פרק 1 : קינמטיקה

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

שעות	פעילויות מומלצות	נוסחאות	פירוט	נושא
1		$\Delta\vec{x} = \vec{x}_2 - \vec{x}_1$ $\vec{x}_{A,B} = \vec{x}_A - \vec{x}_B$	- מושגי היסוד "אורך" ו"זמן": מדידתם ויחידותיהם, מערכת היחידות התקנית SI. - המושגים: "ציר מקום", "מערכת ייחוס", "מקום יחסי", "מרחק", "העתק", "דרך".	1.1 מושגי יסוד בתנועה לאורך קו ישר
2	- ניסוי: דגימת מקום וזמן של גוף נע בתנועה כלשהי על-ידי רשם-זמן.		- 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	- בניית טבלת מקום-זמן וסרטוט גרף מקום-זמן על פי "תרשים עקבות" של גוף שנע בתנועה קצובה.	$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t}$ $x = x_0 + vt$	- 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	- הדמיה: חקירת מהירות ביחס למערכות ייחוס שונות כפונקציה של הזמן.	$\vec{v}_{A,B} = \vec{v}_{A,S} - \vec{v}_{B,S}$	- יחסיות התנועה. - מהירות יחסית.	1.4 תנועה יחסית
1	- גיליון אלקטרוני: חישוב מהירות רגעית ממשוואת מקום-זמן. הערכת מהירויות רגעיות מטבלת מקום-זמן.	$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t}$ $\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t}$	- המושגים: "מהירות ממוצעת", "מהירות רגעית". - מהירות ממוצעת כשיפוע מיתר בגרף מקום-זמן. - מהירות רגעית כשיפוע משיק בגרף מקום-זמן.	1.5 תנועה במהירות משתנה

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

נושא	פירוט	נוסחאות	פעילויות מומלצות	שעות
1.6 תנועה בתאוצה קבועה	- תנועה בתאוצה קבועה. - הצגת המקום והמהירות כפונקציה של הזמן ע"י ביטויים אלגבריים וע"י גרפים. - נפילה חופשית, זריקה אנכית.	$v = v_0 + at$ $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ $x = x_0 + \frac{v_0 + v}{2} t$ $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$	- ניסוי: דגימת מקום וזמן של גוף הנופל חופשית ע"י רשם-זמן או מד-טווח.	7
1.7 תנועה בתאוצה משתנה	- המושגים: "תאוצה ממוצעת", "תאוצה רגעית". - תאוצה ממוצעת כשיפוע מיתר בגרף מהירות-זמן. - תאוצה רגעית כשיפוע משיק בגרף מהירות-זמן.	$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ $\vec{a} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$	- גיליון אלקטרוני: חישוב תאוצות רגעיות על פי טבלת מקום-זמן.	1
1.8 מושגי יסוד בתנועה במישור	- המושגים: "מקום" ו"העתק" בתנועה במישור.			1
1.9 וקטורים	- 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.			4
1.10 המהירות והתאוצה בתנועה במישור	- המושגים: "מהירות כווקטור", "תאוצה כווקטור". - כיוון התאוצה בתנועה קצובה על מסלול עקום. - רכיבי תאוצה: רכיב משיקי ורכיב ניצב למשיק (רדיאלי).	$\vec{v} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ $\vec{a} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$	- הערכת כיוון התאוצה על פי וקטורי המהירות.	3

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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** ו**נוסחה 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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

רצוי שהתלמידים ישרטטו 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 ישרטטו 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 ניסוי/ים 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 ישרטטו 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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 למערכות 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 וקטֵן, 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 וגדֵלה, מתי היא קבועה ומתי היא הולכת וקטֵנה.

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

עד רגע $t_1 = 1s$, $t_1 = 1 + \Delta t$, 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 "תאוטה" 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 הדיון 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 תרשים 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).

