפער המהותי בין ההתנהגות החלקיקית להתנהגות הגלית: מה קורה כאשר שני חלקיקים מגיעים לאתר משותף, ובמה זה שונה מן המתרחש כאשר שני גלים מגיעים לאותו מקום? במה נחלקו ניוטון והויגנס? מה הביא בתחילת המאה ה-19 להכרעה לטובת האופי הגלי של האור? מה מקומו של האור ביחס לכלל הקרינה האלקטרומגנטית? את הוראת חקר האור יש לסיים במודל הדואלי של האור.

התפתחות חקר החומר

לאחר לימוד ההתנהגות הגלית ותכונות האור בפרט והקרינה האלקטרומגנטית בכלל, אפשר לגשת אל הוראת הפיזיקה של המאה ה-20. הדבר יעשה על פי השלבים האלה:

(א) האופי המקוונטט והדואלי של האור (האפקט הפוטואלקטרי, אפקט קומפטון ויצירת קרינת X; המודל הדואלי של הקרינה האלקטרומגנטית).

(ב) הסבר הספקטרום הבדיד של אטום המימן על-ידי בוהר, ומשמעות הדבר באשר למבנה רמות האנרגיה של האלקטרון (מגילוי האלקטרון ומודל רתרפורד ועד ניסוי פרנק הרץ).

(ג) דואליות החומר: גלי דה-ברויי, הפירוש ההסתברותי לגל, ניסויי התאבכות בחלקיקים בודדים, עקרון אי-הוודאות.

(ד) פיזיקה גרעינית ומבוא לחלקיקים יסודיים: מרכיבי הגרעין, הכוח החזק, התפרקות רדיואקטיביות ותהליכים גרעיניים אחרים, אנרגיית קשר גרעינית ותהליכי ביקוע והיתוך גרעיני. הגדרת חלקיק יסודי, ספין, פרמיונים ובוזונים, אנטי חלקיקים, מודל הקוורקים.

הדיון בפיזיקה המודרנית לא יכול בעיות שמצריכות טכניקה חישובית מתקדמת. העקרונות שיודגשו הם אלה: התפתחות הפיזיקה הקוונטית בתחילת המאה ה-20 בהקשר לגילוי האופי הדואלי של האור ושל חלקיקי החומר; בעיית קווי הספקטרום הבדיד והקשר שלה למבנה האטום; המגבלות שהפיזיקה הקוונטית מטילה על הידע הפיזיקלי כפי שהן מתבטאות באופי הסטטיסטי ובעקרון אי-הוודאות.

הוראה בכיתה י

בכיתה י אפשר ללמד את רובו של תת-הנושא הראשון – התפתחות חקר האור ואת חלקו של תת הנושא השני – חקר מבנה החומר, במסגרת נושאי היסוד בפיזיקה. יהיה צורך להשלים בכיתה י"ב את הוראת ההיבטים המורכבים יותר מבחינה מושגית ומבחינה מתמטית, כולל מושגים שנסמכים על לימודי המכניקה והחשמל. בתכנית הלימודים מוקצים לנושאי היסוד כ-60 שעות, כפי שמפורט

במבוא הכללי. אולם, קצב הלימוד בכיתה י' נמוך מאשר בכיתות י"א ו-י"ב ואף תלוי במידת ההטרונגניות של הכיתה. לכן, מן הסתם, יהיה צורך בהשלמות מתאימות בכיתה י"ב.

אמצעים דידקטיים

בניגוד ללימודי המכניקה והחשמל, הטיפול המתמטי ברוב הנושאים הקשורים לגלים ולתורת הקוונטים הוא מורכב מדי עבור תלמידי בית הספר התיכון. לכן האמצעים הדידקטיים העיקריים להוראת נושאים אלה, במיוחד בכיתה י', הם סרטונים, ניסויים והדמיות מחשב (בנושאים שבהם אי-אפשר לערוך ניסויים). יש להרבות בסרטונים כאשר עוסקים בייצוג מהלך האור על-ידי קרניים, בעקרון הסופרפוזיציה ובתופעות של עקיפה והתאבכות.

רלוונטיות לחיי היום-יום

הרלוונטיות של הנושא "קרינה וחומר" לחיי היום-יום תוצג באמצעות מגוון תופעות טבע ויישומים טכנולוגיים:

תופעות טבע: צל, יום ולילה, עונות השנה, מופעי הירח, ליקויי מאורות, השתקפות במראה, תופעת "העיפרון השבור" (עיפרון הטבול חלקו במים, נראה שבור), תופעת "הכביש הרטוב" בקיץ (פטה-מורגנה), אפקט החממה באטמוספירה, "החור באוזון", גוון השמים במשך היום, גוון השמש בעת השקיעה והזריחה.

יישומים טכנולוגיים: סיבים אופטיים, חממות חקלאיות, יצירת דמות על-ידי עדשה, נורות פלורסצנט, שלט רחוק של מכשירים כגון טלוויזיה. יישומים בפיזיקה מודרנית: הלייזר, קרינת רנטגן ושימושיה ברפואה ובתעשייה, כורים גרעיניים, שימוש באיזוטופים רדיואקטיביים לתארוך ולאבחון.

חלוקה לפרקים ושעות מומלצות

שעות מומלצות	שם הפרק	מס' הפרק
19	תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים	1
6	המושג "מודל", תפקידיו, המודל החלקיקי של האור	2
28	גלים מכניים ואלקטרומגנטיים	3
8	מבוא לתורת הקוונטים - המודל הדואלי של האור	4
17	מבנה האטום	5
7	מבוא לתורת הקוונטים - דואליות החומר	6
14	הגרעין ומבוא לחלקיקים יסודיים	7
99	סה"כ	

פרק 1 : תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים

שעות	הנושא
3	1.1 ראיית עצמים, אפיון האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים
4	1.2 החזרת אור : חוקי ההחזרה, דמות במראה מישורית
7	1.3 שבירת אור : חוקי השבירה, החזרה חלקית ומלאה
5	1.4 עדשות כדוריות דקות : מהלך האור ויצירת דמויות
19	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
3	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמות: מבנה העין; יצירת דמות של הנוף המשתקף מחלון (על מסך כגון קיר) באמצעות עדשה. - הדגמה: הצגת מקורות אור שונים. - הדגמה: חיתוך בין שתי אלומות אור. - הדגמה: הצגת אלומות אור שונות והצגת הקשר בין תבניות האור לייצוג הגרפי. - הדגמה: היווצרות צל וצללית. 		<ul style="list-style-type: none"> - מבנה העין ותנאים לראייה. - מקורות אור וגלאי אור. - אפיונים ראשוניים למהות האור: אור כנושא אנרגיה, התפשטות וכיווניות (יצירת צל), בדיקת אינטראקציה בין אור לאור ובין אור לחומר, אפיון גופים לפי תגובתם לאור (החזרה, בליעה, העברה), האם לאור יש מסה? ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים: • הכרת המושגים: "מקור אור נקודתי", "קרן", "אלומה" ואפיון אלומות אור שונות. • שימוש בתרשימי קרניים לאיתור צל. 	1.1 ראיית עצמים, אפיון האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים
4	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה: החזרה של אלומה צרה ואלומה מתפזרת. - הדגמה: המחשת המושג "דמות מדומה" ואיתור מקומה (בעזרת מראה מישורית ושני נרות). 	זווית פגיעה = זווית החזרה	<ul style="list-style-type: none"> - מושגים: "קרן פוגעת", "קרן מוחזרת", "אנך למישור המראה", "זווית הפגיעה", "זווית ההחזרה". חוקי ההחזרה. - "דמות" של עצם במראה מישורית: <ul style="list-style-type: none"> • בניית מהלך האור ואיתור הדמות של עצם נקודתי. • הקשר בין רוחק העצם הנקודתי לרוחק דמותו. • בניית דמות של עצם קווי. • התנאים לראיית "דמות מדומה", "שדה ראייה". 	1.2 החזרת אור: חוקי ההחזרה, דמות במראה מישורית

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
7	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה: שינוי מהלכה של אלומת אור צרה הפוגעת במשטח גבול בין תווכים שקופים (אוויר/נוזל/ מוצק). - ניסוי: חקירת תלות זווית השבירה בזווית הפגיעה. - הדגמה: ראיית מוט זכוכית בתוך אוויר ומים ו'היעלמותו' בגליצרול. - הדגמה: החזרה מלאה במנסרה ובסיב אופטי. - הדגמה: נפיצה במנסרה. 	$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$	<ul style="list-style-type: none"> - התופעות המלוות את פגיעת האור במשטח גבול בין תווך שקוף אחד למשנהו: אור מוחזר ואור מועבר. - חוקי השבירה. - המושג "מקדם השבירה" של חומר ביחס לריק. - המושג "זווית גבול", תופעת "ההחזרה המלאה". - מעבר אור במנסרה, "זווית ההסחה". - תופעת ה"נפיצה" ומשמעותה. 	<p>1.3</p> <p>שבירת אור: חוק השבירה, החזרה חלקית ומלאה</p>
5	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה: עדשות כדוריות שונות – מבנה ומוקד. - הדגמה: מהלך 'קרן', אלומה מקבילה ואלומה מתפזרת בעדשות מרכזות ומפזרות. - ניסוי: חקירת עדשה מרכזת - הקשר שבין מיקום עצם למיקום הדמות ואופייה. 	$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ $\frac{H_i}{H_o} = \frac{ v }{ u }$	<ul style="list-style-type: none"> - אפיון צורני של עדשות כדוריות. - מושגים: "ציר אופטי", "מוקד עדשה", "רוחק מוקד", "קרניים מיוחדות". - דמותו של עצם בעדשה מרכזת ומפזרת: איתור מקום הדמות בעזרת 'קרניים מיוחדות', סרטוט מהלך קרן כלשהי, סימון שדה הראייה. - "הגדלה קווית". 	<p>1.4</p> <p>עדשות כדוריות דקות: מהלך האור ויצירת דמויות</p>

תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים: פירוט, דגשים, הערות דיזקטיות

מבוא

פרק זה הוא הראשון בשבעה פרקים המרכיבים את תכנית הלימודים ביחידת הלימוד "קרינה וחומר". מטרתו העיקרית להכין את תשתית הידע והמיומנויות ולעורר סקרנות לגבי מהות האור. הרעיונות המרכזיים של הפרק יידונו שוב במסגרת בניית מודלים של האור וחיפוש הסברים לתופעות במסגרת המודל החלקיקי, המודל הגלי והמודל הדואלי. באופן זה יתאפשר לתלמידים להפנים את הרעיונות בלמידה ספירלית.

בעת לימוד הפרק יש לצמצם את העיסוק בפתרון בעיות חישוב ולהימנע מדיון במערכות אופטיות מורכבות, כדוגמת אלה שאפיינו את יחידת הבחירה "אור וגלים" (מערכת של שתי עדשות, מערכת של עדשה ומראה וכו'). הדיון במערכת אופטית המורכבת משתי מראות מישוריות יצטמצם למקרים בהן המראות מאונכות או מקבילות זו לזו. מומלץ לעסוק בתופעות אופטיות המוכרות מחיי היום-יום ובתופעות טבע מוכרות ופשוטות - כגון העובדה שכפית הטבולה בכוס ובה נוזל נראית שבורה, השתקפות עצים במי אגם, מופעי הירח, ליקוי לבנה וליקוי חמה - בפרט כשקהל היעד מורכב מכלל התלמידים שיתמחו במדעי הטבע והחומר נלמד במסגרת נושאי היסוד בכיתה י'.

מקומו של הפרק, תכניו ומטרות ההוראה

בפרק זה יכירו התלמידים תופעות יסודיות הקשורות באור, במקורותיו ובאופן התפשטותו. הפרק מציג את הרעיון שמערכת אופטית כוללת מקורות אור ורכיבים אופטיים שונים (כמו מחסום, מראה, מנסרה, עדשה), וכן מתאר כיצד מהלך האור נקבע על-ידי מאפיינים חומריים וצורניים של רכיבי המערכת. בפרק תיושם שיטה לייצוג מהלך האור הנקראת: "ייצוג באמצעות קרניים" (מכונה לעיתים "מודל הקרניים").

לפרק מספר מטרות:

- א. הכרת תופעות הקשורות בהפקת אור ובהתפשטותו.
- ב. קישור בין חוויות ויזואליות (ראיית מקורות אור, עצמים ודמויות) לבין מהלך האור.
- ג. הכרת רכיבים אופטיים בסיסיים ושימוש בהם לביצוע ניסויים פשוטים במעבדה.
- ד. הכרת שיטת ה"ייצוג באמצעות קרניים": שיטה גרפית לייצוג מקורות אור, רכיבים אופטיים ומהלך האור.

ה. יישום השיטה "ייצוג באמצעות קרניים" להסבר תופעות ולפתרון בעיות פשוטות (בסרטוט ידני ובאמצעות תוכנת הדמיה).

ו. פיתוח סקרנות והצגת שאלות ותהיות ביחס למהות האור.

בפרק יידונו מספר תופעות מרכזיות הקשורות באור. תופעות אלו ישמשו בסיס עובדתי לבניית מודלים עבור האור בהמשך לימוד היחידה "קרינה וחומר":

א. אור נפלט מגופים הנקראים "מקורות אור" ומתפשט במרחב.

ב. אור הוא סוג של "אנרגיה".

ג. פליטת אור אינה מלווה (ככל הנראה) בשינוי משקלו של מקור האור.

ד. אור המתפשט בתווך אחיד נע לא שינוי כיוון ('בקווים ישרים').

ה. שתי אלומות אור הנחתכות אינן משפיעות זו על זו.

ו. האור משנה את כיוון התפשטותו בשני תהליכים - "החזרה" ו"שבירה", המתרחשים במשטח גבול בין תווכים שונים.

ז. תופעת ה"החזרה" מקיימת את החוקים הבאים:

(1) הקרן המוחזרת נמצאת במישור שנקבע על-ידי הקרן הפוגעת והאנך למשטח המחזיר, בנקודה שבה הקרן פוגעת.

(2) זווית ההחזרה שווה לזווית הפגיעה.

ח. תופעת ה"שבירה" מקיימת את החוקים הבאים:

(1) הקרן הנשברת נמצאת במישור שנקבע על-ידי הקרן הפוגעת והאנך למשטח הגבול, בנקודה שבה הקרן פוגעת.

(2) זווית הפגיעה וזווית השבירה מקיימות את חוק סנל.

ט. תהליך השבירה תלוי גם בצבע האור הפוגע - תופעת ה"נפיצה".

ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים: רעיונות מרכזיים וקשיים אופייניים

של תלמידים

הרעיונות המרכזיים

פרק זה עוסק בתופעות אחדות הקשורות לאור הנראה, שאפשר לתאר אותן (בקירוב) באמצעות ייצוג גרפי הידוע כ"ייצוג מהלך אור באמצעות קרניים". גישה זאת מכונה גם "אופטיקה גאומטרית".

במסגרת המודלים הגליים של האור, התלמיד יעמוד על כך שהאופטיקה הגאומטרית אינה אלא קירוב של מודל גלים, במצבים שבהם אפשר להזניח את תופעות העקיפה.

השימוש ב'קרניים' מאפשר **ייצוג של התפשטות האור במרחב והצגת שינויים בכיוון התפשטות האור** כתוצאה מאינטראקציה עם גופים שונים. התפשטות אור במרחב מתוארת על-ידי **אלומות אור** מתפזרות, מתכנסות או מקבילות. פרק זה עוסק בשלוש תופעות באור מבחינת השפעתן על התפשטותו: **בליעה, החזרה ושבירה**. הגופים שאתם האור מבצע אינטראקציות קרויים **רכיבים אופטיים**.

מקורות אור הם גופים שבהם מתבצעת התמרה של אנרגיה מושקעת כלשהי ל**אנרגיית אור**. קיימים מנגנוני התמרה מגוונים, ובהתאם לכך מקורות אור שונים. **מקור אור נקודתי** מוגדר כנקודה גאומטרית, שממנה מתפשט אור לכל הכיוונים בסימטרייה כדורית. התפשטות האור מיוצגת על-ידי **'קרניים'** (קווים מכוונים) המתפזרות באופן רדיאלי ממקור האור הנקודתי. כל קרן מייצגת כיוון התפשטות של האור. גזרה מרחבית של 'כדור האור' קרויה "אלומה" (מתפזרת או מתכנסת). כל מקור אור מורחב (מציאותי) מהווה אוסף אין-סופי של מקורות נקודתיים. שימוש במקור אור המפיק אלומת קרניים מקבילות, מאפשר ניתוח היבטים מרכזיים של האינטראקציה של האור עם רכיבים אופטיים, כגון הגדרת מוקד.

האור הנראה מתגלה על-ידי **גלאי אור** - מכשירים שבהם אנרגיית האור הופכת לאנרגיה אחרת, היוצרת אפקט שמאפשר תצפית. **העין** האנושית היא גלאי אור הרגיש לשינויים בעצמת האור ובצבעו.

קשיי תלמידים בייצוג מהלך אור באמצעות קרניים ובפתרון בעיות בנושא זה

ייצוג באמצעות קרניים מאפשר תיאור מסוים של המציאות האופטית לצורך הסבר תופעות, ניבוי תופעות ופתרון איכותי וכמותי של בעיות. כדי לקבוע באופן מלא את ההתנהגות של מערכת אופטית ולענות על שאלות כמו: "האם נוצרות דמויות?", "היכן נוצרות דמויות?", "מהיכן אפשר לראות את הדמויות?", "אילו סוגי דמויות נוצרים?", "האם יש הגדלה, ומהי?" - יש לתאר את מהלך אלומות האור במערכת. בתיאור כזה יש להתייחס לעצם (באמצעות אלומות האור המתפשטות ממנו), לתכונות הפיזיקליות של הרכיבים ולמיקום היחסי של העצם והרכיבים.

תלמידים מתקשים לעתים בשימוש נכון של הייצוג באמצעות קרניים, כפי שנפרט בהמשך. עם זאת, עיקר הקושי מתבטא בפירוש מציאותי נכון של תרשים הקרניים ובשימוש בתרשים כזה לפתרון בעיות במציאות.

המקורות המשוערים לקשיים אלה הם תפיסות מוקדמות של התלמידים (למשל, 'כדי לראות, העין שולחת מבט' [קו ראייה] אל העצם או אל מקור האור"), זלזול בצורך לדייק במימוש הייצוג באמצעות קרניים ואי-הכרה בכך שייצוג כזה יכול לשמש לפתרון בעיות וכן חיקוי בלתי מבחין של

'קיצורי דרך' שהמורה מיישם בעת הסרטוט על הלוח (למשל, צמצום האלומה לגזרה הרלוונטית לרכיב הנדון, אי-קישור בין מהלך האור ליצירת הדמות וראייתה, שימוש בקרניים מיוחדות בלבד).

להלן סוגים אחדים של קשיי תלמידים:

1. שגיאות הנוגעות לייצוג האור

- א. שימוש בקרן בודדת במקום באלומת קרניים.
- ב. היעדר סימון של כיוון התפשטות האור, או אי-התייחסות למשמעות הסימון כאשר הוא מופיע.
- ג. היעדר הבחנה בין קווים המשמשים לתיאור מהלך אור לבין קווי עזר גאומטריים.
- ד. התעלמות ממהלכו של אותו חלק באלומת האור שאינו מבצע אינטראקציה עם הרכיב המטופל. לדוגמה: במערכת המכילה מקור אור ועדשה - תיאור מהלך האור רק לאלומה הפוגעת בעדשה ולא לאור העובר סביבה.

2. שגיאות הנוגעות לייצוג האינטראקציה

- א. יישום 'קיצורי דרך' גאומטריים בלי לבדוק את תקפותם במערכת הנתונה. לדוגמה: במערכת של מקור אור, מראה מישורית ומחסום - קביעת מיקום הדמות ושדה הראייה שלה בלי לוודא שהאור ממקור האור אכן פוגע במראה.
- ב. התעלמות מהקשר בין גודלו המוגבל של הרכיב האופטי לבין תחום ההשפעה שלו על אלומת האור הפוגעת בו. לדוגמה: במערכת של שתי עדשות - ייתכן שאלומת אור שעברה בעדשה הראשונה, לא תפגע כלל בעדשה השנייה ועל כן לא תיווצר דמות נוספת.
- ג. ייצוג חלקי של האור המבצע אינטראקציה עם הרכיב. לדוגמה: ייצוג מהלכו של 2-3 'קרניים מיוחדות' בעדשה בלי לדעת שמהלך דומה מתקיים לכל הקרניים הפוגעות בעדשה. דוגמה נוספת: בתיאור מעבר אור מאוויר לזכוכית - התעלמות מייצוג האור המוחזר.
- ד. ייצוג שגוי של תוצאת האינטראקציה עם רכיב נתון. לדוגמה: בתיאור מעבר אור מאוויר לזכוכית – מסרטטים את הקרן הנשברת באותו צד של האנך שבו סורטטה הקרן הפוגעת. דוגמה נוספת: בייצוג מהלך אור העובר במנסרה משולשת - סימון שגוי של האנכים או מדידה שגויה של זוויות.

3. שגיאות הנוגעות לייצוג ראייה

- א. אי-יכולת להראות את האלומה הספציפית המגיעה לעין נתונה.
- ב. התייחסות לשאלה "האם בייצוג הנתון מסורטט קרן שאכן מגיעה לעין?" במקום לשאלה "האם לעין הנתונה יכולות להגיע קרני אור ממקור האור הנתון?".
- ג. הכרעה בשאלות ראייה באמצעות קריטריון יחיד: אפשרות חיבור קו ישר בין העין לנקודה הנדונה.

4. שגיאות הנוגעות לייצוג מושגים

- א. ייצוג דמות על-ידי מפגש בין קרניים לפני האינטראקציה עם הרכיב, לבין קרניים אחרי האינטראקציה עם הרכיב.
- ב. ייצוג דמות על-ידי מפגש בין קרניים שמקורן בעצמים נקודתיים שונים.

5. קשיים נוספים של תלמידים

תלמידים רבים מתקשים בפתרון בעיות בתחום הבנת הנקרא, בקישור בין סיפור המעשה לידע הפיזיקלי ובבקרת הפתרון. כמו כן, תלמידים רבים (בעיקר בכיתה י) מתקשים באלגברה ובגאומטריה, וקשיים אלה משתקפים בשגיאות בפתרון בעיות כמותיות. השימוש בפונקציות טריגונומטריות לצורך חוק סנל או לפתרון בעיות שונות, מוסיף קושי לתלמידים שיכולתם המתמטית עדיין אינה מפותחת.

תלמידים קושרים את מופעי הירח לליקויי לבנה וחמה, את עונות השנה - להבדל מרחק הארץ מן השמש בקיץ ובחורף, ואת האור המגיע מכוכבים - כאור השמש המוחזר מן הכוכבים. יש לטפל בתפיסות שגויות אלה.

1.1 ראיית עצמים, אפיון האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים (3 שעות)

מבנה העין ותנאים לראייה

- א. מומלץ לפתוח את הפרק בשאלה "האם רואים אור?" ולהגיע להבנה שאי-אפשר לראות אלומת אור הנעה במרחב ואינה חודרת לעין. ניתן להדגים זאת, למשל, באמצעות אלומת לייזר הנעה לרוחב הכיתה. יש לעמוד על כך שבתופעות שבהן רואים לכאורה אלומות אור - כגון בערפל - רואים למעשה את חלקיקי הערפל באמצעות האור המוחזר מהם.
- ב. יש להדגיש את תפקוד העין כרכיב שמאפשר חדירת אור דרך האישון ויצירת 'תמונה' בעזרת העדשה. כדאי להדגים זאת בכיתה בעזרת דגם של העין או בעזרת עדשה ומסך.

- ג. יש לעמוד על כך שהתנאים לראות עצם מסוים הם אלה: העצם מפיץ אור, האור חודר לעין דרך האישון ומגיע לרשתית, אותות חשמליים עוברים בעצבי העין למוח.
- ד. יש להתייחס לתפיסות שגויות של התלמידים, למשל: "כדי לראות, העין שולחת 'מבט' (קו ראייה) אל העצם או מקור האור".
- ה. יש לדון בשאלה "מדוע אי-אפשר לראות אלומת אור באמצעות אלומת אור המוטלת עליה?" (בשונה מקיר שאפשר לראותו באמצעות אלומת אור המוטלת עליו).

מקורות אור וגלאי אור

- א. חשוב לבדוק באמצעות שאלון או דיון כיתתי מהו הידע המוקדם של התלמידים על ייצוג האור ותופעות אופטיות פשוטות. אפשר לעורר דיון בשאלות כמו "היכן יש אור בחדר?", "מה פירוש לראות את הפרח?", "מה אפשר לראות במערה בלתי מוארת?", "מה אני רואה במראה?".
- ב. מומלץ להציג מקורות אור שונים ולציין שהכוכבים הם מקורות אור. כדאי למיין מקורות אור שונים לפי מנגנון המרת אנרגיה, צבע אופייני וספקטרום ולהתייחס למושג "האור הנראה".
- ג. כאן ניתן לאזכר את פעולת העין כגלאי אור ואת תפקיד הרשתית.
- ד. אפשר לאפיין גופים לפי השפעתם על האור: **בליעה, החזרה, העברה.**
- ה. הדיון במקורות אור ובראייה חשוב לבניית המודל של האור כ'דבר' שנע ומתקדם ממקור האור לכיוונים שונים.

אפיונים ראשוניים למהות האור

- א. כדאי להסביר כי לאור מהירות והוא מתפשט גם בריק.
- ב. ראוי להדגיש שהצל קיים במרחב, לעומת הצללית שמופיעה על משטח.
- ג. הדיון בהתהוות הצל וצורתו (ובפרט השוליים החדים של הצללית) חשוב לתפיסת האור כ'דבר' שמתפשט ב'קווים ישרים' ממקור האור לכיוונים שונים.
- ד. כדאי לאזכר את מופעי הירח, את ליקויי הלבנה והחמה.

ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים

- א. חשוב להבהיר ש'קרן' היא קו מכוון, המייצג כיוון התפשטות של האור ולא ישות פיזיקלית.
- ב. חשוב להמחיש את הקשר שבין מהלך האור במציאות לבין הייצוג באמצעות קרניים.

- ג. בכל פעם שמשתמשים בטכניקת הייצוג באמצעות קרניים, יש להדגים שימוש באלומות קרניים כלליות ולא רק באותו חלק של האלומה הפוגע ברכיב.
- ד. מומלץ להפעיל את התלמידים בפתרון בעיות פשוטות ולהימנע מחישובים המבוססים על דמיון משולשים. במקום זאת, כדאי לפתור בעיות כמותיות באמצעות תרשימים בקנה-מידה.

1.2 החזרת אור, חוקי ההחזרה, דמות במראה מישורית (4 שעות)

חוקי ההחזרה

- א. דיון מקדים: "אילו תופעות מצביעות על קיומה של תופעת החזרה של אור?", או "מה נוכל להסיק מהתופעות הבאות על השפעת המשטח על התפשטות האור (ראיית משטחים, סנוור באמצעות מראה, מראה כמחסום)?"
- ב. הדגמה באמצעות אלומת אור צרה (לייזר או אור לבן): החזרה כאינטראקציה המשנה את כיוון התפשטות האור. רצוי להדגים תחילה את מהלך האור המוחזר במרחב (על-ידי פיזור אבקת גיר) ולהסיק שיש מישור משותף לקרן הפוגעת, לקרן המוחזרת ולאנך למראה. לאחר מכן עוברים להדגמה על משטח מישורי ומגלים את הקשר שבין זווית הפגיעה לזווית ההחזרה.
- ג. רצוי להשתמש בהדמיה לייצוג מהלך אור בתהליך החזרה ולהדגים את ההבדל בין החזרה מסודרת והחזרה מפוזרת באמצעות אלומת אור מקבילה: במראה מישורית, אלומת אור מקבילה מוחזרת כאלומת אור מקבילה; במשטח מחזיר מחוספס (דף נייר, קיר לבן), אלומת אור מקבילה אינה מוחזרת כאלומת אור מקבילה.

דמות הנוצרת על-ידי מראה מישורית

יצירת דמות של עצם נקודתי

- א. מומלץ להדגים את ההחזרה של אלומת אור מתפזרת ממראה מישורית. מסמנים את גבולות האלומה הפוגעת ואת גבולות האלומה המוחזרת, מאתרים את מרכז האלומה הפוגעת ואת מרכז האלומה המוחזרת, ואז מקשרים בין המיקומים של מרכזי האלומות. חוזרים על תהליך זה לגבי מיקום שונה של מקור האור.
- ב. רצוי להשתמש בהדמיה לייצוג החזרה של אור ממקור נקודתי במראה מישורית. כדאי לשנות את המיקום היחסי של המראה ושל מקור האור.
- ג. חשוב להדגיש את הקשר שבין מהלך הקרניים לבין היווצרות הדמות, ולא להסתפק בקיצור הדרך "רוחק העצם שווה לרוחק הדמות". יש להימנע מדיון במצב שבו קיים מחסום בין מקור האור למראה מישורית.

ד. יש להתייחס לעצם קווי כאוסף גדול מאוד של עצמים נקודתיים.

התנאים לראיית דמות הנוצרת על-ידי מראה מישורית

- א. רצוי לבצע הדגמה של ראיית דמות מדומה של נר דולק ואיתור מקומה באמצעות שיטת "ביטול הפרלקסה".
- ב. יש להימנע מאמירות מסוג: "העין והמוח ממשיכים את הקרניים, וכך רואים דמות מדומה". כדי להבין את ראיית הדמות המדומה, יש להשוותה לראיית מקור אור או עצם ממשי. העין קולטת אלומת אור שמרכזה בעצם, ומרכזת אותה על הרשתית.
- ג. כדי לראות את הדמות הנוצרת במראה המישורית, העין צריכה להיות בתחום אלומת האור המוחזרת מהמראה - זהו שדה הראייה של הדמות. לעניין זה ניתן להדגים את "ניסוי הסיכות": איתור הדמות על-ידי זיהוי המיקום שבו 'נמצא' הדבר שמעורר תחושת ראייה. בניסוי זה, האיתור מתבצע על-ידי חיתוך קווי ראייה שמייצגים אור המוחזר ממראה.
- ד. כאמור במבוא, הדיון במערכת אופטית המורכבת משתי מראות מישוריות יתמקד רק במקרים שבהם המראות מאונכות או מקבילות זו לזו.

1.3 שבירת אור: חוק השבירה, החזרה חלקית ומלאה (7 שעות)

- א. רצוי להתחיל מאזכור תופעות המרמזות שהאור משנה את כיוונו במעבר בין סביבות שקופות. לדוגמה: עיפרון הטבול בכוס מים נראה שבור. אפשר להתחיל בהצגת תופעות מפתיעות, כמו 'המטבע הצף' או 'המקל השבור', ולדון במשמעות שלהן בהקשר למהלך האור העובר בין חומרים שקופים.
- ב. כאשר מדגימים מעבר אור מאוויר למים, יש להדגיש את קיומה של ההחזרה החלקית המתלווה לשבירה. כך נוכל להבין איך אדם רואה את דמותו משתקפת בחלון זכוכית ובו-בזמן רואה את העצמים בחוץ.
- ג. כאשר מסרטטים את גרף זווית השבירה כתלות בזווית הפגיעה, יש לשים לב שמשמעותו של הגרף העקום אינה רק היעדר קשר לינארי, אלא גם שזווית הסטייה גדלה עם זווית הפגיעה. רצוי למצות את המסקנות הישירות מהגרף לפני המעבר לגרף הסינוסים.
- ד. לא רצוי ללמד בהזדמנות זו את כל הפונקציות הטריגונומטריות. נסתפק בפונקציית סינוס, ובכיתות מתאימות נְתַרְגֵּל מעט. לפי רמת התלמידים, ניתן להחליף את פתרון הבעיות של חוק סנל בפתרון גרפי או בפתרון כמותי מקורב בזוויות קטנות. בשלב זה, מומלץ להיעזר בהדמיית מחשב.

- ה. יש להסביר את המושג זווית הסטייה, אולם אין צורך להוכיח בפירוט את נוסחת זווית הסטייה במנסרה. אם נותר זמן, אפשר להציג את הנוסחה ולהצדיק את מסקנותיה.
- ו. יש להדגים נפיצה במנסרה ולהסביר שזווית הסטייה של האור האדום קטנה מזווית הסטייה של האור הסגול.

1.4 עדשות כדוריות דקות: מהלך האור ויצירת דמויות (5 שעות)

אפיון צורני של עדשות כדוריות

- א. מומלץ לאפשר לתלמידים למשש עדשות בעלות משטחים שונים (דו-קמורות, קמורות מישוריות, דו-קעורות). פעולה כזאת תבליט את האופי התלת-ממדי של העדשה לעומת התרשים הדו-ממדי שלה.
- ב. המפתח להבנת מהלך האור בעדשות הוא הרעיון של סטייה שונה בכיוון האור הפוגע בנקודות שונות על פני העדשה. מבארים את הרעיון על-ידי הצגת העדשה כצירוף של מנסרות משולשות, בעלות זוויות ראש הולכות וגדלות, ומתן הסבר על סטיית אלומות שונות.

מושגי יסוד

- א. מומלץ להדגים מהלך של אלומת אור צרה הפוגעת באזורים שונים ולהראות את השוני בזווית הסטייה. בהקשר זה אפשר להציג את המושג "ציר אופטי" ראשי.
- ב. מומלץ להדגים מהלך של אלומת אור מקבילה בעדשה דו-קמורה ודו-קעורה ולהגדיר את המושג "מוקד" (ממשי ומדומה).
- ג. יש להראות כיצד המוקד מאפשר הגדרת מהלכן של 'קרניים מיוחדות'.

דמותו של עצם בעדשה מרכזת ומפזרת

- א. מומלץ להציע לתלמידים להתבונן דרך עדשות שונות בעצמים קרובים ורחוקים. בדרך זאת הם יגיעו באופן חווייתי להכרה שעדשות משנות את מהלך האור ושהמרחק בין העצם לעדשה משפיע על פעולת העדשה. אפשר להסתייע בתופעה שלפיה עיניים נראות גדולות או קטנות יותר כאשר מרכיבים משקפיים. ניתן לבצע זאת במהלך האפיון הצורני.
- ב. יש להדגים היווצרות דמויות ממשיות בעדשה מרכזת באמצעות "ספסל אופטי" ולחקור באופן איכותי וכמותי את הקשר בין מיקום העצם לאופי הדמות ולמיקומה.
- ג. יש לאפשר לתלמידים לערוך ניסוי של חקירת הדמות הממשית בעדשה מרכזת. לעיבוד התוצאות, מומלץ להשתמש בגיליון אלקטרוני.

- ד. במהלך ייצוג הדמות באמצעות קרניים, אין להסתפק באיתור מקום הדמות על-ידי 'קרניים מיוחדות' בלבד. יש להראות מהלכן של אלומות קרניים נוספות, המגיעות אל העדשה מאותה הנקודה על העצם. כמו כן יש להתייחס לשדה הראייה של הדמות.
- ה. מומלץ להשתמש בהדמיה כדי להציג את מודל הקרניים עבור מעבר האור בעדשות. אמצעי זה יחסוך זמן ומאמץ ויאפשר להציג את השינוי במיקום הדמות ואופיה כתלות בשינוי מרחק המוקד ובמיקום העצם.
- ו. יש לאפשר לתלמידים לחוות ראייה של דמות ממשית ללא מסך. דבר זה מחייב הצבת התלמיד במרחק של כחצי מטר מהדמות ומיקום ראשו של התלמיד כך שאלומת האור תפגע ממש בעינו. שימוש בלוח זכוכית מט או בדף נייר לאיתור הדמות, והזנתו בהדרגה, מקלים על התלמיד להתרכז בדמות.

פרק 2 : המושג "מודל", תפקידיו, המודל החלקיקי של האור

שעות	הנושא
2	2.1 המושג "מודל", תפקידי המודל
2	2.2 המודל החלקיקי של האור
2	2.3 ניבויי המודל החלקיקי של האור
6	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2			<ul style="list-style-type: none"> - הצגת עובדות יסודיות של האור (תמצית הפרק "תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים"). - הצגת המושג "מודל". - תפקיד המודל והצגת דוגמאות כגון: ארבעת היסודות של אריסטו, תאוריית הכבידה של ניוטון. 	2.1 המושג "מודל", תפקידי המודל
2	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה: שינוי כיוון של תנועת כדור המתגלגל על הרצפה, על-ידי הפעלת כוח רגעי בכיוון שונה מכיוון תנועתו. 		<ul style="list-style-type: none"> - בנייה ראשונית של המודל על סמך העובדה שלאור מקורות והוא מתפשט במרחב. - המשך פיתוח המודל כדי להסביר עובדות אלה: <ul style="list-style-type: none"> • מסתו של מקור הפולט אור אינה פוחתת. • אלומת אור מתפשטת בקווים ישרים. • שתי אלומות אור נחתכות אינן משפיעות זו על זו. • החזרת אור. • מעבר אור מתווך לתווך. • נפיצת אור. • אור כאנרגיה. 	2.2 המודל החלקיקי של האור
2	<ul style="list-style-type: none"> - צפייה בסרט "לחץ האור" (PSSC). 	<p>נוסחה אמפירית: $v=c/n$</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ניבוי המודל: אור מפעיל לחץ. - ניבוי המודל: מהירות האור בזכוכית גדולה מזו שבאוויר. - הצגת תוצאות אמפיריות של ניסויים (פוקו, מייכלסון) שבאמצעותם גילו כי מהירות האור בזכוכית קטנה מזו שבאוויר פי מקדם השבירה של החומר ביחס לאוויר. - מעמדו של המודל החלקיקי: ציון תופעות שאפשר להסביר באמצעות המודל ושל אלו שאי-אפשר להסביר באמצעותו. 	2.3 ניבוי המודל החלקיקי של האור

המושג "מודל", תפקידיו, המודל החלקיקי של האור : פירוט, דגשים, הערות דיסקטיות

2.1 המושג "מודל", תפקידי המודל (2 שעות)

- א. מומלץ לפתוח נושא זה בהצגת העובדות היסודיות על אודות האור שנלמדו בפרק הקודם. אם מלמדים את הנושא בכיתה י', לא מומלץ להציג את תופעות העקיפה וההתאבכות בשלב מוקדם.
- ב. יש לדון בשיטה המדעית של חקר בתחום מסוים : איסוף עובדות לגבי הנושא הנחקר, בניית מודל (בעזרתו ניתן להסביר את העובדות הידועות לגבי התחום הנחקר) והעלאת ניבויים מפורשים לגבי תוצאותיהם של תצפיות או של ניסויים עתידיים.
- ג. יש להדגיש כי לא קיים מודל מדעי "נכון". ככלל, תועלתו של מודל מדעי היא בהסבר עובדות ידועות ובניבוי תופעות או תכונות חדשות.
- ד. יש לציין כי לא ניתן לאשר תאוריות או מודלים, אלא רק להפריכם. כאשר תוצאות ניסוי עולות בקנה אחד עם תאוריה – יש בכך אישוש לתאוריה (ולא אישור). כאשר תוצאות ניסוי אינן עולות בקנה אחד עם תאוריה – הדבר עלול להפריכה.
- ה. למרות שהתלמידים נפגשו בחטיבת הביניים עם המושג "מודל" בהקשר של המודל החלקיקי של החומר או המודל האטומי - דיון מופשט בנושא מודל מדעי עלול להיות קשה לתלמידים. לכן מומלץ להקדיש למודל כשעה-שעתיים בלבד, ובהמשך הלימוד לבסס את הרעיונות הקשורים בו במסגרת דיון במודלים הקונקרטיים של האור.

2.2 המודל החלקיקי של האור (2 שעות)

- א. מומלץ שאבן היסוד הראשונה של המודל תהיה ציון העובדה שמקורו של אור הוא גוף מאיר וכי האור מתפשט מהגוף המאיר במרחב. על סמך זאת יש להציע שאור הוא זרם של חלקיקים היוצאים מן הגוף המאיר ונעים במרחב. לאחר כן, כדאי לסקור את התופעות הקשורות לאור, ועל פיהן להמשיך ולבנות את המודל. לדוגמה: על סמך העובדה ששתי אלומות אור חותכות האחת את השנייה ללא אינטראקציה ביניהן – יש להוסיף למודל את ההשערה שהמרחק בין חלקיקי האור הוא גדול בהרבה מגודלם של החלקיקים.
- ב. מסקנות מן המכניקה, כגון זו האומרת שבעקבות התנגשות אלסטית בין כדור לקיר הכדור מוחזר כך ש"זווית הפגיעה שווה לזווית החזרה", יש להדגים בכיתה י'. בכיתה י"ב תבוא ההוכחה של המסקנות הללו על סמך עקרונות המכניקה.

2.3 ניבויי המודל החלקיקי של האור (2 שעות)

א. יש להציג שני ניבויים של המודל החלקיקי:

(1) אור מפעיל לחץ על עצמים שבהם הוא פוגע.

(2) מהירות האור בזכוכית, למשל, גדולה ממהירות האור באוויר.

ב. לאחר הצגת הניבויים, יש לדון בהם על בסיס תוצאות הניסויים: ניסוי המראה כי אור אכן מפעיל לחץ, וניסוי המראה כי מהירות האור בזכוכית דווקא קטנה ממהירות האור באוויר (כתלות במקדם השבירה של הזכוכית ביחס לאוויר).

ג. מומלץ לסכם את הנושא "המודל החלקיקי של האור" בדיון במעמדו: מחד גיסא, המודל מצליח להסביר עובדות רבות ולנבא תופעות שאכן מתגשמות; מאידך גיסא, אין מצליחים להסביר באמצעותו את העובדה שבמעבר אור מתווך אחד למשנהו, שבירת האור מלווה בהחזרת אור. יתר על כן, הניבוי לגבי מהירות האור בזכוכית עומד בסתירה לתוצאות ניסויים שמבוססים על עקרונות המכניקה.

פרק 3 : גלים מכניים ואלקטרומגנטיים

שעות	הנושא
4	3.1 תכונות של פולסים והשוואתן לתכונות האור
4	3.2 גלים מחזוריים חד-ממדיים
4	3.3 תכונות של גלים דו-ממדיים והשוואתן לתכונות האור
10	3.4 התאבכות ועקיפה בגלי מים ובאור
6	3.5 גלים אלקטרומגנטיים, ספקטרום, יישומים ורקע היסטורי
28	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה : תנועת פולס בקפיץ (אורך ורוחב). - ניסוי : ניתוח סרטון וידאו המתאר תנועת פולס. - הדגמה : התקדמות שני זעזועים בקפיץ. - תרגול : בניית סופרפוזיציה באמצעות נייר ועיפרון. - ניתוח ממוחשב של סופרפוזיציה בהדמיה או בגיליון אלקטרוני. - הדגמה : החזרה בקפיץ. - הדגמה : מעבר פולס מתווך לתווך בקפיצים. 		<ul style="list-style-type: none"> - המושגים : "פולס" (זעזוע), "פולס רוחב", "פולס אורך". - תיאור של פולס : • המושגים : "מקום", "העתק" ו"משרעת". • תיאור פונקציית העתק-מקום : $y(x)$. • תיאור פונקציית העתק-זמן : $y(t)$. - מהירות פולס וסוג התנועה בתווך אחיד, השוואה לאור, מהירות חלקיקי תווך שבו מתפשט פולס. - "עקרון הסופרפוזיציה" : • היעדר אינטראקציה בין פולסים, השוואה לאור. • הסבר עקרון הסופרפוזיציה. • המושגים : "התאבכות", "התאבכות בונה", "התאבכות הורסת", "נקודת צומת". - החזרת פולס מקצה חפשי ומקצה קשור. - מעבר פולס מתווך אחד למשנהו, השוואה לאור. - פולס נושא אנרגיה, השוואה לאור. 	<p>3.1</p> <p>תכונות של פולסים והשוואתן לתכונות האור</p>
4	<ul style="list-style-type: none"> - הדמיה : גלים מחזוריים. - הדגמות וניסויים באמבט גלים : יצירת פולסים וגלים מחזוריים ומדידת מהירות ואורך-גל. - פעילות ממוחשבת או סרטון וידאו : הקשר בין סופרפוזיציה לגלים עומדים. - ניסוי Melde. 	$f = \frac{1}{T}$ $v = \lambda f$ $l = n \frac{\lambda}{2}$	<ul style="list-style-type: none"> - גלים מחזוריים : • פונקציית "העתק-מקום" של גל מחזורי, המושגים : "גל מחזורי במקום", "אורך-גל". • פונקציית "העתק-זמן" של מקור גלים מחזורי, המושגים : "מקור גלים מחזורי בזמן", "זמן-מחזור", "תדירות". • הקשר בין תנועת מקור הגל לבין צורת הגל. • הקשר בין מהירותו של גל מחזורי, תדירותו ואורך-הגל שלו. - סופרפוזיציה בגלים מחזוריים : "התאבכות בונה", "התאבכות הורסת", "נקודות צומת". - גלים עומדים : אורכי הגל והתדירויות המותרות, חשיבות תנאי השפה. 	<p>3.2</p> <p>גלים מחזוריים חד-ממדיים</p>

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4	<ul style="list-style-type: none"> - הדמיית אמבט גלים : התבוננות בחתכים ניצבים לאמבט תוך שינוי פרמטרים שונים. - ניסוי רגיל, ממוחשב או ניתוח סרטון וידאו : החזרה ממחוסם ישר באמבט גלים. 	$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$	<ul style="list-style-type: none"> - מושגי יסוד : "חזית גלי", "כיוון התפשטות", "גל ישר", "גל מעגלי", "עקרון הויגנס". - השוואה בין החזרה של גלי מים להחזרת אור. - השוואה בין מעבר גל מים מתווך אחד למשנהו למעבר אור מתווך לתווך. - השוואה בין נפיצת גלי מים לנפיצת אור. 	3.3 תכונות של גלים דו-ממדיים והשוואתן לתכונות האור
10	<ul style="list-style-type: none"> - ניסוי : התאבכות באמבט גלים - מציאת אורך-גל על פי הפרש מרחקים של נקודה על קו מקסימום או על קו מינימום משני המקורות. - ניסוי או הדמיה : התאבכות באמבט גלים - תלות תבנית ההתאבכות בפרמטרים השונים. - ניסוי או הדמיה : תמונת התאבכות של אור מונוכרומטי (לייזר) דרך שני סדקים ותמונת עקיפה. - ניסוי או הדמיה : עקיפה באמבט גלים - תלות תבנית העקיפה בפרמטרים השונים. - ניסוי או הדמיה : תמונת עקיפה של אור מונוכרומטי (לייזר) ושל "אור לבן" דרך סריג עקיפה. 	<p>קווי מקסימום עבור $L \gg d$:</p> $\sin \theta_n = \frac{x_n}{L_n} \approx n \frac{\lambda}{d}$ <p>קווי צומת עבור $L \gg d$:</p> $\sin \theta_n = \frac{x_n}{L_n} \approx (n - \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{d}$ <p>עבור $L \gg d$ וזוויות קטנות :</p> $\frac{\Delta x}{L} \approx \frac{\lambda}{d}$ $\sin \theta_n = \frac{x_n}{L_n} = n \frac{\lambda}{w}$ $\sin \theta_n = \frac{x_n}{L_n} = nN^* \lambda$	<ul style="list-style-type: none"> - התאבכות גלי מים משני מקורות : "מקורות שוי-מופע", "מקורות שוני-מופע". - התאבכות אור משני חריצים, "מקורות אור קוהרנטיים". - השפעת הפרש המופע בין המקורות על תבנית ההתאבכות. - "עקיפה" : תבנית העקיפה כהתאבכות המתקבלת מרצף של מקורות נקודתיים. - "סריג עקיפה", שימושים. - המודל הגלי של האור והאופטיקה הגאומטרית. - מעמדו של מודל הגלים המכניים, מהו התווך שהאור מרעיד? 	3.4 התאבכות ועקיפה בגלי מים ובאור

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
6	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה : תופעות גליות של גלי מיקרו. - הדגמה : תופעת הפלואורסצנסיה של קרינה על-סגולה. - הדגמה : החזרה של קרינה תת-אדומה משלט-רחוק. - סרט על הספקטרום האלקטרומגנטי ושימושו. 		<ul style="list-style-type: none"> - עיקרי המודל האלקטרומגנטי של האור, ניבויי התאוריה האלקטרומגנטית. - גלים אלקטרומגנטיים – היבטים מדעיים, טכנולוגיים והיסטוריים : • השפעת האטמוספירה על קרינה אלקטרומגנטית. • התחומים השונים של ספקטרום הקרינה האלקטרומגנטית, יישומים טכנולוגיים. - קשיים של מודל הגלים האלקטרומגנטיים. 	3.5 גלים אלקטרומגנטיים, ספקטרום, יישומים ורקע היסטורי

גלים מכניים ואלקטרומגנטיים: פירוט, דגשים, הערות

דידקטיות

מבוא

מקומו של הפרק

פרק זה, המציג תופעות גליות מכניות ואלקטרומגנטיות, הוא שלב נוסף ביחידת הלימוד "קרונה וחומר" והוא בונה מערכת מושגים וקשרים בתחום תוכן זה. בד-בבד, הפרק ממשיך בפיתוח רעיונות חשובים לגבי התאמת מודל לאור תוך התייחסות לקשר שבין תופעות למודלים, בהצגת דרכים לאישוש או להפרכה של מודל ובגבולות ישימות של מודל. מבחינה היסטורית, הפרק מלווה את התפתחות המודל הגלי של האור במאות ה-18 וה-19 תוך ציון תרומתם של מדענים ידועים.

תכנים ומטרות

מטרות הפרק הן להכיר ולבחון את התופעות הגליות ואת המאפיינים של גל מתקדם (חד-ממדי ודו-ממדי), ללמוד על המשותף והמבחין בין גל מתקדם לחלקיק בתנועה, להכיר תופעות גליות באור, להכיר את הגלים האלקטרומגנטיים ולברר את גבולות המודל הגלי של האור. בתיאור הגלים והתנהגותם יודגש התיאור הצורני בלי לפתח את התיאור המתמטי. (עוד בנושא זה ראו בסעיף **דרכי הוראה**, להלן).

ייחודו של הפרק וארגון ההוראה

הוראת הגלים בחטיבה העליונה שונה באופייה מהוראת המכניקה והחשמל מבחינת השימוש בייצוגים מתמטיים מופשטים. בהוראת המכניקה והחשמל אנו מקפידים על בניית חוקים מוכללים שמייצגים את התפתחות המערכת במהלך הזמן (החוק השני של ניוטון, חוק פארדיי, חוקי שימור וכיו"ב), ועוסקים בהצגת פתרונותיהם הפורמליים אפילו עבור מקרים כלליים (תאוצה קבועה עבור כוח קבוע כלשהו, תנועה הרמונית עבור כוח לינארי וכיו"ב). לעומת זאת, לא נהוג להציג את משוואות הגלים ואת הצורה הכללית של הפתרונות ($f(x \pm vt)$), משום שהצגה מופשטת כזאת מקשה על התלמידים. שיטת ההוראה זאת מחייבת גישה פנומנולוגית הצמודה לאמצעי המחשה, כלומר, מדגישים את התיאור הצורני של הגלים ולא מפתחים את התיאור המתמטי, וכן נעזרים ביכולת ההמחשה של אמבט הגלים, הקפיץ או המיתר.

להבנת פרק זה נתבעת מהתלמידים בשלות מתמטית ופיזיקלית – הן כדי להבין לעומק את המודל הגלי (בממד המרחב ובממד הזמן) והן כדי ליישם אותו תוך בחינת תופעות ופתרון בעיות בגלים

מכניים ובגלים אלקטרומגנטיים. לכן יש לתכנן את מבנה ההוראה בהתאמה להתפתחות הידע והמיומנות של התלמידים.

בכיתה י' מתרכזים בהכרת תופעות גליות בגלים מכניים ועוסקים בעיקר בצד הצורני של הגלים כמו שמירת הצורה, המהירות הקבועה, עקרון הסופרפוזיציה, הקשר בין מהירות, תדירות ואורך-גל. מתוודעים לתופעות גליות באור הנראה (התאבכות ועקיפה בסדק ובסריג) ומשתמשים בהן לביסוס המודל הגלי של האור ולביסוס השלכותיו השימושיות והתאורטיות, כמו קישור בין תחושת הצבע ותדירות האור, זיהוי חומרים, ניתוח הרכב הכוכבים ותנועתם.

בכל תופעה גלית, רצף ההוראה ישלב את ההדגמה הנצפית ומיד לאחריה את התופעה באור, או ידגים את כל התופעות הגליות ולאחר מכן יבדוק את התאמת המודל לאור.

בכיתה י"ב יש להדגיש את הגדלים הפיזיקליים שהגלים נושאים (אנרגיה ותנע) ואת מהות הגלים: גלי קול (וגלים סייסמיים) כתנודות אלסטיות של תווך; גלי אור כהתנהגות מחזורית של השדה האלקטרומגנטי; גלי מים, המסייעים בהמחשה, אך אינם אף אחד משני הסוגים הקודמים. יש לציין כי הגלים הנוצרים באמבט הם מורכבים וכוללים תנודות אורכיות ורוחביות. יש להימנע מדיון במורכבות זו ולהיעזר ביכולת ההמחשה של האמבט, הקפיץ או המיתר.

בהתאם לרמת הכיתה, ניתן להעמיק יותר ביסודות המחלוקת בין מודל הגלים ובין מודל החלקיקים בנושא התנהגות האור, ולהכין את הרקע לאפקט הפוטואלקטרי. בכיתות מתקדמות ניתן לעסוק בקצרה בעקרון פרמה ובאפקט דופלר.

בכיתה י"ב יתוארו גם "קשרי הרוחב" בין פרק הגלים לבין יחידות המכניקה, וכן האלקטרומגנטיות. קישור למכניקה – לדוגמה: דיון ברמה האיכותית (מתוך קישור לחוקי ניוטון) על השפעת מתיחות המיתר וצפיפות המסה שלו על מהירות ההתפשטות של גל לאורכו; קישור לאלקטרומגנטיות - הוראת נושא האלקטרומגנטיות מוביל לדיון איכותי במשוואות מקסוול, המהוות בסיס לרעיון הגלים האלקטרומגנטיים המתפשטים במהירות האור, ולניסוי הרץ (1880) המקשר בין האור לגלים אלקטרומגנטיים.

דרכי הוראה מומלצות

בתחילת לימוד הנושא התלמידים מתקשים בהבנת המושג "גלי". על כן יש להסביר כי גל מכני הוא יצירת הפרעה במצב שיווי-המשקל של תווך חומרי (לדוגמה: טבילת חפץ במים, או פריטה על מיתר מתוח). יצירת ההפרעה גורמת ליתגובת שרשרת, המתבטאת בהתקדמות ההפרעה לכיוונים שונים כתלות בתנאי הסביבה שהיא נעה בתוכה. יש ללוות את ההסבר בהדגמת תנועת פולס על קפיץ. מאוחר יותר יש להדגיש בפני התלמידים כי הגלים האלקטרומגנטיים שונים מהותית מהגלים

המכניים בכך שאינם נישאים על גבי תוֹךְ, ולהזכיר את המושג "אתר", שהומצא על מנת להסביר את מאפייני ההתפשטות של האור.

אמנם התופעות הגליות המעניינות בחיי היום-יום קשורות לגלי הקול ולגלים אלקטרומגנטיים ובכללם האור, אך לשם המחשה בהירה יש להיעזר בגלים במיתר ובאמבט. יש להוסיף כי האופי המיוחד של הגל במרחב ובזמן **מחייב** להיעזר בהמחשות רבות. את ההמחשות ניתן לבצע באמצעות תצפית ישירה, ניתוח סרטי וידאו של מערכות פיזיקליות מתנוודות (מיתרים וקפיצים בממד אחד, אמבט גלים בשני ממדים) ובאמצעות הדמיות ממוחשבות בעלות ייצוגים גרפיים מתאימים.

המחשב מאפשר להציג תמונה דינמית של התפשטות ההפרעה, כזאת שאפשר לשלוט בה, לעזור אותה מדי פעם ולבחון את ההשפעה של שינוי פרמטרים בצורה נוחה ביותר. (ללא מחשב, המורה מציג באמצעות לוח וגיר סדרה סופית של מצבים עוקבים כמיטב כישרון הציור שלו, אלא שאין בהם כדי לתת תמונה דינמית).

עקרון הסופרפוזיציה הוא מרכזי בגלים ומסביר הן את תופעת ההתאבכות והן את היעדר האינטראקציה בין הגלים. אלה הם מאפיינים חשובים, שיש להתעכב עליהם ולהבחין בינם לבין המאפיינים של ההתנהגות החלקיקית. אחת השאלות הקשות להמחשה היא: מה מתרחש בעת ששני גלים מזדמנים מכיוונים שונים לאותו אתר. מה התרחש בזמן החפיפה? מה מתרחש בעקבותיה? הדמיית המחשב מאפשרת שיגור גלים שוני-צורה, שוני-תדירות או שוני-משרעת והמחשה כי בכל רגע ורגע ובכל נקודה ונקודה ההפרעות מצטרפות זו לזו, לפי חיבור אלגברי פשוט; לאחר מכן, כל אחת ממשכה בדרכה כאילו לא פגשה כלל בהפרעה השנייה.

הערה: בהיעדר מחשב, ניתן להתגבר חלקית על קשיי ההמחשה על-ידי שימוש בסדרת שקפים מתאימה.

3.1 תכונות של פולסים והשוואתן לתכונות האור (4 שעות)

המושגים "פולס" ("זעזוע"), "פולס רחב" ו"פולס אורך"

א. מוצע לפתוח את הפרק "גלים מכניים ואלקטרומגנטיים" בחיפוש אחר "ישות" פיזיקלית השונה מחלקיקים, שתשמש בסיס למודל של אור. על "ישות" פיזיקלית זו להיפלט ממקור כלשהו ולנוע במרחב. כאן המקום להציג תנועת פולס על קפיץ ולבנות את הבסיס למודל של הגלים המכניים: אור מתנהג כפולס מכני.

ב. את הפולס על הקפיץ יוצרים על-ידי תנועת היד בכיוון מאונך לקפיץ הנייח, ואז מסתבר שכל שאר חלקיקי הקפיץ נעים בכיוון מאונך לכיוון התפשטות הפולס. אפשר לעשות זאת בכמה דרכים: ניתוח סרטון וידאו, מעקב בחושך אחר תנועת נורית הקשורה לנקודה כלשהי של הקפיץ, מעקב אחר תנועת סרט-נייר או סרט-בד הקשורים לנקודה כלשהי של הקפיץ.

- אחרי פעילויות אלה, מוצע להגדיר את המושגים "פולס רוחב" ו"פולס אורך".
- ג. מומלץ להדגים גם פולס מים (למרות שהוא שייך לנושא "גלים דו-ממדיים") ולהראות שגוף הצף על פני המים עולה ויורד עם מעבר הפולס ואינו מתקדם אתו.

קשיי תלמידים

- א. תלמידים נוטים לבלבל בין כיוון ההתפשטות של פולס רוחב, לבין כיוון התנועה של חלקיקי התווך. בהקשר זה יש להדגיש כי מים בקרבת חוף ים ("גלי חוף") אינם תנועה גלית, אלא שילוב של תנועה גלית ותנועת המים לעבר החוף או ממנו. תנועת המים במרחקים העולים על מאות מטרים מן החוף היא בדרך כלל גלית בלבד.
- ב. עם השלמת הלימוד של סעיף זה, רצוי שתצטייר אצל התלמידים התמונה הבאה: פולס רוחב נע בקפיץ - חלקיקי הקפיץ הנמצאים לפני שיא הפולס מתרחקים מקו הקפיץ (הקו שלאורכו משתרע הקפיץ הנייח) בכיוון מאונך לקו הקפיץ; חלקיקי הקפיץ שנמצאים מאחורי שיא הפולס מתקרבים לקו הקפיץ בכיוון מאונך לו, ובסופו של דבר נעצרים לאורך קו הקפיץ. יוצא שצורת הפולס הנע אינה משתנה כמעט במהלך תנועתו.

תיאור של פולס

- א. יש לאפיין את מקומו של חלקיק קפיץ באמצעות ציר x , את מקומו של חלקיק מים על פני המים באמצעות מערכת צירים x ו- y , ואת מקומו של חלקיק אוויר באמצעות מערכת צירים x , y ו- z , ובהתאם לכך למיין את הגלים לחד-ממדיים, דו-ממדיים ותלת-ממדיים.
- ב. יש להציג בעזרת תרשים את המושג "העתק". בגל חד-ממדי, יש להגדיר נוסף לציר x גם ציר y המאונך לקו הקפיץ, כך שראשיתו בקו הקפיץ. ההעתק של נקודת קפיץ מסוימת, שמקומה הוא x , מוגדר כשיעור נקודת הקפיץ בציר ה- y .
- ג. אחד הקשיים של תלמידים בנוגע למושג "גל" הוא הבנת תלות ההעתק במקום ובזמן: $y(x, t)$. לכן יש לדון בשתי תמונות של גל: ההעתק כפונקציה של המקום עבור **רגע מסוים**, ובקיצור פונקציית "העתק-מקום" (התמונה המתקבלת כאשר מצלמים קפיץ שבו מתפשט גל); העתק כפונקציה של הזמן עבור **מקום מסוים** של הקפיץ, (התמונה המתקבלת כאשר מצלמים אותה נקודה במספר תמונות עוקבות), ובקיצור פונקציית "העתק-זמן".

מהירות פולס וסוג התנועה בתווך אחיד, השוואה לאור ומהירות חלקיקי התווך

- א. התווך שבו מתקדם הפולס המכני הוא בעל תכונות פיזיקליות (לדוגמה: אלסטיות), שמאפשרות את תהליך העברת האנרגיה והתנע ממקום למקום. לדוגמה: ניתן להסביר גלי קול המתקדמים בגזים כמין 'מירוך שליחים', שבו האנרגיה מועברת באמצעות המולקולות לאורך המסלול. כל מולקולה המקבלת בשלב מסוים את האנרגיה והתנע, מתנוודדת ומעבירה הלאה את הגדלים הפיזיקליים האלה.
- ב. יש להראות, למשל באמצעות סרטון וידאו, כי מהירות פולס בקפיץ אחיד היא קבועה. זאת בדומה לאור, שמהירותו בתווך אחיד היא קבועה.
- ג. יש לעמוד על ההבדל בין מהירות התקדמותו של הפולס המכני לבין מהירותם וכיוון התקדמותם של חלקיקי התווך.

עקרון הסופרפוזיציה

- א. אחת התופעות הבסיסיות הקשורות לאור היא העובדה ששתי אלומות אור הנחתכות אינן משפיעות זו על זו.
- ב. יש להדגים חיתוך שני פולסים בקפיץ כדי להיווכח שכל פולס ממשיך בדרכו ואינו מושפע מן החיתוך עם הפולס האחר וכדי להראות שההעתק המתקבל בנקודת החיתוך הוא סכום העתקי הפולסים הבודדים.

מעבר פולס מתווך אחד למשנהו, השוואה לאור

- א. יש להדגיש שכאשר הפולס מגיע למשטח המעבר בין תווך אחד למשנהו, אין בדרך כלל התאמה שמאפשרת העברה של כל האנרגיה מתווך לתווך. כתוצאה מכך, רק חלק מן הגל מועבר, בעוד שחלק אחר מוחזר. החלק המוחזר מתקדם כך שזווית הפגיעה שווה לזווית החזרה. (העברה מושלמת מצריכה "התאמת אימפדנסים" - נושא שאין מלמדים בבית הספר.)
- ב. באמצעות מערכת של שני קפיצים השונים זה מזה במסה ליחידת אורך, יש להדגים כי בדומה לאור, גל הנע בקפיץ ופוגע בנקודת הקשר עם קפיץ אחר, מתפצל לגל מוחזר ולגל עובר. כאן רואים יתרון מובהק של מודל הגלים המכניים על פני המודל החלקיקי – באמצעות המודל החלקיקי אי-אפשר להסביר החזרה של אור עם מעבר לתווך השני.
- ג. יש להבחין בין מעבר גל מקפיץ 'קלי' לקפיץ 'כבד', לבין מעבר גל מקפיץ 'כבד' לקפיץ 'קלי'.

החזרת פולס, קצה חופשי וקצה קשור

- א. באמצעות קפיץ, יש להדגים כי בדומה לאור, גם פולסים מוחזרים כאשר הם מגיעים לתווך שאינו חדיר עבורם.
- ב. יש להדגים החזרת פולס מקצה חופשי של הקפיץ והחזרה מקצה קשור של קפיץ ולעמוד על השוני בהחזרה.

פולס נושא אנרגיה, השוואה לאור

- א. יש לדון בכך שפולס, בדומה לאור, נושא אנרגיה (מקורה בעבודה שעשה מקור הגל על קצה הקפיץ), וכן בסוגי האנרגיה של הפולס בקפיץ.
- ב. יש לציין כי האנרגיה של פולס היא פרופורציונית לריבוע משרעת הפולס ולא לזמן.

ההבדל והדמיון בין חלקיק בתנועה לבין גל

לסיכום הנושא, יש לעזור לתלמידים לחדד את ההבדלים בין חלקיקים לגלים ולהדגיש את ההבדלים הבאים:

1. לחלקיק חומרי אנחנו מייחסים מיקום נקודתי במרחב, בעוד שלגל מייחסים תחום קיום מורחב, שבכל נקודה בו קיימת מידה מסוימת של הפרעה לשיווי-המשקל.
2. חלקיק חומרי הנע ממקום למקום נושא עמו מסה, אנרגיה, תנע קווי ותנע זוויתי. גל מתקדם נושא גם הוא אנרגיה, תנע קווי ותנע זוויתי ממקום למקום, אך ללא העברה של מסה. מדגימים שוני זה על-ידי אבן הנזרקת לעבר לוח זכוכית וגורמת לזעזוע או לשבירה, לעומת גל-קול המתקדם באוויר, פוגע בלוח הזכוכית וגורם גם הוא לזעזוע או שבר.
3. חלקיקים חומריים אינם יכולים לחפוף זה את זה, כלומר להתקיים באותו מיקום במרחב. לעומת זאת, גלים שונים יכולים להתקדם באותם אזורים במרחב, לחפוף זה את זה ולהצטרף על פי "עקרון הסופרפוזיציה". "התאבכות" ו"עקיפה" הם מאפיינים מובהקים של גלים: שני גלים יכולים לבטל זה את זה בנקודות מסוימות – דבר שאינו אפשרי עבור שני חלקיקים חומריים.
4. בין חלקיקים חומריים מתקיימות אינטראקציות אשר גורמות לשיוויים באנרגיה, בתנע הקווי ובתנע הזוויתי שלהם. בין גלים לא מתקיימת אינטראקציה גם כאשר נוצרת ביניהם חפיפה, והם יוצאים מאזור החפיפה עם אותן תכונות פיזיקליות שאתן נכנסו לאזור זה.

3.2 גלים מחזוריים חד-ממדיים (4 שעות)

- א. מוצע לפתוח את הנושא בהדגמת גלים מחזוריים הנעים על קפיצים ולהגדיר מהי "מחזוריות הפונקציה".
- ב. מומלץ לחלק את הדיון בגלים מחזוריים לשניים: דיון בפונקציית העתק-מקום - $y(x)$ ודיון בפונקציית העתק-זמן - $y(t)$.
- ג. בהקשר לפונקציה $y(x)$, יש להגדיר את המושגים "מחזור הפונקציה" ו"אורך-גל". לגבי הפונקציה $y(t)$, יש להגדיר את המושגים "מחזור הפונקציה", "זמן מחזור" ו"תדירות".
- ד. יש לדון בסופרפוזיציה של גלים מחזוריים ובמושגים "התאבכות בונה" (כאשר שתי הפרעות יוצרות הפרעה חזקה יותר) ו"התאבכות הורסת" (כאשר הפרעה מבטלת הפרעה אחרת). יש להדגיש שכל אחד מהמושגים הוא מקרה פרטי של סופרפוזיציה בנקודה כלשהי בתווך שבו הגלים עוברים.
- ה. יש לעמוד על התנאים ליצירת "גל עומד" ו"נקודות צומת". יש לעמוד על אורכי הגל והתדירויות המותרות ועל תנאי השפה.

3.3 תכונות של גלים דו-ממדיים והשוואתן לתכונות האור (4 שעות)

מושגי יסוד

- א. יש להבהיר את ההבדל בין חזית הגל ובין כיוון ההתפשטות. יש להסביר מהו צילום סטרובוסקופי ומה ניתן למדוד בעזרתו.
- ב. יש לעמוד על ההבדל בין גל ישר הנוצר על-ידי מקור גלים ישר, ובין גל מעגלי הנוצר על-ידי מקור נקודתי. כדאי להדגים כבר בשלב זה גל מישורי שהופך למעגלי לאחר מעבר דרך חריצים שונים.
- ג. עקרון הויגנס מסביר את התקדמות הגל על-ידי ההנחה שכל נקודה בחזית הגל מהווה מקור נקודתי לגל הזהה לזה שמקור הפרעה יוצר. עיקרון זה אכן מסביר תופעות הקשורות בגלים אך גם מעורר קשיים. עקרון הויגנס אינו חוק טבע כמותי, אלא מעין עקרון-על יעיל לגבי התהליך הגלי.

השוואה בין החזרה של גלי מים להחזרת אור

- א. מומלץ לפתוח את הנושא בהדגמה, באמבט גלים, של גל ישר הנע לעבר מחסום ישר, מתנגש בו ומוחזר ממנו. מן ההדגמה נוכחים לדעת שמהלך הגל לעבר המחסום וחזרתו ממנו דומה מאוד למהלך אור הפוגע במראה ומוחזר ממנה.

- ב. מומלץ להציג תצלום של גל ישר במהלך התנגשותו עם המחסום, או להתבונן ולהיווכח באמצעות סרטון וידאו או הדמיה שהזווית בין חזית הגל הפוגע לבין המחסום שווה לזווית שבין חזית הגל המוחזר לבין המחסום.
- ג. יש להראות שזוויות הפגיעה והחזרה, כפי שהן מוגדרות עבור גלים, שוות בהתאמה לזוויות הפגיעה והחזרה כפי שהוגדרו עבור אור.
- ד. מומלץ לדון בהחזרה של גל מעגלי ממחסום ישר ולהשוותה ליצירת דמותו של מקור אור נקודתי באמצעות מראה מישורית.

השוואה בין מעבר גל מתווך אחד למשנהו למעבר אור מתווך לתווך

- א. באמבט גלים, יש להראות שמהירות הגל במים רדודים תלויה בעומק המים, כלומר שני תחומים של מים שבהם עומק המים שונה יכולים לשמש שני תווכים שונים למעבר גלי מים. ניתן לבצע זאת לפי השלבים האלה:
- לערוך ניסוי באמבט גלים, שבו גל ישר מחזורי עובר ממים עמוקים למים רדודים בזווית פגיעה השווה לאפס, לראות כי אורך הגל במים הרדודים קצר יותר, ומכאן להסיק כי מהירות הגל במים הרדודים נמוכה יותר.
 - לחזור על הניסוי כאשר זווית הפגיעה שונה מאפס, לצפות בשבירה ולהוכיח, על סמך עקרון הויגנס, כי מתקיים הקשר:
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$
 - להראות כי מקשר זה נובע כי בתווך שבו מהירות הגל נמוכה יותר – הזווית קטנה יותר, וזאת בהתאמה למה שקורה במעבר אור מתווך לתווך. כאן נוכחים שוב ביתרון בולט של מודל הגלים המכניים על פני המודל החלקיקי.
- ב. באמצעות מודל הגלים המכניים, יש להסביר את שבירת האור במעבר האור מתווך אחד למשנהו (למשל מאוויר לזכוכית).

השוואה בין נפיצת גלי מים לאור

- א. מומלץ להדגים באמבט גלים נפיצה של גלים על-ידי מעבר גל מחזורי ממים עמוקים למים רדודים בזווית פגיעה שונה מאפס, ולהיווכח ששיעור השבירה תלוי באורך הגל.
- ב. יש לציין בפני התלמידים שתופעת הנפיצה מתקיימת גם באור, אך בהבדל מסוים: באור, ככל שאורך הגל קצר יותר – שיעור השבירה גדול יותר. (הגוון הסגול של האור משנה את כיוון

התפשטותו בשיעור גדול מזה של הגוון האדום.) לעומת זאת, בגלי מים, ככל שתדירות הגל גבוהה יותר – שיעור שינוי הכיוון כתוצאה מהמעבר לתווך האחר נמוך יותר.

3.4 התאבכות ועקיפה בגלי מים ובאור (10 שעות)

א. נושא זה אינו קל להבנה, וסדר ההוראה הוא אפוא חשוב ביותר. להלן הצעה דידקטית להוראה הנושא "התאבכות", הבנויה על הדגמה באמבט גלים במקביל לשימוש במקרן שקפים:

1. באמבט גלים מדגימים גל מעגלי מחזורי יחיד, ולאחר מכן מפעילים שני מקורות נקודתיים קוהרנטיים לגלים כאלה.
2. מסרטטים על דף נייר את שני הגלים המעגליים המחזוריים (סרטוט חזיתות בהפרש λ).
3. דנים בקשר שבין תבנית ההתאבכות לבין עקרון הסופרפוזיציה.
4. מוסיפים בתרשים את קווי המקסימום ואת קווי המינימום.
5. מאפיינים את התנאי הגאומטרי שמקיימת נקודה על קו מקסימום (הפרש המרחקים שלה משני המקורות שווה למספר שלם של אורכי גל) ואת התנאי שמקיימת נקודה על קו מינימום (ההפרש שלה משני המקורות שווה למספר אי-זוגי של חצי אורך-גל).
6. מודדים אורך-גל באמבט גלים על-ידי בחירה של נקודות שונות על קווי מקסימום ועל קווי מינימום, ומחשבים את אורך הגל על פי התנאי הגאומטרי שמקיימת כל נקודה.
7. נעזרים בזוג שקפים (בכל שקף מסורטט גל מעגלי מחזורי) כדי לנתח את השפעת המרחק בין המקורות על תבנית ההתאבכות.
8. משנים את המרחק בין המקורות באמבט הגלים ואת אורך הגל ובוחנים כיצד כל פרמטר משפיע על תבנית ההתאבכות.
9. דנים בשאלה: כיצד הפרש מופע בין המקורות משפיע על תבנית ההתאבכות.
10. דנים בשאלה: באמבט גלים נוצרת תבנית התאבכות, וכל 10 שניות משתנה באופן אקראי הפרש המופע בין המקורות. מה יראה צופה המתבונן באמבט הגלים? לאחר מכן דנים באותה שאלה, אלא שמשנים את הפרש המופע כל 5 שניות, כל 1 שנייה, כל מאית שנייה. מכאן מגיעים למושג "מקורות קוהרנטיים" ("מקורות צמודים").
11. דנים בשאלה: מדוע לא מתקבלת תבנית התאבכות יציבה משני מקורות אור קרובים אך בלתי תלויים.
12. עורכים ניסוי דמוי "ניסוי יאנג".
13. דנים במגבלות השיטה למדידת אורך-גל של אור בעזרת מדידת הפרשי מרחקים של נקודה הנמצאת על קו מקסימום משני המקורות.

14. מפתחים את הנוסחה $\sin \theta_n = \frac{x_n}{L_n} \approx n \frac{\lambda}{d}$ עבור המצב שבו המרחק L בין המקורות למסך,

גדול מאוד ביחס למרחק d בין שני המקורות (ומפתחים את הנוסחה המתאימה לקווי מינימום).

15. מזהים שקווי המקסימום וקווי המינימום הם היפרבולות ודנים בקירוב ההיפרבולות באמצעות אסימפטוטות (כאשר מתקיים התנאי $L \gg d$).

16. מפתחים את הנוסחה $\frac{\Delta x}{L} \approx \frac{\lambda}{d}$ עבור המקרה שבו הזוויות θ_n הן קטנות.

17. דנים בהתאבכות של אור לבן.

ב. אין צורך לטפל באופן מתמטי בתבנית התאבכות כאשר יש הפרש מופע בין המקורות. יש ללמד זאת איכותית בלבד.

ג. יש לציין כי קיימות שלוש תופעות שבהן האור משנה את כיוון התפשטותו: החזרה, שבירה ועקיפה. יש להדגיש כי האופטיקה הגאומטרית היא קירוב של המודל הגלי של האור במצבים שבהם אין שינוי כיוון כתוצאה מעקיפה.

קשיי תלמידים

תלמידים מתקשים להבין מדוע בתבנית התאבכות בגלי מים התמונה היא דינמית (בשפת האמבט מגיעים שיאים ושפלים של הגל בזה אחר זה), ואילו באור – התמונה היא סטטית (עצמת האור בקווי המקסימום נראית קבועה), לכן יש לדון בכך.

3.5 גלים אלקטרומגנטיים, ספקטרום, יישומים ורקע היסטורי (6 שעות)

עיקרי המודל האלקטרומגנטי

א. יש להציג את הדרכים ליצירת שדה חשמלי:

1. על-ידי הפרדת מטענים באמצעות -

(I) שפשוף.

(II) הנעת מוט בתוך שדה מגנטי.

2. על-ידי השראה אלקטרומגנטית ושינויים בזמן בשדה המגנטי.

כמו כן יש להציג את הדרכים ליצירת שדה מגנטי:

1. על-ידי זרם (ניסוי ארסטד).

2. על-ידי שדה חשמלי משתנה (השערת מקסוול).