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 לעָצמתו
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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

נושא	פירוט	נוסחאות	פעילויות מומלצות	שעות
2.6 החוק השני של ניוטון	- 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 $\left(a \propto \Sigma\vec{F}\right)$. - המסה של גוף כמדד להתמדתו (מסה התמדית) $m = \frac{\sum F}{a}$. - הקילוגרם - יחידת המסה ב- SI. - ניסוח החוק השני של ניוטון. - משוואת תנועה.	$\Sigma\vec{F} = m\vec{a}$	- 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.	4
2.7 כוח הכובד, והמסה כמדד לעָצמתו	- המסה של גוף כמדד לעָצמת כוח הכובד הפועל עליו (מסה כובדית). - מדידת מסה באמצעות מאזני כפות. - צפיפות ומשקל סגולי.	$\rho = \frac{m}{V}$	- הדגמה: "מסה אינרציאלית" ו"מסה כובדית" הן גדלים פרופורציוניים.	2
2.8 יישום החוק השני לגבי תנועה לאורך קו ישר	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".		- ניסויים: מציאת מקדם החיכוך, יישום החוק השני של ניוטון במערכות דו-גופיות. - גיליון אלקטרוני: פתרון נומרי של משוואת תנועה.	9

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

נושא	פירוט	נוסחאות	פעילויות מומלצות	שעות
2.9 תנועה במישור בהשפעת כוח קבוע	- זריקה אופקית : הרכיבים האופקיים והאנכיים של המקום, המהירות והתאוצה ; התנועה הדו-ממדית. - זריקה משופעת. - הכללה לתנועה בהשפעת כוח קבוע.		- ניתוח תרשים-עקבות של גוף שנזרק. - ניתוח סרטון וידאו של גוף הנזרק באוויר.	4
2.10 תנועה מעגלית	- 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.	$a_R = \frac{v^2}{R}$ $\Sigma F = m\frac{v^2}{R}$ $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ $\omega = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$	- דף עבודה : תלות התאוצה הרדיאלית במהירות התנועה וברדיוס המסלול המעגלי.	6
2.11 מערכות ייחוס	- 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 האקוויוולנציה ושימוש בו לניתוח תנועה ביחס למערכות מואצות. - המושגים : "משקל", "כיוון מטה", "כיוון אופקי".	$\vec{v}_{A,B} = \vec{v}_{A,S} - \vec{v}_{B,S}$ $\vec{a}_{A,B} = \vec{a}_{A,S} - \vec{a}_{B,S}$ $w = mg'$		5

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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:

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

אם גוף 1 מפעיל כוח על גוף 2 אז:

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

(2) הכוחות הפוכים בכיוונם.

(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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 **כווקטור** (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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 גדֵל כאשר הכוח הנורמלי גדֵל, 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 תרשים-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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 בעייתים 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 לעָצמתו (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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 $\vec{F} \parallel \vec{v}_0$), 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.)

ב. 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.

ג. יש להציג שיטות נומריות לפתרון משוואת 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; הדיפת 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).

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 האקוויוולנציה). מומלץ להראות כיצד ניתן להשתמש בו להגדרת המושגים: "משקל", "כיוון מַטָה".

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

נושא	פירוט	נוסחאות	פעילויות מומלצות	שעות
3.1 מתקף, תנע והקשר ביניהם	- 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.	$\vec{J} = \vec{F}\Delta t$ $\vec{J}_{\text{כולל}} = \Sigma \vec{F} dt$ $\vec{p} = m\vec{v}$ $\vec{J}_{\text{כולל}} = \Delta \vec{p}$ $\Sigma \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$	- ניסוי: הקשר בין המתקף הכולל הפועל על גוף, לשינוי התנע של הגוף (באמצעות חיישן-כוח ושער-אור).	4
3.2 חוק שימור התנע	- המושג "מערכת סגורה". - שימור תנע במערכת דו-גופית סגורה. - חוק שימור התנע.	$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2$ $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + ...$ $\vec{P} = Const.$	- ניסויים: בחינת שימור תנע כאשר המהירויות נמדדות באופן **ישיר** (מד-טווח או צילום וידאו); בממד אחד ובשני ממדים.	3
3.3 יישומים של חוק שימור התנע	- התנגשויות. - רתע. - שימור תנע במהלך אינטראקציה. - הנעה רקטית (איכותי).		- ניסויים: שימור תנע בתופעות התנגשות, רתע, ובמהלך אינטראקציה.	6

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 'שטחה' 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. יתרונן 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.)