- ב. יש להסיק על קיומם של גלים אלקטרומגנטיים מהתאוריה של מקסוול ולהציג את תכונותיהם:
1. המקור של גלים אלקטרומגנטיים הוא מטען חשמלי מואץ.
 2. גל אלקטרומגנטי הוא שדות חשמליים ושדות מגנטיים המשתנים בזמן, שיוצרים זה את זה, שמאונכים זה לזה ושמאונכים לכיוון התפשטות הגל.
 3. גל אלקטרומגנטי הוא גל רוחב.
 4. גל אלקטרומגנטי מתקדם בריק במהירות האור בלי קשר למהירות מקור הגל או לתדירות שלו. גל אלקטרומגנטי יכול להתקדם גם בחומר, ואז מהירותו משתנה בהתאם לחומר ובמידה מסוימת גם בהתאם לתדירות הגל (נפיצה).
 5. האנרגיה שגל אלקטרומגנטי נושא נקבעת על-ידי משרעת השדה החשמלי. (משרעת השדה החשמלי ומשרעת השדה המגנטי פרופורציוניות זו לזו). האנרגיה קשורה לשדות ולא לחלקיקי התווך.
- ג. יש להציג את תוצאות ניסוייו של הרץ בגלים אלקטרומגנטיים.
- ד. יש להדגיש את ההבדל בין גל מכני לגל אלקטרומגנטי: גל מכני מתבטא בשינויים שהגל מחולל בתווך, בעוד שגל אלקטרומגנטי מתבטא בשינויים בעצמותיהם של השדה החשמלי והשדה המגנטי.
- ה. יש להציג תרשים של הספקטרום האלקטרומגנטי ולדון בתכונות המשותפות לכל הגלים ובשוני בין הגלים.

גלים אלקטרומגנטיים – היבטים מדעיים, טכנולוגיים והיסטוריים

- א. השפעת האטמוספירה על קרינה אלקטרומגנטית
1. מבוא לאסטרונומיה: יש להציג את התחומים השונים של הקרינה האלקטרומגנטית הנבלעת באטמוספירה, ואת התחומים השונים של הקרינה המגיעה לקרקע כדור הארץ ("חלונות"). יש לדון ב'יתצפיות' בגרמי השמים בתחומי הקרינה האלקטרומגנטית השונים מן האור הנראה.
 2. שכבת האוזון: יש לדון בהשפעתה של שכבת האוזון על הקרינה העל-סגולה ה'יקשה' הנפלטת מן האטמוספירה, וכן בבעיית "החור באוזון" ובהשפעתה על האדם והצומח.
 3. גוני השמים: יש לדון בגוון השמים במהלך היום ובעת שקיעת השמש, ובסיבות לגוונים אלה.
- ב. התחומים השונים של ספקטרום הקרינה האלקטרומגנטית
1. תחום גלי הרדיו

רקע היסטורי: המצאת התקשורת האלחוטית על-ידי מרקוני; שידורי רדיו הנושאים את קולו של האדם.

שימושים: שידורי רדיו וטלוויזיה (יש להציג גם את השפעת היונוספרה על גלי הרדיו המשודרים מן הקרקע).

2. גלי מיקרו

שימושים: תקשורת לוויינים, מערכות מכ"מ, תנורי מיקרו-גל.

3. קרינה תת-אדומה

רקע היסטורי: גילוי הקרינה התת-אדומה על-ידי ויליאם הרשל.

מקורות: גופים 'חמים'.

דרכי גילוי: מד-חום, תאי חישה בעור, לוחות צילום. (נחשים ממשפחות מסוימות רואים את הטרף באמצעות קרינה תת-אדומה הנפלטת ממנו).

שימושים: אפקט החממה בחקלאות (בהקשר זה יש לדון גם באפקט החממה באטמוספירה), שְלטים.

קשיי תלמידים: כיוון שקרינה תת-אדומה מחממת והיא מכונה לעתים "קרינת חום", יש הנוטים לחשוב שקרינה תת-אדומה היא קרינה של חום. יש להבהיר ששיעור גבוה ממנה נבלע בחומר לכן היא מחממת, אך אין מדובר בקרינה של חום.

4. קרינה על-סגולה

מקורות טבעיים ומקורות מלאכותיים: שמש, מעבר זרם חשמלי דרך אדי כספית.

דרכי גילוי: לוחות צילום, פלואורסצנציה.

שימושים: עיקור מזון, טיהור מים, "מלבינים אופטיים" באבקות כביסה, צבע של עט הדגשה, מיקרוסקופים לקרינה על-סגולה.

5. קרינת רנטגן

רקע היסטורי: גילוי הקרינה עלידי רנטגן, האופן שבו התגלה כי הקרינה היא אלקטרומגנטית (ניסוי פון-לאואה).

מבנה: מבנה שפופרת רנטגן.

תכונות: השחרת לוח צילום, יוניזציה של גז שהקרינה עוברת דרכו, הרס רקמות.

שימושים: ברפואה: צילום רנטגן, מעקב אחר צנתר, טיפול בגידולים ממאירים; בתעשייה:

גילוי פגמים במוצקים; במחקר: חקר מבנה ה-DNA.

6. קרינת גמא

רקע היסטורי: גילוי הקרינה על-ידי הנרי בקרל, מחקר על-ידי הזוג מארי ופייר קירי,

הפרדת הקרינה הרדיואקטיבית לשלוש קרינות באמצעות שדה מגנטי ושדה חשמלי.

שימושים: ברפואה: אבחון רפואי, טיפול בגידולים ממאירים; בתעשייה: גילוי פגמים

במוצקים; במחקר: מחקר בסיסי של החומר.

מגבלות מודל הגלים האלקטרומגנטיים

בסיום הוראת מודל הגלים האלקטרומגנטיים, יש להציג את גילוי האפקט הפוטואלקטרי על-ידי

הרץ. המודל מסביר מדוע ניתן לעקור אלקטרונים ממתכת על-ידי אור, אך מתקשה להסביר את

התופעות הנוספות של האפקט, כמו התלות בתדירות האור.

פרק 4: מבוא לתורת הקוונטים- המודל הדואלי של האור

שעות	הנושא
5	4.1 האפקט הפוטואלקטרי, הסבר איינשטיין וניסוי מיליקן
1	4.2 אפקט קומפטון
1	4.3 קרינת רנטגן לאור הסבריו של איינשטיין
1	4.4 המודל הדואלי של הקרינה האלקטרומגנטית
8	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
5	<ul style="list-style-type: none"> - ניסוי : הדגמה איכותית של האפקט הפוטו-אלקטרי. - ניסוי : תלות מתח עצירה בתדירות הקרינה. 	$E_{\text{פוטון}} = hf$ $E_{\text{פוטון}} (\text{eV}) = \frac{12,400}{\lambda \left(\overset{0}{\text{\AA}} \right)}$ $E_{\text{פוטון}} = E_k + B$	<ul style="list-style-type: none"> - הדגמה איכותית של האפקט הפוטואלקטרי. - אי-יכולתה של תאוריית מקסוול להסביר חלק מן העובדות הניסיוניות לגבי האור, השערת פלנק. - התא הפוטואלקטרי, חקירת תלותו של מתח העצירה בתדירות הקרינה הפוגעת, ניסוי מיליקן. - המודל של איינשטיין לאפקט הפוטואלקטרי. - יישומים : פתיחת דלתות, מנגנוני אזעקה, מכפיל-אור. 	4.1 האפקט הפוטו-אלקטרי, הסבר איינשטיין וניסוי מיליקן
1		$p = \frac{h}{\lambda}$	<ul style="list-style-type: none"> - תיאור איכותי של אפקט קומפטון. - הביטוי לתנע של פוטון, הפוטון כחלקיק. 	4.2 אפקט קומפטון
1	<ul style="list-style-type: none"> - צפייה בסרטים בנושא. 		<ul style="list-style-type: none"> - הכרת החלקים העיקריים של שפופרת ליצירת קרינת רנטגן ותפקידיהם : שפופרת ריק, קתודה, מטרה, מערכת קירור המטרה, מקור מתח מאיץ, נימה, מקור מתח חימום. - קרינת רנטגן כקרינת האטה וכקרינה אופיינית לחומר המטרה. - הספקטרום הרציף של קרינת רנטגן הנפלטת משפופרת, הקשר בין המתח המאיץ לבין אורך הגל המינימלי. 	4.3 קרינת רנטגן לאור הסבריו של איינשטיין
1			<ul style="list-style-type: none"> - מיון ואפיון תופעות הקשורות באור המוסברות על-ידי האופי החלקיקי, וכאלה המוסברות על-ידי האופי הגלי. - תלות המודל החלקיקי במודל הגלי, ולהפך. 	4.4 המודל הדואלי של הקרינה האלקטרו-מגנטית

מבוא לתורת הקוונטים - המודל הדואלי של האור: פירוט,

דגשים, הערות דידקטיות

4.1 האפקט הפוטואלקטרי (5 שעות)

- א. מומלץ לפתוח את לימוד הנושא בתיאור ההרגשה שרווחה בסוף המאה ה-19 כאילו הפיזיקה בת-הזמן מסוגלת להסביר את כל תופעות הטבע. כדאי לצטט בהקשר זה את מייכלסון, (1894): "החשובים שבחוקי היסוד ובעובדות כבר התגלו, והם כיום מבוססים כל כך, עד כי האפשרות שיוחלפו אי-פעם כתוצאה מגילויים חדשים רחוקה עד מאוד..."
- ב. מומלץ להדגיש כי ראיית העולם המכניסטית שרווחה בסוף המאה ה-19 התבססה על שלושה גורמים: ודאות, דטרמיניזם וסיבתיות. בהקשר זה כדאי לצטט פיזיקאים מן המאה ה-19. דוגמאות:
לפלס: "מצבו הנוכחי של העולם הוא פועל יוצא של מה שהיה רגע אחד קודם".
פואנקרה: "אילו ידענו את חוקי הטבע ואת העולם ברגע ההתחלה שלו, היינו יכולים לנבא מה יהיה מצב העולם רגע אחד אחר כך".
- ג. אין חובה ללמד את הנושא "קרינה של גוף שחור", אולם כדאי לתאר את "הקטסטרופה של האולטרה-סגול" בקשר לקרינה של גוף שחור. יש להציג את הנחת פלאנק בדבר 'חבילות' אנרגיה (קוונטים), שבאמצעותן הסביר פלאנק את התפלגות הקרינה הנפלטת מגוף שחור.

הדגמה איכותית של האפקט הפוטואלקטרי

- א. כמבוא לאפקט הפוטואלקטרי, יש להציג שתי תופעות שהיו מוכרות בשלהי המאה ה-19:
(1) קרינה אולטרה-סגולה הפוגעת בכדור הטעון במטען שלילי, משפיעה על קצב ההתפרקות החשמלית בינו לבין כדור הטעון במטען חיובי. לעומת זאת, אור נראה אינו משפיע על ההתפרקות החשמלית (תגלית של הרץ משנת 1887).
(2) סרט צילום מושפע מאור לבן, אולם אינו מושפע מאור אדום.
תופעות אלה לא התיישבו עם הפיזיקה הקלאסית, שבה האנרגיה של גל פרופורציונית לריבוע משרעת הגל.
- ב. את האפקט הפוטואלקטרי מוצע להציג תחילה באמצעות ניסוי איכותי (הטלת קרינות שונות על לוחות מתכת שונים, שכל אחד מהם מונח על לוחית של אלקטרוסקופ טעון). יש להציג את הניסוי האיכותי כך שיעורר שאלות לגבי עובדות שאינן מתיישבות עם הפיזיקה הקלאסית.

ג. חשוב שתלמידים יוכלו לתאר במילים את האפקט הפוטואלקטרי ובינו כי התופעה של עקירת אלקטרונים ממתכת על-ידי קרינה אינה סותרת את התורה הקלאסית. (תלמידים נוטים לחשוב להפך).

חקירת תלות מתח העצירה בתדירות הקרינה הפוגעת

א. לאחר הטיפול האיכותי, יחקרו התלמידים באמצעות ניסוי את הקשר שבין מתח העצירה בתא פוטואלקטרי לבין תדירות הקרינה הפוגעת בפולט, ואת השפעת עצמת ההארה על פליטת אלקטרונים.

ב. יש להציג את ההנחות של איינשטיין לאפקט הפוטואלקטרי ואת נוסחת איינשטיין. יש להדגיש את המושגים: "קוונטיזציה", "אנרגיית קשר".

ג. מומלץ להראות כי שלושת הגדלים - הקבוע של פלאנק, מכפלת תנע קווי באורך, תנע זוויתי - נמדדים כולם באותה יחידה.

ד. כדי לפשט את החישובים מומלץ לפתח את הנוסחה:

$$E_{\text{פוטון}} \text{ (eV)} = \frac{12,400}{\lambda \text{ (Å)}}$$

חשוב להדגיש כי נוסחה זו מתאימה רק עבור פוטונים. (תלמידים נוטים להשתמש בה גם עבור אלקטרונים).

ה. מומלץ להציג ציטטות המעידות כי הרעיונות של איינשטיין לגבי האפקט הפוטואלקטרי נדחו על-ידי הקהילה המדעית קרוב ל-20 שנה. דוגמאות לציטטות:

הוועדה שדנה בשנת 1913 במועמדותו של איינשטיין לחברות באקדמיה הפרוסית למדעים (פלאנק היה אחד מחברי הוועדה), המליצה על קבלתו של איינשטיין בזכות הישגיו המפוארים, למרות מה שהיא כינתה "הספקולציה הלא מוצלחת שלו בדבר האופי הקוונטי של האור...".

מיליקן (1916): "... מפתיע שהתוצאות הניסיוניות מתאימות לנוסחת איינשטיין שנבעה מן התאוריה הקוונטית שכיום נזנחה".

ו. יש לציין יישומים ומנגנונים המבוססים על האפקט הפוטואלקטרי, כמו מנגנוני אזעקה ומכפיל-אור.

הדגמות וניסויים

א. ניסוי איכותי להדגמת האפקט הפוטואלקטרי: מניחים לוח ברזל על אלקטרוסקופ הטעון במטען שלילי, ומאירים אותו תחילה באור לבן ואחר כך בקרינה אולטרה-סגולה. חוזרים על הניסוי עם לוח פח מגולוון (במקום לוח הברזל). מגלים כי האלקטרוסקופ נפרק רק במצב שבו לוח הפח המגולוון מוקרן בקרינה אולטרה-סגולה.
שאלות שהניסוי מעורר:

- (1) מדוע אלקטרונים אינם נעקרים מלוח הברזל?
 - (2) מדוע רק קרינה על-סגולה עוקרת אלקטרונים מלוח הפח המגולוון?
 - (3) מדוע פליטת האלקטרונים היא מיידית, גם כשהקרינה חלשה?
- ב. ניסוי כמותי לחקר האפקט הפוטואלקטרי (מציאת הקשר בין תדירות הקרינה הפוגעת בפולט לבין האנרגיה הקינטית של האלקטרונים הנפלטים ממנו): מחברים את הפולט ואת הקולט של תא פוטואלקטרי למקור מתח משתנה, כך שפוטנציאל הפולט גבוה מפוטנציאל הקולט. מאירים את הפולט בתדירויות שונות של אור, ובכל פעם מודדים את המתח המינימלי הדרוש (בין הקולט לפולט) כדי שאלקטרונים לא יגיעו אל הקולט (הזרם במעגל מתאפס). ניתוח הממצאים כולל גרף המתאר את האנרגיה הקינטית של האלקטרונים כפונקציה של תדירות הקרינה הפוגעת.
בניסוי זה יש לבחון גם את השפעת עצמת ההארה על האנרגיה הקינטית של האלקטרונים.

4.2 אפקט קומפטון (1 שעה)

- א. יש להציג את אפקט קומפטון באופן איכותי.
- ב. חשוב להסביר לתלמידים כיצד אפקט קומפטון מעיד על האופי החלקיקי של הקרינה האלקטרומגנטית.
- ג. יש לייחס לפוטון תנע. את הביטוי לתנע ניתן להציג ללא הוכחה פורמלית. כדאי לציין כי גם התנע הוא גודל קוונטי.

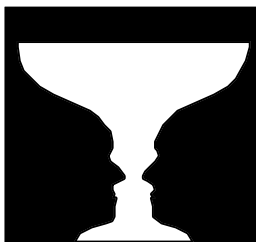
4.3 קרינת רנטגן לאור הסבריו של איינשטיין (1 שעה)

- א. יש לציין את חלקי השפופרת ליצירת קרני רנטגן ואת תפקידו של כל חלק.
- ב. יש לדון בגרף המתאר את עצמת הקרינה היחסית (הנפלטת מן השפופרת) כתלות באורך הגל ולהסביר מדוע מתקבל אורך-גל מינימלי.

ג. יש לקשור את החלק הרציף של הגרף עם קרינת האטה (Bremsstrahlung) ואת החלק הבדיד של הגרף - עם מעבר של אלקטרונים פנימיים (במתכת שממנה עשויה המטרה) מרמות אנרגיה גבוהות לרמות נמוכות. עם זאת, חשוב לזכור שהתלמידים אינם בקיאים בנושא רמות האנרגיה.

4.4 המודל הדואלי של הקרינה האלקטרומגנטית (1 שעה)

- א. יש לאפיין את התופעות שניתן להסביר באמצעות המודל הגלי ואת התופעות שניתן להסביר באמצעות המודל החלקיקי.
- ב. המודל הדואלי מעורר קשיים מושגיים: לא רק שאין מודל אחד המתאר את כל תופעות האור, אלא שלא ניתן להפריד את המודל הגלי מן המודל החלקיקי. בתופעה שבה מתבטא האופי החלקיקי - הביטוי hf לאנרגיה של פוטון כולל את המושג תדירות שהוא מושג גלי. מאידך גיסא, את תבנית ההתאבכות (שבה מתבטא המודל הגלי) מגלים על מסך - וזו אינטראקציה של אור עם חומר, כלומר תופעה בעלת אופי חלקיקי.
- ג. התבוננות ודיון בציוור של אָפֶּר (ראו תרשים) עשויים לסייע בהבנת התמונה הדואלית.



ציוור של אָפֶּר

- ד. מומלץ לדון בניסוי של טיילור כדי לקשור בין התמונה הגלית לתמונה החלקיקית. כתרגיל, מומלץ להציג תמונה של התאבכות ולדון במאפייני התמונה המתאימים לאופי הגלי ובמאפייני התמונה המתאימים לאופי החלקיקי.

פרק 5: מבנה האטום

שעות	הנושא
2	5.1 גילוי האלקטרון
1	5.2 מודל האטום על פי תומסון
2	5.3 ניסוי רתרפורד והמודל הפלנטרי של האטום
1	5.4 ספקטרום הפליטה הניסיוני של אטום המימן
4	5.5 מודל בוהר לאטום המימן
2	5.6 ניסוי פרנק-הרץ
4	5.7 ספקטרום בליעה וספקטרום פליטה
1	5.8 עקרון ההתאמה של בוהר
17	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2	ניסויים והדגמות: - שפופרת צלב מלטזי: הסחה בשדה חשמלי ובשדה מגנטי. - מדידת היחס e/m. - אלקטרוליזה.		- קרני קתודה - רקע היסטורי (ויכוחים לגבי מהות הקרניים). - ניסויים לחשיפת תכונות קרני קתודה.	5.1 גילוי האלקטרון
1			- הצגת המודל ומגבלותיו.	5.2 מודל האטום על פי תומסון
2	- המחשת המודל בעזרת מתקן מכני (ראו הערות דידקטיות). - הדמיית מחשב: פיזור חלקיקי α על-ידי גרעין זהב.		- ניסוי רתרפורד; גרעין האטום. - חישוב רדיוס אטום המימן בעזרת ערך ניסיוני של אנרגיית היינון. - מגבלות המודל.	5.3 ניסוי רתרפורד והמודל הפלנטרי של האטום
1	- מדידת אורכי הגל בתחום הנראה, הנפלטים מגז מימן חד-אטומי.	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	- סדרות לימן, בלמר, פשן וברקט, ומקומן בספקטרום האלקטרומגנטי. - נוסחה אמפירית לחישוב אורכי הגל של הסדרות.	5.4 ספקטרום הפליטה הניסיוני של אטום המימן

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
4		$2\pi r_n \cdot mv_n = nh$ $r_n = a_0 n^2$ $a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2}$ <p>כאשר:</p> $E_n = -\frac{R^*}{n^2} = -\frac{13.6eV}{n^2}$ <p>כאשר:</p> $R^* = \frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^2} = 13.6eV$	<ul style="list-style-type: none"> - הנחות בוהר. - גזירת ביטויים עבור "רמות האנרגיה" האטומיות ועבור רדיוסי המסלולים של האלקטרונים. - דיאגרמת רמות אנרגיה (רמות בדידות ורצף). - חישוב אורכי הגל של ספקטרום הפליטה. - המושגים: "מצב יסוד" של האטום, "מצבים מעוררים", "אנרגית יינון". 	5.5 מודל בוהר לאטום מימן
2	- ניסוי פרנק-הרץ או דומה לו.		- מערכת הניסוי, מהלך הניסוי ותוצאותיו.	5.6 ניסוי פרנק-הרץ
4			<ul style="list-style-type: none"> - ספקטרום פליטה וספקטרום בליעה של גזים שונים. - עירור אטומי על-ידי חלקיקים. - השוואה בין ספקטרום פליטה וספקטרום בליעה של אותו אטום. - הקשר בין קרינה הנפלטת מאטום לבין רמות האנרגיה האטומיות. 	5.7 ספקטרום פליטה וספקטרום בליעה
1			<ul style="list-style-type: none"> - הצגת העיקרון. - חישוב תדירויות הקרינה הנפלטת מאטום מימן בעל רדיוס גדול - בעזרת התורה האלקטרומגנטית הקלאסית ובעזרת מודל בוהר. 	5.8 עקרון ההתאמה של בוהר

מבנה האטום: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

5.1 גילוי האלקטרון (2 שעות)

- א. מומלץ לסקור את חילוקי הדעות בסוף המאה ה-19 (לפני גילוי האלקטרון) לגבי מהותן של קרני קתודה שנוצרו בשפופרות קתודיות.
- ב. יש לבצע ניסויים שמטרתם לחקור תכונות קרני קתודה, וניסויים שמטרתם למדוד את היחס e/m לגבי האלקטרון.
- ג. מומלץ לבצע ניסוי באלקטרוליזה, שממנו ניתן להסיק כי מטענים חשמליים הם תמיד כפולה שלמה של מטען בסיסי.

הדגמות וניסויים

- ניסוי א: חקר קרני קתודה. דוגמה למערכת ניסוי מתאימה היא השפופרת המכונה **צלב מלטזי**. באמצעות השפופרת ניתן:
- (1) לבחון צללית שנוצרת בשעה שמקרנינים קרני קתודה וצללית שנוצרת בשעה שמקרנינים אור, ולהשוות בין שתי הצלליות.
- (2) לבחון את השפעתו של שדה מגנטי על קרני קתודה.
- ניסוי ב: מדידת היחס e/m . מערכת ניסוי מתאימה היא, לדוגמה, השפופרת המכונה **שפופרת הטיה**. בניסוי זה ניתן להאיץ אלקטרונים במתח ידוע, להטות אותם בשדה חשמלי ו/או בשדה מגנטי ולחקור את תנועתם בהשפעת שני השדות.
- ניסוי ג: אלקטרוליזה. הצעה לניסוי מופיעה למשל בכתב העת **תהודה**, כרך 15, חוברת 2.

5.2 מודל האטום על פי תומסון (1 שעה)

אין צורך להרבות בחישובים של מרחקי אלקטרונים ממרכזי האטומים השונים. ניתן להסתפק בתיאור המודל, ציון יתרונותיו (יציבות האטום) וחישוב תדירויות האור הנפלט מאטומי מימן על פי המודל. התדירויות המתקבלות אינן תואמות את הערכים הנמדדים.

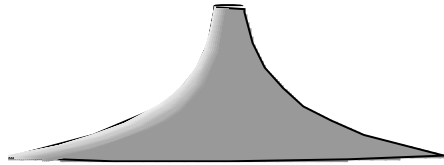
5.3 ניסוי רתרפורד והמודל הפלנטרי של האטום (2 שעות)

א. יש להציג את ההשערה של רתרפורד לגבי תוצאות הניסוי, לתאר את מערך הניסוי ואת ממצאיו.

- ב. יש לתאר את המודל שבאמצעותו הסביר רתרפורד את תוצאות הניסוי - רוב המסה של האטום מרוכזת בגרעין קטן ביחס לאטום, והמטען החשמלי של הגרעין הוא חיובי.
- ג. מומלץ לחשב בעזרת המודל הפלנטרי את רדיוס האטום המימן (על פי החוק השני של ניוטון לגבי האלקטרון, הביטוי לאנרגיה המכנית הכוללת של מערכת הגרעין והאלקטרון, ואנרגיית היינון של אטום המימן הידועה באופן אמפירי).
- ה. יש להציג את מגבלות המודל הפלנטרי:
- (1) האטומים יציבים למרות שהאלקטרונים מואצים. אלקטרונים מואצים אמורים לקרוך, לאבד אנרגיה וליפול בסופו של דבר על גרעין האטום.
 - (2) לא נמצאה דרך לקשור בין המודל הפלנטרי לבין הספקטרום של אטום המימן.
 - (3) המודל אינו קובע את רדיוס האטום, ולא ברור מדוע לכל אטומי המימן (בתנאים 'רגילים') אותה אנרגיית קשר.

הדגמות וניסויים

- א. מומלץ להיעזר במתקן מכני, כדוגמת זה המתואר בתרשים, כדי להסביר את פיזור חלקיקי α . (מניחים את המתקן על משטח אופקי ומגלגלים לעברו כדורי פלדה.)



מודל מכני להדגמת פיזור חלקיקים חיוביים על-ידי גרעין אטום

- ב. מומלץ להשתמש בהדמיות מחשב לתיאור מסלולים של חלקיקי α המפוזרים על-ידי אטומים הבנויים על פי מודל תומסון ועל-ידי אטומים הבנויים על פי המודל של רתרפורד. לגבי כל אחד משני המודלים, מומלץ לבנות (באמצעות מחשב) גרף המתאר את מספר החלקיקים המפוזרים כפונקציה של הזווית.

5.4 ספקטרום הפליטה הניסיוני של אטום המימן (1 שעה)

- מומלץ לעסוק תחילה באורכי הגל של ארבעת הקווים הספקטראליים בתחום הנראה, וכן בנוסחה האמפירית של בלמר. לאחר מכן מתארים את סדרת בלמר הכללית, וכן שלוש או ארבע סדרות נוספות, ולבסוף מציגים את נוסחת רידברג.

הדגמות וניסויים

מומלץ לערוך מדידה ספקטרוסקופית של אורכי הגל של האור הנראה, הנפלט משפופרת התפרקות המכילה גז מימן. (כאשר מעבירים בשפופרת זרם, היא מכילה לצד מולקולות המימן גם אטומי מימן).

5.5 מודל בוהר לאטום המימן (4 שעות)

- א. יש להציג את ההנחות של בוהר לגבי אטום המימן: הנחה ראשונה בדבר קיום מסלולים סטציונריים שבהם האלקטרון אינו קורן; הנחה שנייה בדבר פליטה או בליעה של אנרגיה במעבר אלקטרון ממסלול סטציונרי אחד למשנהו. אם המושג "תנע זוויתי" מוכר לתלמידים, ניתן להציג את ההנחה השלישית כקוונטיזציה של התנע הזוויתי: $r_n m v_n = n(h/2\pi)$. אם מושג זה אינו מוכר לתלמידים, ניתן להציג את ההנחה השלישית כקוונטיזציה של הגודל המתקבל ממכפלת התנע הקווי של האלקטרון בהיקף מסלולו: $2\pi r_n \cdot m v_n = nh$.
- ב. חשוב לקשור את ההנחה השנייה של בוהר עם חוק שימור האנרגיה. יש להראות כי חוק שימור התנע מחייב שאטום המימן יירתע, וכי אנרגיה זו ניתנת להזנחה ביחס לאנרגיות המעורבות.
- ג. חשוב להדגיש כי מודל האטום של בוהר מבוסס על הנחות קלאסיות ועל הנחות שאינן קלאסיות.
- ד. יש לפתח את הביטוי עבור רדיוסי המסלולים האפשריים של אלקטרון באטום המימן, ואת הביטוי עבור האנרגיה המכנית הכוללת של מערכת הפרוטון והאלקטרון - אנרגיה קינטית ופוטנציאלית-חשמלית. (האנרגיה הקינטית של הפרוטון זניחה ביחס לאנרגיות האחרות).
- ה. מושגים חדשים: "רמות אנרגיה", "מצב יסוד", "מצבים מעוררים", "אנרגיית יינון". נוסף לייצוג רמות האנרגיה על-ידי נוסחה, יש לייצגן על-ידי הסכמה המקובלת.
- חשוב שהתלמידים יבינו מדוע משתמשים במונח **רמות אנרגיה של האטום** ולא במונח **רמות אנרגיה של האלקטרון**. כמו כן חשוב שתלמידים יבינו מדוע רמות האנרגיה נקבעות רק עד כדי קבוע. (לעתים קרובות, תלמידים אינם מקשרים בין נושאי לימוד שונים בפיזיקה, למשל בין המכניקה לבין הפיזיקה המודרנית).

5.6 ניסוי פרנק-הרץ (2 שעות)

- א. מומלץ לתאר את הניסוי המקורי שבוצע על-ידי פרנק והרץ.
- ב. חשוב להדגיש כי העובדה שהאנרגיה הקינטית של האלקטרונים אינה משתנה בקירוב כתוצאה מהתנגשויות אלסטיות, נובעת מצירוף של שני גורמים:

- (1) מסת אטום הכספית גדולה מאוד ממסת האלקטרון.
- (2) מהירות האלקטרונים גדולה מאוד ביחס למהירות אטומי הכספית. (ניתן להשוות בין המהירויות על-ידי חישוב מהירות אלקטרון שמואץ במתח של 1 וולט, למשל, וחישוב, במסגרת המודל של גז אידאלי, של מהירות אטום כספית בטמפרטורה של 150°C).
- ג. תלמידים נוטים לחשוב כי ירידות בעצמת זרם במתחים של 4.9V, 9.8V וכו' מתאימות למעברים בין רמת היסוד ורמות אנרגיה מעוררות שונות. לכן חשוב לעמוד על כך שמדובר במעבר בין רמת היסוד ובין אותה רמה מעוררת.

הדגמות וניסויים

מומלץ לבצע ניסוי דמוי ניסוי פרנק-הרץ, למשל באמצעות שפופרת המכילה גז כסנון או ארגון.

5.7 ספקטרום פליטה וספקטרום בליעה (4 שעות)

- א. יש להציג תצלומים המהווים ספקטרה של פליטה וספקטרה של בליעה, ולהסיק כי:
- (1) בתנאים מסוימים, גז פולט קרינה. הקרינה אינה נפלטת בתחום רציף של אורכי גל, והיא אופיינית לסוג הגז הפולט את הקרינה.
- (2) בתנאים מסוימים, גז בולע קרינה. הקרינה אינה נבלעת בתחום רציף של אורכי גל, והיא אופיינית לסוג הגז הבולע את הקרינה.
- ב. יש לדון בשני מנגנונים לעירור אטום:
- (1) התנגשות האטום עם חלקיק אחר (כגון אלקטרון, יון, מולקולה טעונה). שימוש בתופעה זו נעשה למשל בהתפרקות חשמלית המתרחשת בשלטי פרסומת שבהם מצוי גז ניאון.
- (2) בליעה של פוטון.
- כדי שעירור אטומי יתרחש במנגנון הראשון, אנרגיית החלקיק צריכה להיות גדולה מן הפער בין רמת היסוד לרמה מעוררת או שווה לו. במנגנון השני, אנרגיית הפוטון צריכה להיות שווה לפער בין רמות האנרגיה האטומיות.
- ג. יש לציין כי בתהליך של עירור אטומי באמצעות קרינה אלקטרומגנטית, תתרחשנה התופעות הבאות:
- (1) הקרינה הנפלטת מן הגז יכולה לכלול אורכי גל שלא נכללו בקרינה הפוגעת.
- (2) בספקטרום הפליטה מופיעים קווים שחורים, למרות שאורכי הגל שנבלעו גם נפלטו.
- ד. יש לדון ביישום של זיהוי אטומים על פי הקרינה הנפלטת מהם. בהקשר זה ראוי להציג את הספקטרום של אור השמש (קווי פרנהופר).

מומלץ לדון גם בשיטה לקביעת מהירות תנועתם של גרמי שמים על פי הסחת אורכי הגל של הקרינה הנפלטת מהם (אפקט דופלר, באופן איכותי).

5.8 עקרון ההתאמה של בוהר (1 שעה)

א. ניסוח עקרון ההתאמה: תורת הקוונטים צריכה לתת תוצאות דומות לתוצאות הפיזיקה הקלאסית בגבול של מספרים קוונטיים גדולים.

ניסוח 'פשוט' יותר: התאוריה של בוהר צריכה לתת תוצאות דומות לתוצאות הפיזיקה הקלאסית עבור רמות אנרגיה גבוהות של אטום המימן.

ב. אפשר להדגים את עקרון ההתאמה בשתי דרכים:

(1) לפתח את הביטוי לתדירויות הקרינה הנפלטת מאטום מימן על פי התאוריה הקלאסית

(מתקבלת התדירות $f = \frac{e}{2\pi r} \sqrt{\frac{k}{mr}}$ וכפולות שלמות שלה) ועל פי מודל בוהר, עבור אטום

שיורד מרמת אנרגיה גבוהה לרמת אנרגיה גבוהה פחות. (במקרה זה מתקבל הביטוי

$f = \frac{e}{2\pi r} \sqrt{\frac{k}{mr}} p$, כאשר p הוא מספר טבעי המייצג את הפרש המספרים הקוונטיים של שתי

הרמות.)

(2) על סמך עקרון ההתאמה של בוהר, ניתן להסיק את תנאי הקוונטיזציה של בוהר - התנע

הזוויתי של האלקטרון שווה לכפולה שלמה של \hbar .

כפעילות סיכום של הנושא "מבנה האטום", מוצע:

1. לערוך רשימה של העובדות הניסוייות הקשורות במבנה האטום.
2. לתאר את המודל של בוהר (ורתרפורד) לאטום המימן.
3. להסביר באמצעות המודל את העובדות הניסוייות שתוארו בסעיף (1) לעיל.
4. לנבא תופעות על סמך המודל ולבחון את הניבויים (למשל לגבי אטום הליום מיונן פעם אחת).
5. לסקור את מגבלות המודל.

פרק 6: מבוא לתורת הקוונטים - דואליות החומר

שעות	הנושא
3	6.1 גלי דה-ברויי
2	6.2 המודל הקוונטי-הסתברותי של אור ושל חלקיקים
2	6.3 עקרון אי-הוודאות
7	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
3	- התאבכות אלקטרוניים לאחר מעברם דרך עלה גבישי דק.	$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}$	- הנחת דה-ברויי. - ניסוי תומסון (G.P. Thomson): - התאבכות אלקטרוניים. - הסבר הקוונטיזציה של אנרגיית האטום בעזרת גלים עומדים, ומגבלותיו.	6.1 גלי דה-ברויי
2			- עקרון הקומפלמנטריות של בוהר. - ההסבר של מקס בורן להתאבכות משני חריצים. - תוצאות ניסויים של מעבר פוטונים זה אחר זה דרך חריץ ודרך זוג חריצים. - תוצאות ניסויים של מעבר אלקטרוניים זה אחר זה דרך חריץ ודרך זוג חריצים.	6.2 המודל הקוונטי-הסתברותי של אור ושל חלקיקים
2		$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$	- הכרת העיקרון. - יישום העיקרון לעקיפה בסדק.	6.3 עקרון אי-הוודאות

מבוא לתורת הקוונטים - דואליות החומר: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

6.1 גלי דה-ברויי (3 שעות)

- א. יש לציין כי אלקטרונים מתנהגים כחלקיקים נקודתיים, למשל כאשר אלקטרון מפעיל מכשיר מדידה כגון מונה-חלקיקים.
- ב. על סמך הנחת דה-ברויי, מומלץ לחשב את אורך הגל המיוחס לאלקטרון בעל אנרגיה קינטית של מספר אלקטרון-וולט. לאור התוצאה, יש לדון בשאלה מהו סדר הגודל של רוחב החריצים בסריג עקיפה שיאפשר לצפות בתבנית ההתאבכות של האלקטרונים.
- ג. מומלץ לבצע ניסוי של התאבכות אלקטרונים, ובעזרת תוצאות הניסוי לאשש את הנחת דה-ברויי (ראו להלן "הדגמות וניסויים").
- ד. מומלץ להראות כי ההנחה הראשונה של בוהר מתישבת עם התפיסה שלפיה מצב יציב של אלקטרון באטום מתרחש כאשר הגל המיוחס לאלקטרון הוא גל עומד, שנוצר לאורך המסלול המעגלי של האלקטרון.

הדגמות וניסויים

- א. בעזרת שפופרת של חברת Teltron (Tel 555) ניתן לבצע ניסוי של התאבכות אלקטרונים: אלקטרונים שהואצו עוברים דרך עלה גבישי המורכב מצירוף מקרי של מיקרוגבישים. על חזית השפופרת - זכוכית המצופה בחומר פלורסצנטי - מתגלים עיגולים בהירים וכהים. את רדיוסי העיגולים אפשר לשנות על-ידי שינוי המתח המאיץ את האלקטרונים.
- ב. לצד הניסוי הנ"ל, ניתן להעמיד מערכת ניסויית נוספת, שבה אור פוגע בשני סריגים, שבהם חריצי הסריג האחד מאונכים לחריצי הסריג השני. כאשר זוג הסריגים מסתובב, מתגלה תבנית התאבכות הדומה לתבנית ההתאבכות שבשפופרת האלקטרונים.

6.2 המודל הקוונטי-הסתברותי של אור ושל חלקיקים (2 שעות)

- א. חשוב להדגיש כי עקרון ה"השלמה" (קומפלמנטריות) אומר שהתכונה החלקיקית והתכונה הגלית של חומר הן היבטים משלימים של ישות קוונטית. בנסיבות מסוימות החומר מתנהג כחלקיק ובנסיבות אחרות הוא מתנהג כגל. ההכרעה אם הישות מתנהגת כחלקיק או כגל תלויה במכשיר המדידה שבו משתמשים.
- ב. יש להציג את הנחת בורן: הגל המיוחס לאלקטרון הוא גל רק במובן ההסתברותי; הוא ישות מתמטית מופשטת לחלוטין.

ג. חשוב לציין כי על פי התפיסה של בורן, אלקטרונים אינם חלקיקים ממשיים העשויים חומר, אלא ישויות מתמטיות. את המציאות הקוונטית לא ניתן להסביר באמצעות "השכל הישר".

ד. יש לתאר תוצאות של ניסוי: משגרים פוטון אחר פוטון כלפי מסך בעל שני חריצים סמוכים. לאחר שהפוטונים עוברים את החריצים, הם פוגעים בלוח שעליו נרשמות פגיעותיהם. כאשר רק חריץ אחד פתוח - מתקבל כתם בהיר שנוצר מפגיעת הפוטונים שעברו בחריץ ופגעו בלוח, כדוגמת תבנית העקיפה המתקבלת מפגיעת אלומת אור בחריץ יחיד. כאשר שני החריצים פתוחים, התמונה המתקבלת מפתיעה מאוד: למרות שדרך כל חריץ עובר פוטון יחיד - אין מקבלים על לוח המטרה כתם בהיר גדול וגם לא שני כתמים בהירים מול שני החריצים. מקבלים סדרה של פסים בהירים וכהים, המעידים על פעולת התאבכות, כאילו הפוטונים הם גלים שעברו בעת ובעונה אחת בשני החריצים והתאבכו ביניהם על הלוח. שאלות שהניסוי מעורר:

- (1) בעוברו דרך חריץ אחד, כיצד הפוטון 'יודע' שהחריץ השני פתוח ושיעליו לנוע' לאחד מאזורי הפסים הבהירים?
- (2) בעוברו דרך חריץ אחד, כיצד הפוטון 'יודע' שהחריץ השני סגור, ושיהוא חופשי' לפגוע בכל נקודה בלוח שמעבר לחריצים?
- (3) כיצד פתיחתו או סגירתו של חריץ אחד יכולה להשפיע על התנהגות הפוטון שעובר בחריץ השני, בלי שהחריצים מחליפים ביניהם מידע על מצבם?
- (4) כיצד פוטון בודד, שעובר בחריץ אחד, יכול לגלות תכונה של התאבכות, שהיא תוצאה של מעבר בשני החריצים בעת ובעונה אחת?

6.3 עקרון אי-הוודאות (2 שעות)

- א. יש להדגיש כי בעולם התת-אטומי לא ניתן לדעת בעת ובעונה אחת את מקומו ואת מהירותו של חלקיק כמו גם את הזמן והאנרגיה. אי-ידיעה זו נובעת מכך שמדידת תכונה אחת של החלקיק משבשת את האפשרות למדוד את תכונתו האחרת. כלומר, בעולם התת-אטומי לא ניתן לבצע מדידה בלי לשבש את המערכת הנמדדת.
- ב. דוגמה מרכזית של עיקרון זה היא עקיפת אלקטרונים בסדק יחיד. יש להראות דוגמה זו.
- ג. חשוב להדגיש כי אי-הוודאות היא עקרונית ואינה תוצאת מגבלות טכניות של מכשירי המדידה.
- חשוב להדגיש כי בגלל אי-היכולת לקבוע בו-זמנית את המקום ואת המהירות של חלקיק, לא ניתן לקבוע את מסלולו של חלקיק תת-אטומי.

פרק 7: הגרעין ומבוא לחלקיקים יסודיים

שעות	הנושא
1	7.1 מבנה הגרעין והכוח החזק
3	7.2 תהליכים גרעיניים
4	7.3 התפרקות רדיואקטיבית
3	7.4 אנרגיית קשר גרעינית
3	7.5 חלקיקים יסודיים
14	סה"כ שעות

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
1			<ul style="list-style-type: none"> - תופעות שמהן ניתן ללמוד על מבנה הגרעין: רדיואקטיביות, פיזור רתרפורד. - המושגים: "מספר אטומי", "מספר מסה", "יסוד", "איזוטופ". - מרכיבי הגרעין, מסותיהם ומטעניהם. - הכוח הגרעיני החזק ותכונותיו. 	7.1 מבנה הגרעין והכוח החזק
3			<ul style="list-style-type: none"> - תהליכי פליטת α, β^-, β^+, γ, גילוי הנויטרינו (בהקשר לשימור חוקי השימור). - לכידת אלקטרון. 	7.2 תהליכים גרעיניים
4	<ul style="list-style-type: none"> - בניית רמות אנרגיה גרעיניות של גרעין-בן, על סמך ערכי האנרגיה של הקרינה הרדיואקטיבית הנפלטת מגרעין-האב. 	$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ $N = N_0 e^{-\lambda t}$ $R = \lambda N$ $T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$	<ul style="list-style-type: none"> - המושג "סדרה רדיואקטיבית" (הכרת דוגמה). - אקראיות ההתפרקות הרדיואקטיבית של גרעין יחיד, החוקיות הסטטיסטית בהתפרקות גרעיניים במדגם גדול, המושג "קבוע הדעיכה". - מספר גרעיני-האב במדגם רדיואקטיבי כפונקציה של הזמן; המושגים: "זמן מחצית החיים", "פעילות". - יישומים: קביעת גיל של עצמות בעזרת כמויות פחמן, הריסת תאים סרטניים, איתור דליפת מים מצנור הטמון בקרקע. 	7.3 התפרקות רדיו-אקטיבית
3	<ul style="list-style-type: none"> - בניית גרף של אנרגיית קשר ממוצעת כפונקציה של מספר הנוקליאונים. 	$\Delta E = \Delta mc^2$	<ul style="list-style-type: none"> - האקוויוולנטיות בין מסה ואנרגיה. - אנרגיית הקשר הגרעינית, תלות אנרגיית הקשר הגרעינית הממוצעת לנוקליאון במספר הנוקליאונים. - תהליכי ביקוע גרעיני ויישומיו. - תהליכי מיזוג גרעיני. 	7.4 אנרגיית קשר גרעינית
3			<ul style="list-style-type: none"> - הכוחות היסודיים, וחלקיקים נושאי הכוחות. - חלקיקים ואנטי-חלקיקים. - אניהילציה ויצירת זוגות (איכות). 	7.5 חלקיקים יסודיים

הגרעין ומבוא לחלקיקים יסודיים: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות.

7.1 מבנה הגרעין והכוח החזק (1 שעה)

- א. מומלץ לפתוח בתיאור תופעות שמהן ניתן ללמוד על מבנה הגרעין, כמו רדיואקטיביות. כדאי לציין את הקרינות השונות הנפלטות בתהליך ולהסביר מה מתרחש כאשר קרינות רדיואקטיביות עוברות בשדה מגנטי, ומה מתרחש כאשר הן עוברות בשדה חשמלי.
- ב. יש לחזור על המושגים: "מספר אטומי", "מספר מסה", "יסוד", "איזוטופ".
- ג. יש להסביר כי גרעיני האטומים בנויים מנויטרונים ופרוטונים, וכי משיכה ביניהם על-ידי הכוח הגרעיני החזק היא קצרת טווח (מסדר גודל של גרעין האטום – 2-3 פרמי).
- ד. בשלב זה ניתן לציין את תרומתם של הנויטרונים, חסרי המטען החשמלי, ליציבות הגרעין.
- ה. על התלמידים להכיר את סדרי הגודל של קוטרי הגרעינים וקוטרי אטומים.

7.2 תהליכים גרעיניים (3 שעות)

- א. על התלמידים לדעת כיצד משתנה מספר המסה והמספר האטומי של גרעין בתהליכים אלה: פליטת α , פליטת β^- , פליטת β^+ , פליטת γ , לכידת אלקטרון.
- ב. על התלמידים לדעת כי חלקיקי β נפלטים ברצף של אנרגיה, מערך אפס עד ערך מרבי האופייני לגרעין. קרינת α עשויה להיפלט מגרעינים מסוג מסוים, במספר אנרגיות מוגדרות האופייניות לגרעין. יש לציין את סדרי הגודל של אורך-הגל של קרינת α .
- ג. בקשר לקרינה מסוג β^- , יש להבהיר:
 1. על סמך עקרון אי-הוודאות, מדוע אלקטרון אינו יכול להיות במצב קשור בתוך הגרעין (בהנחת אינטראקציה חשמלית).
 2. מדוע קרינת β עשויה להיפלט ברצף של ערכי אנרגיה. כדאי להזכיר את 'הכוח החלשי' ואת דמיונו לקרינה האלקטרומגנטית. (בשלב זה של ההוראה, לא מומלץ להוסיף כי הוא מועבר על-ידי חלקיק כבד).
- ד. יש להסביר את קיומם של הנויטרינו והאנטי-נויטרינו ומדוע 'הומצאו' חלקיקים אלו זמן רב לפני שהוכח קיומם.
- ה. יש להסביר באופן איכותי את ההבדל בין תהליכי הביקוע לבין תהליכי המיזוג.

7.3 התפרקות רדיואקטיבית (4 שעות)

- א. מומלץ לפתוח את הנושא בתיאור הרקע ההיסטורי לגילוי הרדיואקטיביות על-ידי הנרי בקרל ולחקר הרדיואקטיביות על-ידי הזוג מארי ופייר קירי.
- ב. יש להציג לתלמידים לפחות דוגמה אחת של "סדרה רדיואקטיבית" (משפחה רדיואקטיבית).
- ג. על התלמידים להכיר היטב את המושגים: "זמן מחצית החיים", "קבוע הדעיכה", "פעילות".
- ד. יש להדגיש את היישומים והשימושים השונים של תהליכי ההתפרקות הרדיואקטיבית ברפואה ובתעשייה.

קשי תלמידים

תלמידים נוטים לסבור כי על פי זמן מחצית החיים אפשר לקבוע מתי גרעין מסוים יתפרק. חשוב להבחין בין אי יכולת הניבוי לגבי גרעין מסוים לבין יכולת הניבוי לגבי מספר גדול של גרעינים. בהקשר זה יש להראות שלמרות שהגרף המתקבל דומה לגרף הזרם במעגל RC, מדובר בתהליך אחר.

פעילויות

קביעת רמות אנרגיה גרעיניות - דוגמה: התהליך הרדיואקטיבי ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + \alpha$. ניתן להיכנס לאתר אינטרנט שבו מוצגים איזוטופים רדיואקטיביים, סוגי הקרינה שפולט כל איזוטופ וערכי האנרגיות של החלקיקים הרדיואקטיביים הנפלטים. דוגמה לאתר כזה:

<http://nucldata.nuclear.lu.se/nucldata/toi/index.asp>

אטומי האורניום ${}_{92}^{238}\text{U}$ פולטים חלקיקי α בשלושה ערכי אנרגיה, וקרינת גמא - בשני ערכי אנרגיה. על פי המסה של האטום ${}_{92}^{238}\text{U}$, המסה של האטום ${}_{90}^{234}\text{Th}$ וערכי האנרגיה של ה- α וה- γ , ניתן לחשב את ערכי האנרגיה של שתי רמות מעוררות של אטום ה- ${}_{90}^{234}\text{Th}$.

7.4 אנרגיית קשר גרעינית (3 שעות)

- א. מומלץ לפתוח את הנושא בתיאור עובדות ניסוייות הקשורות בהבדלים שבין מסת גרעין לבין מסות מרכיביו.
- ב. על התלמידים להבין את משמעות הנוסחה $\Delta E = \Delta mc^2$.

ג. יש לחשב את הקשר בין יחידת המסה האטומית (u) לבין יחידת האנרגיה MeV
($931.49 \text{ MeV} = 1u$).

ד. יש להסביר את הגרף של אנרגיית הקשר הממוצעת לנוקליאון כפונקציה של מספר הנוקליאונים בגרעין.

ה. על התלמידים לדעת לחשב את האנרגיה המשתחררת בתהליך של ביקוע גרעיני ובתהליך של מיזוג גרעיני.

ו. מומלץ לשלב דיון על היתרונות והסכנות בשימוש באנרגיה גרעינית.

פעילויות

התלמידים ישתמשו בטבלת איזוטופים (המוקלדת בגיליון אלקטרוני), הכוללת פירוט של האיזוטופים השונים הקיימים בטבע, מספר הפרוטונים בגרעין, מספר הנוקליאונים בגרעין וערכי המסות של האטומים. התלמידים יתבקשו לחשב את אנרגיית הקשר הגרעינית הממוצעת לנוקליאון, ולאחר מכן לבנות (בגיליון האלקטרוני) גרף של אנרגיית הקשר הממוצעת לנוקליאון כפונקציה של מספר הנוקליאונים בגרעין.

7.5 חלקיקים יסודיים (3 שעות)

הערה: לא ניתן לקיים הוראה משמעותית של החלקיקים היסודיים במסגרת הזמן המוקצב לתכנית. לכן נמליץ על הכנת מצגת שתתבסס על הנקודות הבאות. בבחינה לא תוצגנה שאלות בנושא זה.

א. מומלץ להתחיל את הדיון בסיכום ארבעת הכוחות היסודיים הידועים כיום ולהסביר כי האינטראקציה מתבצעת על-ידי חלקיקים הנושאים את הכוחות כמו הפוטונים (במקרה של הכוח האלקטרומגנטי), הגלואונים (הכוח הגרעיני החזק), הגרביטון (כוח המשיכה) וחלקיקי W^\pm ו- Z^0 (הכוח החלש).

ב. כדאי לציין כי כיום ידועים עשרות חלקיקים יסודיים המאופיינים (נוסף למסה, למטען וליציבות) במושגים (הנלמדים במסגרת הפיזיקה הגרעינית), כמו ספין, מספר בריוני או לפטוני, מוזרות, זוגיות, איזוספין I ו- I_3 . חשוב להדגיש שכל החלקיקים מצייתים בכל אינטראקציה לחוקי השימור הקלאסיים: אנרגיה-מסה, מטען, תנע קווי ותנע זוויתי; ואף יותר מכך - גם לחוקי שימור המספרים הבריוניים והלפטוניים. ניתן להוסיף שיש חוקי שימור

(שנתגלו בשנות ה-50 : מוזרות, איזוספין I ו-I₃) שנשמרים באינטראקציות החזקות, אך אינם נשמרים באינטראקציות החלשות.

ג. על התלמידים לדעת כי אלקטרונים ופוטונים נחשבים לחלקיקים יסודיים ואילו פרוטונים ונויטרונים אינם יסודיים והם בנויים מקווארקים. ניתן לציין כי הקווארקים אינם יכולים להשתחרר מהנוקלאונים כי הם נמצאים ב"בור פוטנציאל אין-סופי". (האנרגיה האדירה הדרושה לשחרורם היא בסדר גודל של מליארדי אלקטרון-וולט [GeV], וסביר להניח שחלקה יהפוך למסה, כך שנקבל תוצרי פירוק אחרים, או שתוצרי הפירוק לא יעידו על האינטראקציה והקווארק בנאמנות).

ד. יש לעמוד על קיומם של אנטי-חלקיקים ועל ההבדל בין חלקיק לאנטי-חלקיק שלו (אלקטרון-פוזיטרון, פרוטון-אנטי-פרוטון).

ה. יש להסביר מהו תהליך יצירת זוגות ומהו תהליך האניהילציה. כדאי לציין כי רוב העדויות על קיומם של הקווארקים מתקבלות בתהליכים המתבצעים במאיצים באנרגיות גבוהות (GeV) באופן מבוקר.

ו. בסיום הלימוד, כדאי שהתלמידים יכירו את הטבלה הבאה :

חלקיקים המושפעים על-ידי הכוח החזק - הדרונים	חלקיקים שאינם מושפעים על-ידי הכוח החזק	
בריונים (כגון : פרוטון, נויטרון וחלקיקים כבדים יותר)	לפטונים (אלקטרון, מואון, נויטרינו)	פרמיונים (ספין חצי-שלם)
מזונים (כגון : פאונים, קאונים)	החלקיקים המעבירים את האינטראקציות (פוטון, גרביטון, W^\pm ו- Z^0)	בוזונים (ספין שלם)

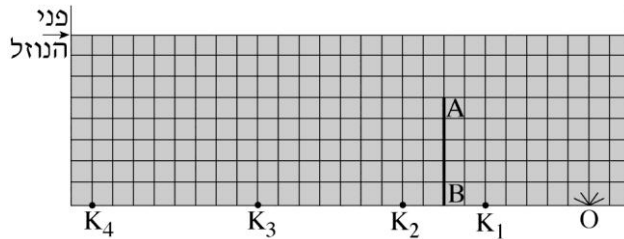
בקשר לטבלה מומלץ להבהיר :

1. שהספין של חלקיק אינו תלוי בתנועת החלקיק. ערכי הספין של חלקיקים הם כפולות שלמות של מחצית היחידה \hbar .
2. מה הוא עיקרון פאולי וכיצד ניתן להסביר באמצעותו מדוע האלקטרונים באטום אינם מאכלסים כולם את הרמה הנמוכה ביותר, אלא מסתדרים ב'קליפות'.

3. שהפרמיונים מאופיינים על-ידי ספין חצי-שלם ($\frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \dots$) ומהווים את מרכיבי החומר. הם מצייתים לחוקי שימור נוספים, כך שלא נוצרים או נעלמים פרמיונים בלי שייווצרו או ייעלמו פרמיונים אחרים. הפרמיונים 'מצייתים' לעקרון האיסור של פאולי.
4. שהבוזונים, המעבירים את הכוחות הבסיסיים בטבע, אינם מצייתים לעקרון פאולי, והם בעלי ספין שלם ($0, \hbar, 2\hbar, \dots$). עבור חלקיקים אלו, המשמעות של אי-ציות לחוק האיסור של פאולי היא שלא חל עליהם מושג ה"צפיפות" והם יכולים לחלוף אחד דרך השני, למשל.
5. ההדרונים בנויים מקווארקים, כאשר כל בריון בנוי משלושה קווארקים וכל מזון משני קווארקים: קווארק ואנטי-קווארק.
6. החלוקה בטבלה מתייחסת לאפיונים מסוימים של החלקיקים ואינה סותרת את העובדה שחלקיקים (כמו הדרונים) יכולים להתפרק לחלקיקים אחרים (לפטונים, למשל) ובלבד שלא יופרו חוקי שימור מסוימים.

קרינה וחומר – בעיות ותרגילים לדוגמה

1. תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים בתרשים שלפניך מתואר מִקָּל שדופנותיו שקופים, ובו נוזל שמקדם השבירה שלו (ביחס לאוויר) הוא $n = 2.236$. על קרקעית המכל נמצאים מקור אור נקודתי O, הפולט אור לכל הכיוונים, ומחיצה אטומה לאור AB, וכן מסומנות ארבע נקודות K1, K2, K3, ו-K4.

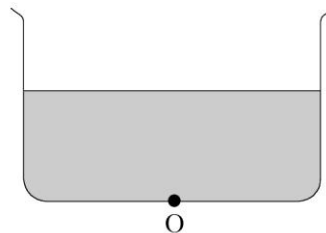


- א. הראה כי $\tan \theta_c \approx 0.5$ כאשר θ_c היא הזווית הקריטית (הזווית הגבולית) במעבר של אור מהנוזל לאוויר.
- ב. העתק במדויק את התרשים למחברתך. (כל משבצת במחברת תייצג משבצת בתרשים.) היעזר בסעיף א' וסמן באות P_0 נקודה על פני הנוזל, שבה קרן אור היוצאת מ-O פוגעת בזווית הקריטית.
- ג. (1) קבע אם קיימת קרן אור שיוצאת מ-O, פוגעת בפני הנוזל ומוחזרת ישירות באופן מלא (ולא חלקי) לנקודה K_1 . סרטט והסבר.
- (2) ענה על תת-סעיף ג' (1) לגבי כל אחת מהנקודות K_2, K_3 , ו-K4.

2. במרכזה של קרקעית כוס נמצא מקור אור נקודתי O. בכוס יש נוזל שקוף (ראה תרשים א'). קרקעית הכוס צבועה בצבע לבן, המפזר לכל הכיוונים את האור הפוגע בו. כאשר מתבוננים מלמעלה, רואים על קרקעית הכוס עיגול כהה סביב מקור האור ומִשָּׁטח בהיר סביב העיגול הכהה (ראה תרשים ב').



תרשים ב



תרשים א

א. העתק את תרשים אי למחברתך, וסרטט באותו תרשים את מהלכן של שלוש קרני אור היוצאות ממקור האור O:

(1) קרן הפוגעת בפני הנוזל בזווית פגיעה של 0° .

(2) קרן הפוגעת בפני הנוזל בזווית כלשהי ויוצאת לאוויר.

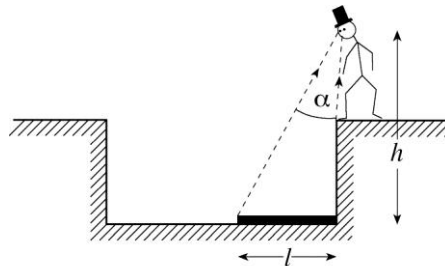
(3) קרן הפוגעת בפני הנוזל ומוחזרת החזרה גמורה.

ב. הסבר מדוע רואים על קרקעית הכוס, סביב מקור האור, אזור כהה ואזור בהיר.

ג. מוסיפים לכוס עוד מאותו נוזל. (גובה פני הנוזל בכוס עולה). האם קוטרו של העיגול הכהה יגדל, יקטן או לא ישתנה? הסבר.

ד. נתון כי גובה פני הנוזל הוא 1cm ורדיוס העיגול הכהה הוא 1.5cm. חשב את מקדם השבירה של הנוזל.

3. על שפת ברכה ריקה ניצב אדם שגובה עיניו מעל קרקעית הברכה הוא $h=3.90\text{m}$. על קרקעית הברכה ממש מתחתיו, הוא רואה סרגל באורך $l=60\text{cm}$ בזווית ראייה a (ראה תרשים).



ממלאים את הברכה במים עד גובה y מעל הקרקעית, כשהסרגל נשאר במקומו.

א. (1) העתק את התרשים למחברתך, הוסף בו את פני המים וסרטט קרן אור היוצאת מקצהו הרחוק (השמאלי) של הסרגל ומגיעה לעינו של האדם.

(2) האם הסרגל נראה לאדם קטן יותר ממה שהוא נראה לו כאשר הברכה הייתה ריקה, גדול יותר או שהוא נראה ללא שינוי? הסבר על סמך סעיף (1).

(הסעיפים הבאים לא יידרשו בבחינה)

ב. האדם רואה את הסרגל בזווית ראייה של 9.5° (כאשר בברכה יש מים בגובה y).

(1) מצא את זווית הפגיעה בפני המים של הקרן שמתוארת בסעיף אי (1) ואת זווית השבירה שלה.

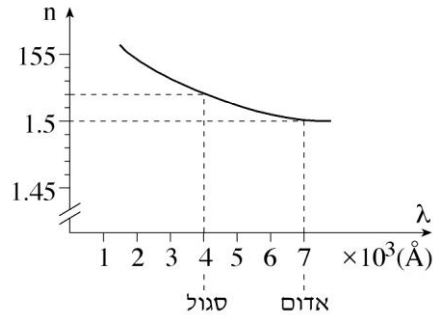
נתון כי מקדם השבירה של המים הוא 1.33.

(2) חשב את הגובה y של המים בברכה.

ג. מוסיפים לברכה מים עד גובה 2m מעל הקרקעית. במצב זה חשב כמה זמן נע האור היוצא מקצהו הקרוב (הימיני) של הסרגל עד שהוא מגיע אל עינו של האדם.

4.

א. מקדם-שבירה n בזכוכית משתנה עם אורך-הגל λ של האור, כפי שמתאר הגרף שלפניך. תאר תופעה פיזיקלית שאפשר להסביר אותה על-ידי עובדה זו.



ב. (1) האם יש הבדל בין מהירות האור האדום בריק לבין מהירות האור הסגול בריק?

(2) האם יש הבדל בין מהירות האור האדום בזכוכית לבין מהירות האור הסגול בזכוכית? הסבר.

(הסעיפים הבאים לא יידרשו בבחינה)

ג. נתונה עדשה מרכזת שעשויה זכוכית. מקרינים על העדשה אלומה מקבילה של אור אדום באורך-

גל של 7000 \AA . האור מתמקד על מסך הנמצא במרחק f_1 מהעדשה. מחליפים את מקור-האור

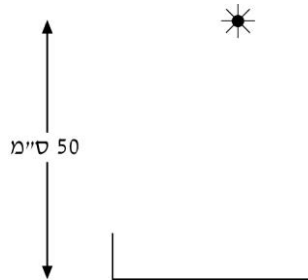
האדום במקור-אור סגול שאורך-הגל שלו הוא 4000 \AA . האור מתמקד עכשיו במרחק f_2 מהעדשה.

(1) האם יש לקרב או להרחיק את המסך, כדי לקבל עליו נקודה של אור סגול?

(2) מצא את היחס $\frac{f_1}{f_2}$.

5. מקור-אור נקודתי ניצב בגובה 50 ס"מ מעל קרקעית כלי ריק (ראה תרשים). תלמיד רוצה ליצור

דמות חדה של המקור על קרקעית הכלי בעזרת עדשה מרכזת.



א. (1) באלו גבהים מעל קרקעית הכלי יכול התלמיד להציב עדשה מרכזת שרוחק המוקד שלה הוא 8 ס"מ?

(2) על סמך העובדה שמהלך קרני האור הוא הפיך, הסבר מדוע מתקבלים שני גבהים בסעיף (1).

(3) התלמיד החליף את העדשה המרכזת בעדשה מרכזת אחרת ומצא כי יש רק גובה אחד שבו נוצרת דמות חדה של המקור על קרקעית הכלי. חשב את רוחק המוקד של העדשה השנייה.

ב. עדשה מרכזת ממוקמת כך שמתקבלת דמות חדה על קרקעית הכלי הריק. ממלאים את הכלי במים.

(1) הסבר מדוע לא מתקבלת דמות חדה של המקור על קרקעית הכלי המלא מים.

(2) אם אין משנים את מקום המקור ואת מקום העדשה, האם יש להגביה את הכלי או להנמיכו כדי לקבל שוב על הקרקעית דמות חדה של המקור? הסבר.

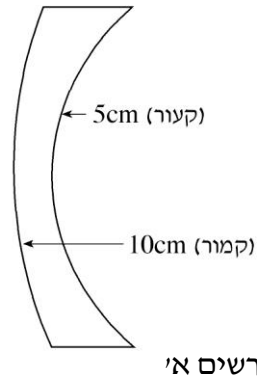
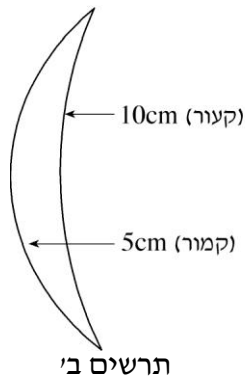
6. מציבים עצם לפני עדשת משקפיים במרחק 30cm ממנה. על מסך מתקבלת דמות הפוכה של העצם המוגדלת פי 2.

א. האם העדשה מרכזת או מפזרת? נמק.

ב. חשב את מרחק המוקד של העדשה.

ג. לעדשת משקפיים זו משטח אחד קמור ומשטח אחד קעור. למשטח אחד רדיוס עקמומיות של 5cm, ולמשטח האחר רדיוס עקמומיות של 10cm.

(1) איזה משני התרשימים, א' או ב', מתאים לעדשת משקפיים זו? הסבר.



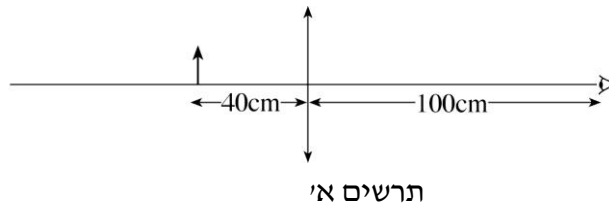
(הסעיפים הבאים לא יידרשו בבחינה)

(2) חשב את מקדם השבירה של החומר שממנו עשויה העדשה.

(3) חשב את עצמת העדשה בדיופטרים.

ד. עדשה זו היא של משקפיים השייכים לאדם רחוק-רואי. הסבר כיצד עדשה זו מתקנת את ליקוי הראייה של אדם זה.

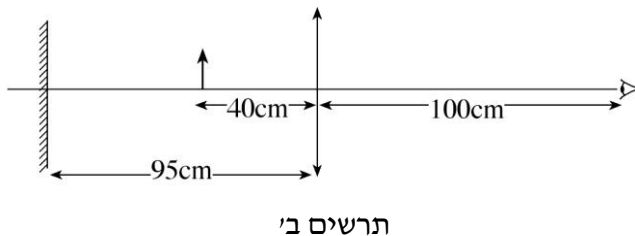
7. על הציר האופטי של עדשה מרכזת, שרוחק המוקד שלה 50cm, ניצב נר דולק במרחק 40cm משמאל לעדשה. גובה הנר 10cm. עינו של אדם נמצאת על ציר העדשה במרחק 100cm מימין לעדשה (ראה תרשים א').



א. מצא את המרחק מהעדשה של דמות הנר הנוצרת באמצעות העדשה.

ב. חשב את גובה הדמות.

(הסעיפים הבאים לא יידרשו בבחינה)



במרחק 95cm משמאל לעדשה מציבים מראה מישורית (ראה תרשים ב').

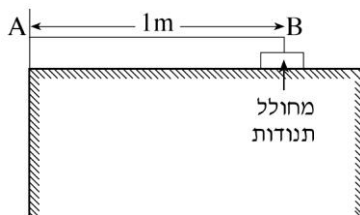
ג. מצא את המרחק מהעדשה של דמות הנר הנוצרת כתוצאה מפגיעה בעדשה של הקרניים שמוחזרות מהמראה.

ד. חשב את גובה הדמות שבסעיף ג'.

ה. איזו משתי הדמויות (סעיף א' וסעיף ג') נראית לָאדם גדולה יותר? נמק.

גלים מכניים ואלקטרומגנטיים

8. חוט AB שאורכו 1m, קשור בקצהו B למחולל תנודות, ובקצהו A - למוט קבוע (ראה תרשים).



התנודות, נוצר בחוט AB גל

כאשר תלמיד מפעיל את מחולל

שמוחזר מהקצה A.

התלמיד מגדיל ברציפות את תדירות מחולל התנודות ורושם את התדירויות בכל פעם שנוצר בחוט

AB גל עומד. תוצאות הניסוי רשומות בטבלה שלפניך:

$\frac{1}{\lambda} (m^{-1})$	$\lambda (m)$	צורת הגל העומד	f - תדירות התנודת (Hz)
			24
			45
			67
			88

א. העתק את הטבלה למחברתך ורשום בעמודה המתאימה את אורך-הגל λ לכל אחד מארבעת הגלים העומדים שנוצרו בחוט.

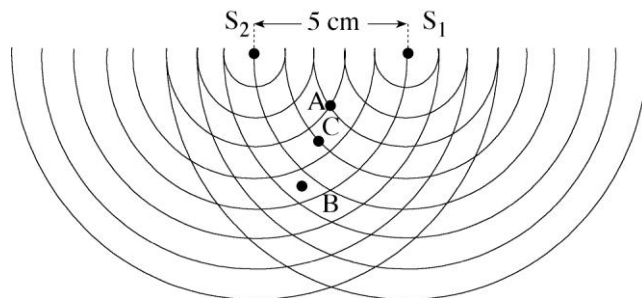
ב. רשום בעמודה המתאימה בטבלה את הערך $\frac{1}{\lambda}$ לכל אחד מארבעת הגלים, וסרטט גרף של

$$\frac{1}{\lambda} \text{ כפונקציה של } f.$$

ג. מצא בעזרת הגרף את מהירות התפשטותו של הגל בחוט AB.

ד. התלמיד ממשיך להגדיל את תדירות מחולל התנודות. מהי התדירות הראשונה (הגבוהה מ-88Hz) שייווצר בה גל עומד בחוט AB? נמק.

9. שני כדורים מתנודדים, כל אחד בתדירות 25Hz. הכדורים טובלים באמבט גלים ומשמיים שני מקורות נקודתיים S_1 ו- S_2 לגלים מעגליים. המרחק בין המקורות הוא 5cm. התרשים שלפניך מתאר ברגע $t = 0$ את חזיתות הגלים המתאימות לנקודות שנמצאות בשיא הגובה מעל פני המים (כפי שהיו במנוחה). ברגע זה, כל אחד מהכדורים נמצא בנקודת שיא הגובה מעל פני המים.



א. על פי התרשים, הסבר מדוע אורך-הגל שיוצר כל מקור הוא 1cm.

ב. לגבי כל אחת מהנקודות שבתת-סעיפים (1) - (5) שלהלן, ציין ונמק אם נוצרת בה התאבכות בונה, התאבכות הורסת או שהיא נקודת ביניים.

(1) הנקודה A המסומנת בתרשים.

(2) הנקודה B המסומנת בתרשים.

(3) הנקודה C המסומנת בתרשים.

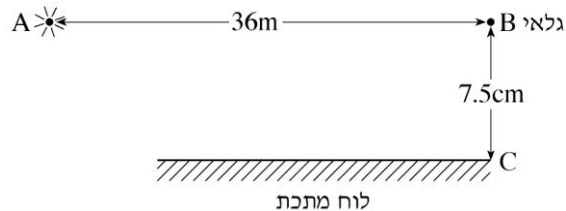
(4) נקודה E הנמצאת במרחק 38cm מהמקור S_1 ובמרחק 39.5cm מהמקור S_2 .

(5) נקודה F הנמצאת במרחק 25cm מהמקור S_1 ובמרחק 28.2cm מהמקור S_2 .

ג. (1) חשב את זמן המחזור T של הגל הנוצר על-ידי אחד המקורות.

(2) משרעת הגל (אמפליטודה) שיוצר כל מקור בנקודה A היא 0.4cm . סרטט גרף של העתק הנקודה A כפונקציה של הזמן מרגע $t = 0$ עד רגע $t = T$ (זמן של מחזור אחד). רשום מספרים על הצירים. נקודת האפס למדידת העתק הגל תהיה פני המים במצב שבו אין גלים באמבט.

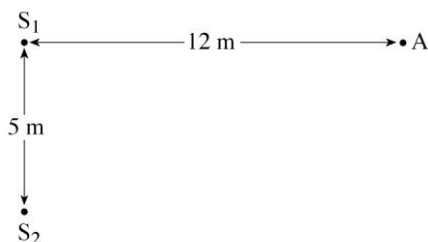
10. מקור גלים נקודתי A פולט גלי מיקרו, שאורך-הגל שלהם הוא $\lambda = 3\text{cm}$. במרחק 36cm מהמקור נמצא גלאי B. לוח מתכת המקביל ל-AB משמש מראה לגלי המיקרו. קצה C של לוח זה נמצא במרחק 7.5cm מהגלאי, כמתואר בתרשים שלפניך.



- א. מה צריך להיות האורך המינימלי של לוח המתכת כדי שגלי המיקרו, היוצאים מ-A ופוגעים בלוח, יגיעו לגלאי B? הסבר.
- ב. גל מיקרו שנפלט מהמקור A, פוגע בלוח המתכת ומוחזר ממנו עם מופע הפוך לגל הפוגע. הראה כי בגלאי מתקבלת עצמת קרינה מינימלית.

(הסעיף הבא לא יידרש בבחינה)

- ג. משנים בהדרגה את אורך-הגל המופק ממקור הקרינה A. מצא שני אורכי גל, אורך-גל אחד קטן מ- 3cm ואורך-גל שני גדול מ- 3cm , שעבורם תתקבל בגלאי B עצמת קרינה מקסימלית.



11. שני מקורות קול נקודתיים S_1 ו- S_2 יוצרים בתוך מים גלי קול באותו אורך-גל, באותה עצמה ובאותו מופע. שני המקורות מסוגלים ליצור גלים בתחום התדירויות מ- 2500Hz ועד 5000Hz . מהירות הקול במים היא 1500m/s . נקודה A נמצאת במרחק 12m מ- S_1 . מאונך ל- S_1S_2 המרחק בין שני המקורות הוא 5m . (ראה תרשים).

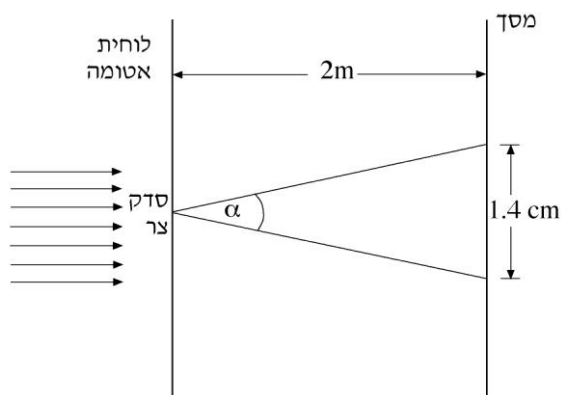
א. בתחום התדירויות של המקורות, מצא שתי תדירויות, שעבור כל אחת מהן נקבל בנקודה A עוצמת קול מקסימלית.

ב. האם קיימת תדירות כזאת בתחום התדירויות של שני המקורות, כך שעוצמת הקול בנקודה A תהיה מינימלית? אם כן - חשב את התדירות. אם לא - הסבר.

(הסעיף הבא לא יידרש בבחינה)

ג. עתה יוצרים בין שני המקורות הפרש מופע. מהו הפרש הזמן המינימלי שבו חייב המקור S_1 לפגור ביחס למקור S_2 כדי שעוצמת הקול לאורך האנך האמצעי לקטע S_2S_1 תהיה אפס, אם תדירות השידור היא 4000Hz ?

12. אלומה מקבילה של אור חד-צבעי, שאורך-הגל שלו $\lambda = 7000 \text{ \AA}$, עוברת דרך סדק צר בלוחית אטומה, ופוגעת במסך הנמצא במרחק 2m מהלוחית. על המסך נוצרת תבנית עקיפה, שהמקסימום המרכזי בה הוא ברוחב 1.4cm (ראה תרשים), ועוצמת פסי האור הצדדיים שלה ניתנת להזנחה.



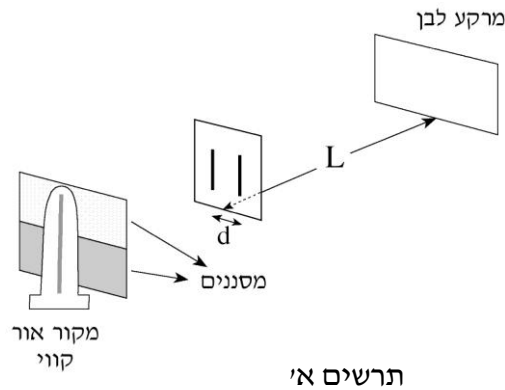
א. מהו רוחב הסדק?

ב. פותחים בלוחית האטומה סדק שני, זהה לראשון, במרחק 2mm ממנו. מתברר כי במקסימום הראשי הקודם נוצרים פסים בהירים ושחורים. מהו רוחבו של פס בהיר?

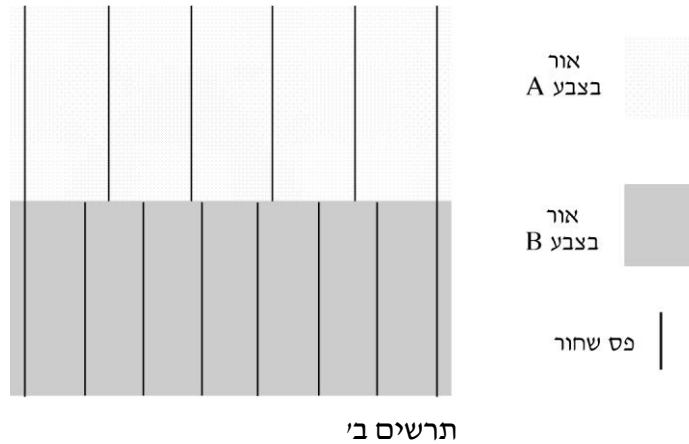
(הסעיף הבא לא יידרש בבחינה)

ג. מקרבים בהדרגה את המסך ללוחית. כאשר המסך מגיע למרחק מסוים, נעלמת תמונת ההתאבכות שהתקבלה בסעיף ב'. הסבר מדוע, בליווי סרטוט.

13. מקור-אור לבן וקווי מכוסה חציו במסנן (פילטר) כחול, וחציו במסנן אדום. האור היוצא משני המסננים עובר דרך שני סדקים צרים מאוד, הנמצאים במרחק d זה מזה, ופוגע במרקע לבן הנמצא במרחק $L = 1.2\text{m}$ מהסדקים (ראה תרשים א').

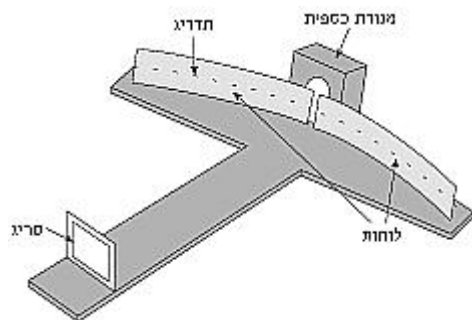


על המרקע מתקבלת תבנית התאבכות בשני צבעים A ו-B, כמתואר בתרשים ב'.



א. ידוע כי $\lambda_{\text{כחול}} > \lambda_{\text{אדום}}$. האם צבע A הוא אדום או כחול? נמק.

- ב. נתון כי אורך-הגל של האור האדום גדול ב- 1840 \AA מאורך-הגל של האור הכחול. חשב את אורכי הגל של שני הצבעים.
- ג. נתון כי רוחב כל פס אור המתקבל בתבנית ההתאבכות של האור הכחול הוא 0.8 cm . חשב את המרחק בין הסדקים.
- ד. כל מערכת הניסוי מוכנסת למים. כיצד ישפיע הדבר על רוחב פסי האור בתבנית ההתאבכות המתוארת בתרשים ב? הסבר.



14. התרשים שלפניך מתאר ספקטרומטר הכולל שני לוחות שצורתם (במבט מלמעלה) קשת של מעגל וביניהם מרווח צר, וכן סריג עקיפה שהקבוע שלו 5300 חריצים לסי"מ, והוא מקביל למרווח. החריצים בסריג הם אנכיים, וכל חלקי הספקטרומטר צבועים בשחור. תלמיד הפעיל מנורת כספית וראה (ישירות ולא דרך הספקטרומטר) שצבעה סגול. התלמיד הציב את

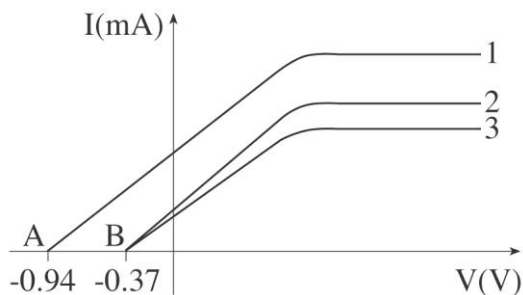
מנורת הכספית מאחורי המרווח שבין לוחות הספקטרומטר (ראה תרשים), והתבונן דרך הסריג בקווי הספקטרום על רקע תדריג (סקלה) המסומן על הלוחות. הוא מצא שבסדר ראשון מופיעים ארבעה קווים ספקטראליים, ושזוויות הסטייה של קווים אלה מהקו המחבר את אמצע הסריג עם אמצע המרווח הן: 17.9° , 16.9° , 13.2° , 12.3° .

- א. חשב את אורכי הגל של ארבעת הקווים הספקטראליים.
- ב. מהו צבע האור בסדר אפס (הפס המרכזי) שראה התלמיד דרך הסריג? הסבר.
- ג. מדוע כל חלקי הספקטרומטר נצבעו בשחור?
- ד. כאשר התלמיד הרחיק את לוחות הספקטרומטר כך שהמרווח גדל, נראו הקווים הספקטראליים **רחבים יותר**. הסבר את התופעה.
- ה. התלמיד החליף את מנורת הכספית במנורת להט (הפולטת אור לבן) והתבונן דרך הסריג בספקטרום שנוצר.

- (1) איזה שינוי חל בסדר אפס? הסבר.
- (2) האם חל שינוי בסדר ראשון? הסבר.

מבוא לתורת הקוונטים - המודל הדואלי של האור

15. התרשים שלפניך מתאר תוצאות שלושה ניסויים שבוצעו עם תא פוטואלקטרי מסוים ושני מקורות אור בעלי עוצמת אור קבועה, שאינה משתנה במהלך הניסוי. מקור אחד פולט אור באורך-גל 4358 \AA , והאחר - באורך-גל 5461 \AA .



א. העתק למחברתך את הטבלה שלפניך ורשום לכל עקומה את אורך-הגל המתאים לה. הסבר את קביעתך.

מספר עקומה	אורך-הגל
1	
2	
3	

ב. חשב בעזרת אחת העקומות את אנרגיית הקשר (פונקציית העבודה) של הפולט בתא הפוטואלקטרי.

ג. עבור זוג העקומות המתאימות לניסויים עם אותו אורך-גל, קבע באיזו מהן היה המרחק בין המקור לתא גדול יותר. הסבר.

ד. מחליפים את התא בתא אחר עם פולט שאנרגיית הקשר שלו קטנה יותר, וחוזרים על הניסויים.

(1) האם נקודת החיתוך של כל עקומה עם הציר האופקי V תזוז ימינה, שמאלה או תישאר במקומה? הסבר.

(2) האם ישתנה אורך הקטע AB - המרחק שבין נקודות החיתוך של העקומות עם הציר האופקי V ? הסבר.

16.

א. (1) לקרינת X הנפלטת משפופרת יש אורך-גל מינימלי. הסבר מדוע תופעה זו מעידה על האופי החלקיקי של קרינת X.

(2) ציין תופעה אחת שבה מתבטא האופי הגלי של קרינת X.

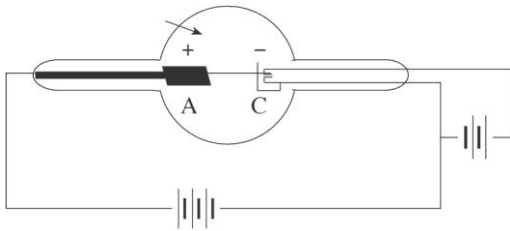
ב. נתון מקור קרינת X, הפולט אלומת פוטונים בעלי אנרגיה של 30 keV ($3 \cdot 10^4 \text{ eV}$). חשב את אורך-הגל של הקרינה.

ג. הספק האלומה של קרינת ה-X שבסעיף ב' הוא $5 \cdot 10^{-3} \text{ W}$. חשב את מספר הפוטונים הנפלטים מן המקור בכל שנייה.

אלומת אלקטרונים פוגעת בעלה גבישי ויוצרת תבנית התאבכות.

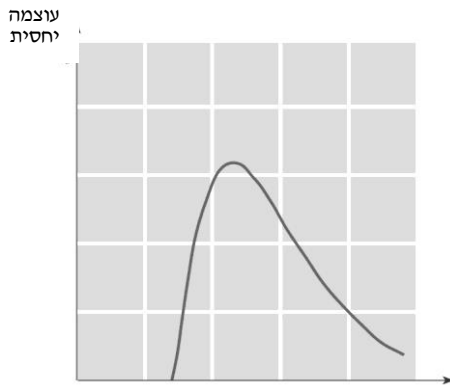
ד. ציין תכונה אחת של האלקטרונים המאפשרת תבנית התאבכות, וציין תכונה אחת של הגביש המאפשרת תבנית כזו.

ה. חשב את האנרגיה הקינטית של האלקטרונים באלומה, אם ידוע שאורך-הגל שלהם שווה לאורך-הגל של קרינת ה-X שחישבת בסעיף ב'.



תרשים א

17. בתרשים א' מתוארת שפופרת ליצירת קרני X. מאיצים אלקטרונים בשפופרת, במתח של $40,000 \text{ V}$. העקום בתרשים ב' מתאר את העצמה היחסית של הקרינה הנפלטת כפונקציה של אורך-הגל.



א. (1) מדוע יש צורך לרוקן את השפופרת מאוויר?

(2) מאיזה חלק בשפופרת נפלטת הקרינה?

(3) מדוע יש צורך לקרר את המטרה (אנטיקתודה)?

ב. (1) מה הגורם להיווצרות קרינה בשפופרת זו?

(2) מדוע הקרינה נפלטת ברצף של אורכי גל?

ג. (1) מדוע קיים אורך-גל קצר ביותר בקרינה הנפלטת

(2) חשב את אורך-הגל הקצר ביותר המתקבל.

ד. העתק למחברתך את תרשים ב' והוסף בו סרטוט λ רב של תרשים ב, בל, כאשר המתח בשפופרת הוא $30,000 \text{ V}$. הדגש בשרטוט את ההבדלים בין שני העקומים.

מבנה האטום

18.

א. אחת ההנחות שעליהן מבוסס המודל של בוהר לאטום המימן היא הקשר:

$$I. \quad m_e v r = n \frac{h}{2\pi}$$

הראה כי קשר I שקול להנחה שהיקף המסלול המעגלי של האלקטרון הוא כפולה שלמה של אורך-גל דה-ברויי של האלקטרון.

ב. (1) הראה, בעזרת המודל של בוהר, כי הרדיוסים של המסלולים המעגליים של האלקטרון, הנע

$$II. \quad r = \frac{h^2}{4\pi^2 m_e k e^2} n^2 \quad : \text{ סביב גרעין אטום המימן, מקיימים את הקשר:}$$

(אינך רשאי להשתמש בביטויים הרשומים בדף הנוסחאות עבור הרדיוסים של מסלולי האלקטרון באטום מימן.)

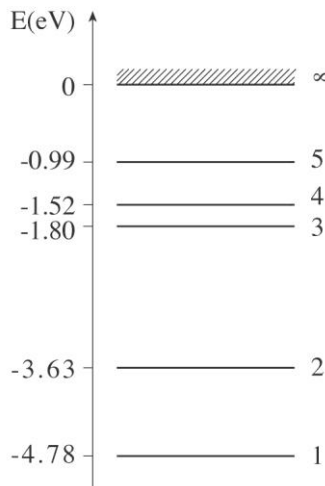
(2) הראה שמקשר II נובע שרדיוסי המעגלים הם בדידים.

ג. מתברר כי אפשר ליישם את ההנחה של בוהר, המבוססת בקשר I, גם על אלקטרון הנע במסלול מעגלי בשדה מגנטי אחיד.

(1) הראה, בעזרת קשר I, כי הרדיוסים של המסלולים המעגליים של האלקטרון הנע בשדה

$$III. \quad r = \sqrt{\frac{h}{2\pi e B}} n \quad : \text{ מגנטי אחיד B, מקיימים את הקשר:}$$

(2) הראה שמקשר III נובע שרדיוסי המעגלים הם בדידים.



19. בספקטרום של אור השמש מופיעים קווים שחורים. קווים אלה

נוצרים כתוצאה מכך שאור באורכי גל מסוימים, הנפלט מתוך השמש, נבלע על-ידי גזים הנמצאים באטמוספירה של השמש.

אחד הקווים השחורים בספקטרום השמש מתאים לבליעת אור

באורך-גל של 5880 \AA .

א. חשב את האנרגיה של פוטון בעל אורך-גל זה (5880 \AA).

ב. התרשים שלפניך מתאר רמות אנרגיה אחדות של אטום הליום. בגלל הטמפרטורה הגבוהה של אטמוספירת השמש, אטומי הליום עשויים להימצא ברמות מעוררות.

ג. הראה כי ניתן להסביר את היווצרותו של הקו השחור (בליעה באורך-גל של 5880 \AA) בעזרת רמות האנרגיה של אטום הליום.

ד. תחום אורכי הגל של אור נראה הוא $4000 \text{ \AA} - 7000 \text{ \AA}$.

האם אור נראה, הנפלט מתוך השמש, יכול לגרום ליינון של אטום הליום הנמצא ברמה $n=2$? הסבר.

ד. אלקטרון נע מתנגש באטום הליום נח שנמצא ברמה $n = 2$.

איזה תנאי האלקטרון צריך למלא כדי שאטום הליום יעבור לרמה גבוהה יותר?

20. בין קווי ספקטרום הפליטה של היסוד ליתיום נמצאו שלושה קווים בעלי אורכי הגל הבאים:

$$\lambda_3 = 2741 \text{ \AA} \quad \lambda_2 = 3233 \text{ \AA} \quad \lambda_1 = 6708 \text{ \AA}$$

א. (1) עבור כל אחד מן הקווים, חשב את האנרגיה, ב-eV, של הפוטון המתאים לו.

(2) כל אחד משלושת הקווים שנמצאו מתקבל ממעבר מרמה מעוררת אל רמת היסוד. על סמך

קווים אלה, סרטט דיאגרמה של רמות האנרגיה של האטום. ליד כל רמה ציין את האנרגיה

שלה ב-eV. סמן בדיאגרמה את הקצים המייצגים את המעברים המוזכרים. בחר את רמת

היסוד כ- $E = 0$.

ב. מצא את אורכי הגל של קווים נוספים, שעשויים להימצא בספקטרום ושמקבלים ממעברים בין

הרמות שסרטטת בסעיף א' (2). (הנח שכל המעברים האלה

מותרים.) (eV)

12.75 _____ $n = 4$

12.1 _____ $n = 3$

10.2 _____ $n = 2$

0 _____ $n = 1$

ג. אנרגיית היינון של אטום ליתיום היא 5.39 eV . חשב את אורך-הגל

המקסימלי של פוטונים שיכולים לגרום ליינון אטום ליתיום.

ד. כלי מכיל גז של אטומי מימן הנמצאים ברמת היסוד. ארבע רמות

האנרגיה הראשונות של אטום המימן מתוארות בתרשים.

(1) אלומת אלקטרונים בעלי אנרגיה קינטית של 11 eV עוברת דרך הגז.

מהו ערך (או מהם ערכי) האנרגיה של האלקטרונים היוצאים מן המקל?

(2) אלומת פוטונים בעלי אנרגיה של 11 eV עוברת דרך הגז.

מהו ערך (או מהם ערכי) האנרגיה של הפוטונים היוצאים מן המקל?

21. רמות האנרגיה של יון הליום, שבו נע אלקטרון יחיד סביב הגרעין, נתונות על-ידי ביטוי דומה

$$E_n = -\frac{4R^*}{n^2} \text{ , כאשר } R^* = 13.6 \text{ eV} .$$

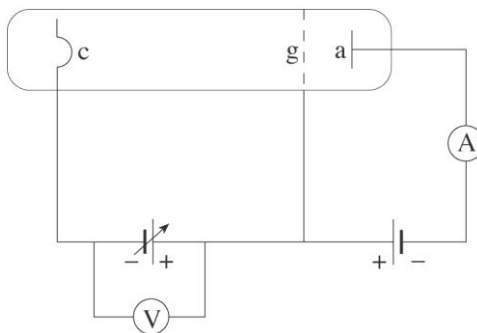
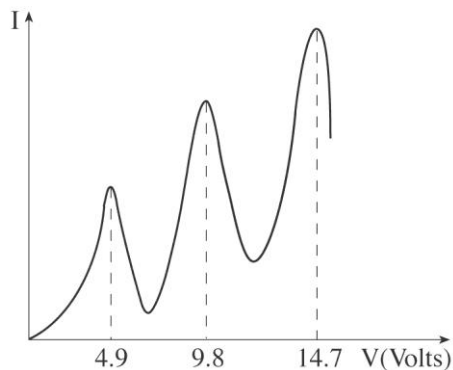
א. (1) מצא את האנרגיה המינימלית הדרושה לשם יינון של יון ההליום הנמצא במצב היסוד.

(2) מצא את אורך-הגל המרבי של הקרינה הדרושה ליינון זה.

ב. אלומה של קרינה אלקטרומגנטית, בעלת טווח רציף של אורכי גל שבין 240 \AA ל- 500 \AA , עוברת דרך מקל שבו נמצאים יוני הליום שכולם במצב היסוד. חשב באילו אורכי גל נבלעת הקרינה האלקטרומגנטית. הזנח אפשרות בליעה של יון מעורר.

ג. כמה קווים ספקטרליים יימצאו בספקטרום הפליטה של יוני ההליום, שעוררו על-ידי הקרינה שתוארה בסעיף ב'? הסבר.

22. תרשים א' מתאר מערכת לביצוע ניסוי פרנק-הרץ. בשופרת המכילה אדי כספית בלחץ נמוך, נמצאים: קתודה מחוממת c, סריג g ואנודה a. בתרשים ב' מתואר הזרם, הנמדד באמצעות האמפרמטר, כפונקציה של המתח הנמדד באמצעות הוולטמטר.



תרשים א'

תרשים ב'

א. מהן הסיבות לעליות ולירידות בעצמת הזרם עם עליית המתח?

ב. מה ניתן להסיק מתוצאות ניסוי זה על מבנה אטום הכספית? הסבר.

ג. במצב שבו הוולטמטר מורה $12V$:

- (1) מהו המספר המרבי של התנגשויות לא-אלסטיות שיכול אלקטרון לבצע? הסבר.
- (2) מהו אורך-הגל (או אורכי הגל) של הקרינה הנפלטת מאטומי הכספית?

מבוא לתורת הקוונטים - דואליות החומר

23. תלמיד ערך ניסוי בשפופרת לעקיפת אלקטרונים העשויה זכוכית מרוקנת מאוויר. השפופרת כוללת קתודה, גביש גרפיט דק המורכב ממיקרו-גבישים רבים, ומסך פלואורסצנטי. מרחקו של המסך הפלואורסצנטי מהגביש הוא 13.5 ס"מ. כאשר התלמיד הפעיל את השפופרת, נפלטו מהקתודה אלקטרונים. הנח כי מהירות האלקטרונים הנפלטים היא בקירוב אפס. אלקטרונים אלו הואצו במתחים שונים V , לעבר הגביש, עברו דרכו ופגעו במסך. על המסך התקבלה תמונת עקיפה של טבעות מוארות שבהן פגעו אלקטרונים ושל טבעות חשוכות שאליהן האלקטרונים לא הגיעו. התלמיד רשם את ערכי המתח המאיץ, V , ואת הרדיוס, r , של טבעת העקיפה מהסדר הראשון. תוצאות המדידות רשומות בטבלה:

5000	4000	3000	2000	1000	V (וולט)
1.1	1.3	1.5	1.9	2.5	R (ס"מ)

א. בלי להסתמך על תוצאות המדידה הוכח כי: $r \propto \frac{1}{\sqrt{V}}$.

ב. סרטט גרף של הרדיוס, r , כפונקציה של $1/\sqrt{V}$.

ג. מצא בעזרת הגרף את המרחק בין אטומי הגרפיט.

ד. הסבר מדוע תבנית העקיפה מורכבת מטבעות (ולא מנקודות).

24. תלמיד ערך ניסוי בשפופרת לעקיפת אלקטרונים העשויה זכוכית מרוקנת מאוויר. השפופרת כוללת קתודה, גביש גרפיט דק המורכב ממיקרו-גבישים רבים, ומסך פלואורסנטי. מרחקו של המסך מהגביש הוא 13.5 ס"מ. כאשר התלמיד הפעיל את השפופרת נפלטו מהקתודה אלקטרונים. הנח כי מהירות האלקטרונים הנפלטים היא בקירוב אפס. אלקטרונים אלו הואצו במתח של $4,000V$, לעבר הגביש, עברו דרכו ופגעו במסך. על המסך התקבלה תמונת עקיפה של טבעות מוארות שבהן

פגעו אלקטרונים, ושל טבעות חשוכות שאליהן האלקטרונים לא הגיעו. רדיוס טבעת מוארת מסדר ראשון הוא 1.3 ס"מ.

א. חשב את אורך-הגל של האלקטרונים לאחר שהואצו במתח של 4,000V.

ב. חשב את המרחק בין אטומי גביש הגרפיט.

ג. האם תתקבל תמונת עקיפה ברורה אם אלומת האלקטרונים תעבור דרך חריץ שרוחבו 0.1 מ"מ? נמק.

ד. מה יהיה רדיוס טבעת מוארת מסדר ראשון, אם במקום האלקטרונים תפגע בגביש

אלומה של קרינת X, שאורך-הגל שלה הוא 0.1 \AA ?

הגרעין ומבוא לחלקיקים יסודיים

25. גרעין נפטוניום, Np , מתפרק התפרקות רדיואקטיבית לגרעין פרוטאקטיניום, Pa . גרעין

פרוטאקטיניום מתפרק התפרקות רדיואקטיבית לגרעין אורניום, ${}_{92}^{233}U$. ידוע גם כי מספר המסה של גרעין פרוטאקטיניום שווה לזה של גרעין אורניום, והמספר האטומי של נפטוניום הוא 93.

א. (1) מהו המספר האטומי של גרעין פרוטאקטיניום, Pa ? הסבר.

(2) מהו מספר המסה של גרעין נפטוניום, Np ? הסבר.

ב. לגרעין נפטוניום, Np , זמן מחצית חיים של $2 \cdot 10^6$ שנים. חשב את הפעילות (מספר ההתפרקויות לשנייה) של מדגם שנמצאים בו $2 \cdot 10^{15}$ גרעינים כאלה.

ג. בהנחה שכל הנפטוניום שהיה על כדור הארץ מקורו בזמן ההיווצרות של כדור הארץ, לפני כ- $2 \cdot 10^9$ שנים, הראה מדוע אי-אפשר למצוא נפטוניום טבעי על פני כדור הארץ.

ד. בהתפרקות רדיואקטיבית, סכום מסות התוצרים קטן ממסת גרעין-האב. הסבר כיצד עובדה זו קשורה לאנרגיה הקינטית של התוצרים.

26. האיזוטופ יוד - 128 הוא רדיואקטיבי, והוא משמש לאבחנה ולטיפול רפואי.

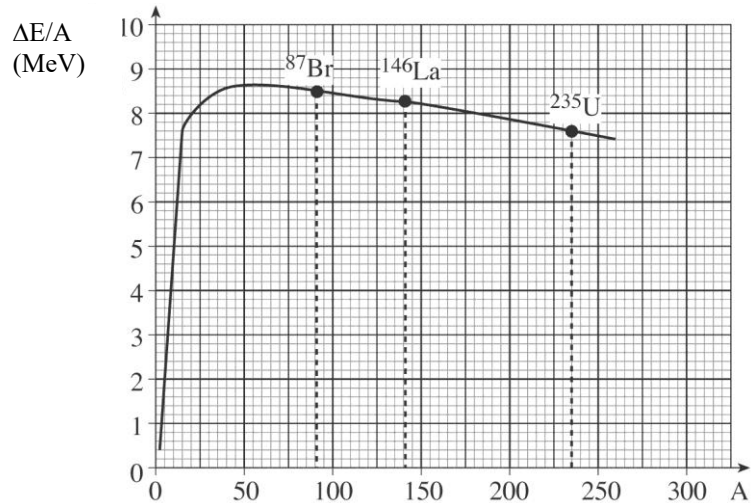
בדגימה של יוד - 128 מדדו את הפעילות R (מספר ההתפרקויות הרדיואקטיביות בשנייה) כפונקציה של הזמן t (בשניות) שחלף מרגע סיום הכנת הדגימה. תוצאות המדידות רשומות בטבלה שלפניך.

פעילות (R) (s^{-1})	זמן (t) (s)
-------------------------	-------------

392	240
161	2160
65	4080
27	6000
11	7920

- א. על פי התוצאות שבטבלה, סרטט גרף של $\ln R$ כפונקציה של t .
- ב. על סמך הגרף שסרטטת, הראה שהקשר בין הפעילות R לזמן t הוא קשר מעריכי.
- ג. על סמך הגרף, מצא את זמן מחצית החיים של האיזוטופ יוד - 128.
- ד. על סמך הגרף, מצא כמה אטומי יוד - 128 היו בדגימה מיד בתום הכנתה.

27. התרשים שלפניך מתאר את אנרגיית הקשר הממוצעת לנוקלאון, $\Delta E/A$, ביחידה MeV (מיליון אלקטרון וולט) כפונקציה של מספר המסה, A .



ΔE - אנרגיית הקשר של גרעין אטום, כלומר האנרגיה הדרושה להפריד בין כל הנוקלאונים של הגרעין.

A - מספר המסה של גרעין (מספר הנוקלאונים בגרעין).

- א. על פי הגרף קבע, איזה גרעין יציב יותר: $^{87}_{35}\text{Br}$ או $^{235}_{92}\text{U}$. נמק.
- ב. הראה כי אנרגיית הקשר ΔE של גרעין $^{235}_{92}\text{U}$ יחיד שווה בקירוב ל- $2.8 \cdot 10^{-10} \text{ J}$.
- ג. גרעין $^{235}_{92}\text{U}$ מתבקע לגרעין $^{146}_{57}\text{La}$ ולגרעין $^{87}_{35}\text{Br}$. בכמה קטנה אנרגיית הקשר של גרעין $^{235}_{92}\text{U}$ מסכום אנרגיות הקשר של גרעין $^{146}_{57}\text{La}$ וגרעין $^{87}_{35}\text{Br}$?

ד. ההספק המתקבל מתחנת הספק ("תחנת כוח") גרעינית אופיינית הוא $2 \cdot 10^9$ W. הספק זה מתקבל מביקוע של $^{235}_{92}\text{U}$. הנח כי מכל ביקוע של גרעין $^{235}_{92}\text{U}$ נפלטת האנרגיה שחישבת בסעיף ג, והנח כי נצילות תחנת ההספק היא 25%.
חשב את מספר הביקועים לשנייה של גרעיני $^{235}_{92}\text{U}$ הדרושים להפקת הספק זה.

קרינה וחומר - הרחבה והעמקה

שעות מומלצות	הנושא
15	1. תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים
8	2. גלים מכניים ואלקטרומגנטיים
4	3. מבוא לתורת הקוונטים - המודל הדואלי של האור
2	4. מבנה האטום
2	5. מבוא לתורת הקוונטים - דואליות החומר
2	6. הגרעין, ומבוא לחלקיקים יסודיים
35	סה"כ

טבלת הנושאים ופירוטם

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
15	<ul style="list-style-type: none"> - תצפיות ליליות במופעי הירח במשך תקופה. - ניסוי או הדגמה: בניית לשכה אפלה מקופסה וצפייה בתבניות האור. - הדגמה: יצירת דמויות מרובות במערכת מראות מישוריות. - הדמיית מחשב: הצגת מהלך של אלומות קרניים במערכת של שתי מראות. 	$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f}$ $\mu_{\max} = \frac{d}{f} + 1$ $\mu_{\min} = \frac{d}{f}$	<ul style="list-style-type: none"> - מופעי הירח וליקויי מאורות: <ul style="list-style-type: none"> • פיזור האור וזווית הראייה. • המושגים "ליקוי חמה" ו"ליקוי לבנה". - הלשכה האפלה. - מראות: <ul style="list-style-type: none"> • מראות מישוריות - דמויות מרובות. • מראות כדוריות. - שבירה: <ul style="list-style-type: none"> • תופעות שבירה באטמוספירה, הקשת בענן. - יישומים טכנולוגיים: <ul style="list-style-type: none"> • מראות. • תופעת ההחזרה המלאה – מנסרות, סיבים אופטיים. • עדשות כדוריות – מכשירים אופטיים, הגדלה זוויתית, ליקויי ראייה ותיקונם. 	<p>1.</p> <p>תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים</p>
8			<ul style="list-style-type: none"> - גלי קול: <ul style="list-style-type: none"> • גל קול כגל אורכי, הסבר מיקרוסקופי, מהירות הקול. • היעדר נפיצה, ההד ושיקולים אקוסטיים. • עקיפה. - כלי נגינה: <ul style="list-style-type: none"> • יצירת הצליל, הרמוניות, תהודה. • כלי מיתר וכלי נשיפה. 	<p>2.</p> <p>גלים מכניים ואלקטרומגנטיים</p>

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
			<ul style="list-style-type: none"> - אפקט דופלר: • מקור נע, קולט נע. • יישומים, מדידת מרחקים אסטרונומיים והתפשטות היקום. - ספקטרוסקופיה: • תמונת העקיפה כחותם של החומר המשדר. • פענוח ספקטרה. • שילוב עם אפקט דופלר. 	גלים מכניים ואלקטרומגנטיים (המשך)
4		$\lambda_{\max} \cdot T = \alpha$ $I = \sigma T^4$	<ul style="list-style-type: none"> - קרינת גוף שחור: • קרינת טמפרטורה, המושגים: "משטח לבן", "משטח שחור", "משטח שחור אידאלי", קרינת גוף שחור. • הגרף האופייני (עצמת הקרינה הנפלטת מגוף חם כפונקציה של אורך הגל). • חוק ההעתק של וין, נוסחת סטפן-בולצמן. • מנגנון היווצרות של קרינת חום. • "הקטסטרופה של האולטרה-סגול", הנחת פלנק. - אפקט קומפטון. 	3. מבוא לתורת הקוונטים - המודל הדואלי של האור

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
2			- אטומים דמויי מימן.	4. מבנה האטום
2			- "פונקציית גל". - שימוש בעקרון אי-הוודאות כדי להוכיח שאלקטרון אינו יכול להיות קשור בתוך הגרעין.	5. מבוא לתורת הקוונטים – דואליות החומר
2			- חלקיקים יסודיים - "נכון לעת עתה". - סכנות השימוש באנרגיה גרעינית.	6. הגרעין ומבוא לחלקיקים יסודיים

קרינה וחומר – הערות דיסקטיות לנושאי הרחבה והעמקה

1. תופעות יסודיות של האור, ייצוג מהלך האור באמצעות קרניים (15 שעות)

מופעי ירח וליקויי מאורות (2 שעות)

- א. יש להדגיש כי הירח מפזר את אור השמש, והוא עצמו אינו מקור אור.
- ב. יש להדגיש כי בדרך כלל (למעט מקרה של ליקוי לבנה) חציו של הירח מואר על-ידי השמש, ומופעי הירח תלויים במצב ההדדי בין השמש, הארץ והירח.
- ג. כדי להסביר את מופעי הירח, אין להסתפק בתרשימים דו-ממדיים: כיוון שהתופעה היא מרחבית, מומלץ להציג דגם הכולל את השמש, הארץ והירח (קיימים דגמים מסחריים כאלה). נוסף לכך מומלץ להחשיך את חדר הכיתה, להפעיל נורה שתייצג את השמש, להציב כדור שייצג את הארץ ולבקש מתלמידים הממוקמים בנקודות שונות בכיתה לציין איזה חלק מן הכדור נראה להם מואר.
- ד. מומלץ לבקש מן התלמידים לערוך תצפיות בירח: לתעד את זמן הזריחה, את מופע הירח ולקבוע את הכיוון שבו נמצאת השמש בזמן התצפית.
- ה. יש לקשור בין מופעי הירח לבין התאריך על-פי הלוח העברי.
- ו. חשוב להסביר מדוע ליקוי לבנה וליקוי חמה אינם מתרחשים בכל חודש, ולהדגים זאת במרחב.

הלשכה האפלה (2 שעות)

- א. רצוי להתייחס לנושא "אות ורעש" בהקשר ללשכה האפלה (כלומר להשוות בין היעדר תבנית אור כאשר מקור אור מקרין על מסך לבן, לבין תבנית האור הנוצרת דרך פתח הלשכה).
- ב. אין לכנות את תבנית האור הנוצרת בלשכה האפלה בשם "דמות" משום שהקרניים אינן עוברות דרכים אופטיות שוות.

מראות

מראות מישוריות - דמויות מרובות (1 שעה)

- א. חשוב לקשר בין החוויה הוויזואלית של ראיית הדמויות המרובות לבין הסבר התופעה באמצעות מודל הקרניים וחוקי החזרה.
- ב. חשוב להדגיש כי דמות מדומה יכולה להוות עצם (ממשי) עבור רכיב אופטי נוסף.
- ג. חשוב לקשר בין שדה הראייה של דמות במראה לבין היווצרותן של דמויות נוספות.

- ד. רצוי להסתפק בהדגמת הנושא במראות ניצבות ומקבילות ולא לתרגל או לסרטט מהלך קרניים לזוויות אחרות.
- ה. רצוי להדגים את השתלשלות היפוך "ימין-שמאל" ו"פנים-אחור" במערכת מראות באמצעות עצם לא-סימטרי.
- ו. מומלץ להיעזר בהדמיית מחשב בהדגמת מהלך אלומות קרניים ולאפשר לתלמידים לבדוק את השפעתם של גורמים שונים על שדה הראייה של הדמויות.
- ז. ייתכן שיעלו שאלות על גודלן הקטן והולך של דמויות במראות המקבילות - כדאי לדחות את העיסוק בכך עד ללימוד הנושא ההגדלה הזוויתית בסעיף העוסק בעדשות.
- ח. ייתכן שתלמידים יתהו האם ריבוי הדמויות אינו סותר את עקרון שימור האנרגיה במערכת. צריך להבהיר שהדמויות אינן מקור אנרגיה נוסף, אלא ניתוב של חלק מהאנרגיה המקורית. כך גם ניתן להסביר את בהירותן הפוחתת של הדמויות במראות המקבילות.

מראות כדוריות (3 שעות)

- א. יש להציג בפני התלמידים מראות קעורות ומראות קמורות.
- ב. המפתח להבנת מהלך האור לאחר פגיעה במראה הוא הרעיון של סטייה שונה בכיוון האור הפוגע בנקודות שונות על פני המראה. בכל נקודת פגיעה אפשר לראות את הקרן כפוגעת במראה מישורית, הממוקמת בכיוון משיק למראה הכדורית.

מושגי יסוד

- א. מומלץ להדגים מהלך של אלומת אור צרה הפוגעת באזורים שונים ולהראות את השוני בזווית הסטייה. בהקשר זה אפשר להציג את המושג "ציר אופטי ראשי".
- ב. מומלץ להדגים מהלך אלומת אור מקבילה במראה קעורה ובמראה קמורה ולהגדיר את המושג "מוקד" (ממשי ומדומה).
- ג. יש להראות כיצד המוקד ומרכז הכדור שממנו נגזרה העדשה מאפשרים הגדרת מהלכן של "קרניים מיוחדות".

דמות במראה קעורה וקמורה

- א. מומלץ להציע לתלמידים להתבונן במראות שונות בעצמים קרובים ורחוקים. בדרך זאת יגיעו באופן חווייתי להכרה שמראות משנות את מהלך האור ושהמרחק בין העצם למראה משפיע על פעולת המראה.

- ב. יש להדגים היווצרות דמויות ממשיות במראה מרכזת באמצעות "ספסל אופטי" ולחקור באופן איכותי וכמותי את הקשר בין מיקום העצם לאופי הדמות ולמיקומה.
- ג. יש לאפשר לתלמידים לערוך ניסוי של חקירת הדמות הממשית במראה מרכזת. לעיבוד התוצאות, מומלץ להשתמש בגיליון אלקטרוני.
- ד. במהלך ייצוג הדמות באמצעות קרניים, אין להסתפק באיתור מקום הדמות על-ידי "קרניים מיוחדות" בלבד. יש להראות מהלכן של אלומות קרניים נוספות, המגיעות אל העדשה מאותה הנקודה על העצם. כמו כן יש להתייחס לשדה הראייה של הדמות.
- ה. מומלץ להשתמש בהדמיה כדי להציג את מודל הקרניים עבור מעבר האור במראות כדוריות. אמצעי זה יחסוך זמן ומאמץ ויאפשר להציג את השינוי במיקום הדמות ואופייה כתלות בשינוי מרחק המוקד ומיקום העצם.
- ו. יש לאפשר לתלמידים לחוות ראייה של דמות ממשית ללא מסך. דבר זה מחייב הצבת התלמיד במרחק של כחצי מטר מהדמות ומיקום ראשו של התלמיד כך שאלומת האור תפגע ממש בעינו. שימוש בלוח זכוכית מט או בדף נייר לאיתור הדמות, והזזתו בהדרגה, מקלים על התלמיד להתרכז בדמות.

שבירה (1 שעה)

תופעות שבירה באטמוספירה - הקשת בענן

מומלץ להתייחס למאמר "הקשת בענן" שהופיע ב**תהודה**, כרך 15, חוברת 3.

יישומים טכנולוגיים (6 שעות)

יישומים טכנולוגיים של מראות

ניתן לבקש מהתלמידים לבצע פרויקט בנייה במערכת מראות (פריסקופ, קליידוסקופ ועוד). הפרויקט יכול להיות בדגש חקר, טכנולוגיה או אמנות.

יישומים טכנולוגיים של תופעת ההחזרה המלאה

א. סיבים אופטיים - שימושים בתקשורת וברפואה. רצוי לתאר סכמתית את מבנה הסיב האופטי ולדון במשמעות עוביו הקטן ובחירת המעטפת.

ב. רצוי להדגים מהלך של קרן לייזר בסיב אופטי העשוי מפרספקס וזרם מים.

ג. אפשר להציג קטע מסרט על אבחון רפואי באמצעות סיב אופטי (לדוגמה: "הספקטרום האלקטרוני" בסדרה "פיזיקה בפעולה").

- ד. מנסרה להחזרה מלאה כמרכיב במשקפות ובמצלמות; רצוי להציג חתך של משקפת שדה ולהסביר את תפקיד המנסרה.
- ה. אפשר להתייחס להשפעת השימוש במנסרה (להחזרה מלאה) על האוריינטציה של הדמות הנצפית: תופעות השיקוף וההיפוך.
- ו. אפשר לציין את השימוש בתופעת ההחזרה המלאה בתעשייה. לדוגמה: בתעשיית היין והמיצים - ריכוז הסוכר משפיע על מקדם השבירה ועל זווית הגבול. מכשיר המדידה הבנוי על עיקרון זה מאפשר קביעת ריכוז הסוכר.
- ז. מומלץ להיעזר בהדמיית מחשב להדגמת מהלך אלומות קרניים ולאפשר לתלמידים לבדוק את השפעתם של גורמים שונים על הובלת אור באמצעות החזרה מלאה.

יישומים טכנולוגיים של עדשות כדוריות

- א. נושא המצלמה משמש בעיקר רקע להבנת מבנה העין ופעולתה.
- ב. רצוי לאפשר לצלמים חובבים לתת הרצאה ולהדגים את עקרונות הצילום. תלמידים יכולים להכין לוח קיר על תולדות הצילום ולהציג תמונות מתקופות שונות.
- ג. ניתן לשלב היבטים בין-תחומיים על הקשר שבין כימיה ופיזיקה בתהליך הצילום ועל הקשר שבין הביולוגיה לפיזיקה בתהליך הראייה.
- ד. מומלץ להציג את הסרט "העין – דיווח מבפנים" שהופק על-ידי חברת "מוחות" עבור מורי הביולוגיה.
- ה. יש להתייחס לליקויי ראייה מבחינת הפגם המבני ומבחינת התוצאה האופטית.
- ו. רצוי להתייחס לשימוש במשקפיים משני היבטים: יצירת דמות במקום שבו העין יכולה להסתגל ולראות; יצירת מערכת אופטית (עין + משקפיים) בעלת מרחק-מוקד המתאים לעין הנתונה.
- ז. מסגרת השעות המוקצת אינה מותרת זמן לדיון במערכת שתי עדשות. עם זאת, כדאי להביא ללא הוכחה את נוסחת העדשות הצמודות כדי להסביר את פעולת המשקפיים.
- ח. בקשר לפעולת הזכוכית המגדלת, מומלץ להתייחס למאמר: "לקחים ראשונים מבחינת הברות", תהודה, כרך 15, חוברת 3.

2. גלים מכניים ואלקטרומגנטיים (8 שעות)

גלי קול (2 שעות)

- א. ההסבר המיקרוסקופי להתקדמות הקול קשור בתנודה של חלקיקי התווך. לצד גדלים מתנודדים המוכרים מן המיתר (סטייה משיווי-משקל, מהירות החלקיקים המתנודדים, תאוצתם, התנע שלהם וכיו"ב), מדברים כאן גם על הלחץ כגודל משתנה במהלך התקדמות ההפרעה.
- ב. גל הקול בזורם (גז או נוזל) הוא גל אורכי. הדבר אינו משנה מנקודת ראות של מאפייני ההתקדמות הגלית (המהירות הקבועה, שמירת צורת ההפרעה, החזרה, שבירה, עקרון הסופרפוזיציה המתבטא בהתאבכות ובעקיפה, היעדר האינטראקציה בין גלי קול). טבעו של הזורם הוא שאין אצלו מאמצי גזירה (שהם רוחביים), אלא לחץ (שהוא אורכי) בלבד. לעומת זאת, לגלי קול במוצק (ובהם גלים סייסימיים בארץ) יש גם רכיבים רוחביים.
- ג. אורכיותו של הגל היא משמעותית כאשר בונים משדר (רמקול) או מקלט (מיקרופון), שבהם אמורה להתרחש תנודה אורכית.
- ד. מהירות הגל תלויה בתווך, ויש מקום לדיון איכותי על הפרמטרים שעשויים להשפיע על מהירות הקול.
- ה. הגל שומר על צורתו. שמירת הגל על צורתו היא האחראית לכך שדברים שיוצאים מפינו יישמעו למאזין בצורה שאינה תלויה במיקומו המדויק ביחס לדובר. השמירה על צורת הגל קשורה בהיעדר נפיצה (דיספרסיה) משמעותית - גלי הקול נעים במהירות שכמעט ואינה תלויה בתדירות.
- ו. היעדר האינטראקציה בין גלי הקול הוא חשוב ביותר. בלעדיו היה משתבש הקול בדרכו אל השומע כתוצאה מאינטראקציה עם גלי הקול הממלאים את חלל האוויר.
- ז. תופעת ההחזרה של גלי קול - ההד - מוכרת מאוד ויש להתחשב בה בשיקולים אקוסטיים. לעתים אף מנצלים אותה למטרות יישומיות.
- ט. עקיפה של גלי קול מוכרת לנו מחיי היום-יום. איננו חייבים לעמוד בדיוק מול הדלת הפתוחה כדי לשמוע בבירור את הדובר בחדר הסמוך.

כלי נגינה (2 שעות)

- א. כלי נגינה מייצרים גלי קול בהיותם מערכות מתנודדות. הם מעניינים בהיותם יישום יום-יומי מעניין של תורת הקול. המערכות מורכבות מאוד, אך אפשר לדון בהן ברמה העקרונית, ולפעמים אפילו לקבל הערכות כמותיות טובות. אנו מצפים שתלמיד יהיה מסוגל לתת הסברים כלליים - לדוגמה: מדוע הגדלת כלי הנגינה גורמת לצליל נמוך יותר.

- ב. כלי הנגינה הם הזדמנות לומר כמה מילים על תופעות חשובות שאיננו מגיעים אליהן בדרך כלל. אפשר לדבר על העברת אנרגיה (בין הכלי לחלל התהודה ולאוויר) ועל צימוד ותהודה. תופעות אלה עשויות להיות הגורמים שיעוררו לחשיבה ולהבנה, בהיותן קשורות לחיי היום-יום.
- ג. כלי מיתר מעניינים בהיותם מערכת חד-ממדית של מיתר שנדון בכיתה. המיתר מעורר מצד אחד (על-ידי המושך בקשת, או הפורט, או המקיש בפטיש הפסנתר), ומעורר את האוויר לתנועה מן הצד השני. תדירות ההתנדדות של המיתר ושל האוויר זהות, אך אורכי הגל בשני התווכים שונים. זה מאפשר דיון מעניין שיש בו יישום של הרקע העיוני. ברור שכלי המיתר מורכבים לאין שיעור מן המודל הפשטני (תיבת התהודה והצורה המדויקת של עירור המיתר עשויים להשפיע מאוד על הצליל), אך בכל זאת אפשר להפיק רווח גדול מן הדיון הפשטני הזה.
- ד. כלי מיתר הם אמצעי הדגמה מצוי, ואפשר אפילו לעשות אתם ניסויים כמותיים. מעבדה ממוחשבת מאפשרת ניתוח טוב של התופעות.
- ה. כלי נשיפה וכלים המבוססים על מפרח הם דוגמאות מצוינות להתנדדות חללי אוויר. ההתנדדות החד-ממדית של האוויר בחלל גלילי מאפשרת מודל כמותי פתיר.

אפקט דופלר (2 שעות)

- א. האפקטים הקשורים במקור נע הם מעניינים ובעלי יישומים חשובים. אמנם קשה להדגימם באמבט גלים, אך הדמיינו מחשב עשויה לחולל נפלאות. אין לוותר עליהם, והתלמיד אמור להיות מסוגל להסבירם ולהגיע להערכות כמותיות פשוטות.
- ב. הגורם הקובע את התנהגות הגל הוא היחס שבין מהירות המקור למהירות הגל, שהוא מספר חסר ממדים. כאשר מהירות המקור קטנה ממהירות הגל, מתקבל אפקט דופלר. אורך הגל והתדירות המתקבלת אצל הקולט יהיו תלויים במיקומו של הקולט. על עיקרון זה מתבססת שיטה למדידת מהירות של מכוניות, מטוסים וגלקסיות.
- ג. כאשר מהירות המקור גדולה ממהירות הגל, חזית הגל מקבלת צורה חרוט שבקדקודו המקור. זווית הפתיחה נקבעת על-ידי היחס בין מהירות הגל למהירות המקור. ידיעתה של אחת מהן (מהירות הגל או מהירות המקור) מאפשרת את קציבת השנייה מתוך מדידת הזווית. דוגמה מוכרת למהירות מקור הגדולה ממהירות הגל היא ה"בום העל-קולי".
- ד. התיאור הקודם הוא פשטני במה שנוגע למהירויות גבוהות בשל היווצרות לחצים גבוהים ושינויי טמפרטורה המביאים לשינויים במהירות הגל. עם זאת, חשוב מאוד להציגו.
- ה. אפקט דופלר קיים גם כאשר המקור נח (ביחס לתווך) והמשדר נע, ויש הבדל במידת ההסחה של אורך הגל בין המקרה הזה לבין המקרה של המקור הנע (הבדל מסדר שני בלבד).

ד. אפקט דופלר נלמד במסגרת הדיון בגלי הקול, אך הוא מעניין מאוד גם בגלים אלקטרומגנטיים. אין להעביר את הנוסחאות מן הגלים המכניים אל הגלים האלקטרומגנטיים, מפני שבאופן עקרוני המצב שונה - התווך, שהוא נקודת הייחוס לאפקט דופלר בגלי קול, אינו נדרש כלל לגלים אלקטרומגנטיים. בכל הנוגע לאפקט דופלר בגלים אלקטרומגנטיים, יש להסתפק בהסבר איכותי, אך אין לוותר על הצגתו.

ספקטרוסקופיה (2 שעות)

ספקטרום כחותם החומר המשדר

- א. ספקטרום אור השמש כולל קווים ספקטרליים חשוכים המכונים "קווי פראונהופר". יש להסביר את מקורם של קווים אלה. כדאי להציג את הניסוי ההיסטורי של הכימאים בונזן וקירכהוף (השוואת הספקטרום של אור לבן לספקטרום שהתקבל כאשר אור לבן עבר דרך אדי נתרן).
- ב. חשוב להדגיש כי על-פי הספקטרום של אור המגיע מכוכבים, אפשר לזהות יסודות הנמצאים על פני הכוכבים. כך יודעים למשל שעל פני כוכב פלוני יש ברזל.
- ג. כדאי להזכיר שאת הליום זיהו תחילה על פני השמש, ורק מאוחר יותר על פני הארץ.

פענוח ספקטרה

מומלץ לערוך ניסוי בעזרת ספקטרומטר סריג של ספקטרום כספית לעומת ספקטרום של הליום או נתרן, ולזהות על התמונה את היסוד.

שילוב עם אפקט דופלר

- א. יש לציין כי הספקטרום של מקורות אור מוזז לאורכי גל ארוכים יותר אם מקור האור מתרחק מאתנו ("הזזה לאדום"), ולהפך.
- ב. על פי מידת ההסחה של הקווים הספקטרליים אפשר לחשב את המהירות של מקור האור ביחס לצופה.
- ג. יש לדון באפקט דופלר רק במצב של תנועה לאורך קו ישר.
- ד. מומלץ להשתמש ביישומונים (applets) הנמצאים ברשת האינטרנט.

3. מבוא לתורת הקוונטים - המודל הדואלי של האור (4 שעות)

קרינת גוף שחור (3 שעות)

- א. כדאי להתחיל את הנושא בחזרה על המושג "קרינת טמפרטורה". בהקשר זה יש לעמוד על ההבדל בין משטחים שונים: "משטח לבן", "משטח שחור", "משטח שחור אידאלי".
- ב. גרפים המתארים את עצמת הקרינה הנפלטת מגוף חם יש לתאר כפונקציה של אורך הגל והטמפרטורה.
- ג. את חוק ההעתקה של ויין וחוק סטפן בולצמן יש להסביר או להדגים לפי הזמן העומד לרשות המורה.
- ד. כדאי שבסיום לימוד הנושא, התלמידים יבינו מדוע "הקטסטרופה של העל-סגול" היוותה בעיה לפיזיקה הקלאסית.
- ה. מומלץ להסביר כיצד הנחת פלאנק פתרה את הבעיה.

אפקט קומפטון (1 שעה)

- א. טיפול בנושא זה מומלץ רק לכיתות מתקדמות בגלל המתמטיקה המורכבת הדרושה ללמידתו.
- ב. אפקט קומפטון מתקיים באלקטרונים חופשיים. ייחודו בכך שאורך הגל של הקרינה המפוזרת תלוי אך ורק בזווית הפיזור.
- ג. חשוב להדגיש כי שימור תנע ואנרגיה במקביל איננו אפשרי בבליעה של פוטון על-ידי אלקטרון. במקרה של אינטראקציה בין פוטון לאלקטרון חופשי, מתרחש אפקט קומפטון.
- ד. יש להדגיש כי ככל שאנרגיית הפוטון גדולה יחסית לאנרגיית הקשר של האלקטרון, ההסתברות לפיזור גדולה יותר.

4. מבנה האטום (2 שעות)

- א. יש להדגיש כי אפשר ליישם את המודל של בוהר על כל יון עם אלקטרון יחיד.
- ב. מומלץ לדון במודל של קרינת אלפא וקרינת תעלה.

5. מבוא לתורת הקוונטים - דואליות החומר (2 שעות)

- א. יש לדון בניסוי טיילור – הפרשנות ההסתברותית לפונקציית הגל.
- ב. הדיון בחלקיק בבור פוטנציאל אין-סופי הוא פשוט למדי והוא דומה לדיון בגלים עומדים במיתר הקשור בקצותיו.
- ג. בפונקציית הגל של חלקיק בקופסה ובאפקט התעלה יש לדון באופן איכותי בלבד.
- ד. על סמך עיקרון אי-הוודאות, יש להראות כי לא ייתכן מצב שבו אלקטרון 'יושב' בגרעין האטום.

6. הגרעין ומבוא לחלקיקים יסודיים (2 שעות)

- א. הדוגמה של מודל קרינת האלפא כחלקיק בבור פוטנציאל ושל האופי האקראי של הקרינה הרדיואקטיבית יכולה לסייע בהבנת הפרשנות ההסתברותית של פונקציית הגל.
- ב. מומלץ לשלב דיון על היתרונות והסכנות בשימוש באנרגיה גרעינית.