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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

תרגיל לדוגמה:

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

ג. הערות לגבי יישום הנוסחה $\vec{J}_{\text{כולל}} = m\vec{v}_f - m\vec{v}_i$:

(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 $\vec{J}_{\text{כולל}} = m\vec{v}_f - m\vec{v}_i$ באופן ניסיוני. לשם כך אפשר לחקור התנגשות של קרונית עם חיישן-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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

(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:

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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) חַשבו 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).

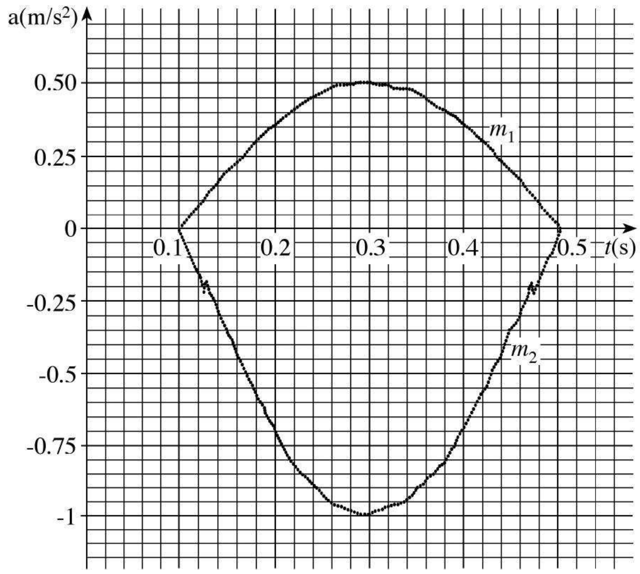
כלי המדידה בשני הניסויים המתוארים לעיל הם מד-טווח (למדידת מהירות) או מצלמת וידאו ומאזניים (למדידת מסה).

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.

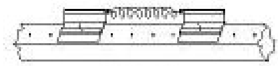
ד. שימור תנע במהלך התנגשות: יוצרים התנגשות על מסילת אוויר בין שני גלשנים, שלאחד מהם מחובר 'מזלג' עם גומייה. באמצעות חיישן מתאים המחובר למחשב, ניתן לדגום את ערכי התאוצה במהלך ההתנגשות. בתרשים 1 מתוארות שתי עקומות שהתקבלו בדרך זו. מן העקומות ניתן לחשב את יחס המסות ואת יחס השינויים במהירות של כל קרונית (באמצעות מדידת שטחים ש'מתחת' לעקומות), וניתן להראות כי התנע נשמר במהלך ההתנגשות.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים



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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

פרק 4 : אנרגיה מכנית ושימורה

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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:

<u>**שלב ראשון:**</u> 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 $|F|\cos\theta \cdot \Delta s$ ($|F|$ ו- Δs חיוביים). הביטוי השני מדגיש את הסקלריות של ה**עבודה**.
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 תכונֶה 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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

<u>שלב שני:</u> 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 כ'שטח' 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 ה'שטח' שמתחת לגרף, חשוב לשים לב שלא ניתן ללמוד מן הגרף בלבד מהו סימן ההעתק. ייתכן שגרף הכוח נמצא ברביע הרביעי, אולם ה'שטח' (ולכן גם העבודה) הוא חיובי.

יש להציג דרכים שונות לחישוב ה'שטח'. (בפרק 3 סעיף 3.1, מפורטות הדרכים לחישוב 'שטח' 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.

<u>שלב שלישי:</u> 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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 קטֵנה בעלייה וגדֵלה 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 המתיחות) 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.)

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

- 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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

פרק 5 : מודל הגז האידאלי

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

נושא	פירוט	נוסחאות	פעילויות מומלצות	שעות
5.1 תכונות מַקרוסקופיות של גזים	- המושגים "לחץ" ו"טמפרטורה". - תיאור התנהגות גז תחת שינויי נפח, לחץ וטמפרטורה. - המושג "האפס המוחלט". - המושגים "גז אידאלי" ו"גז ראלי".	$p=\frac{F}{A}$ $\frac{pV}{T+273.16}=\text{Const.}$ $\frac{pV}{T}=\text{Const.}$		2
5.2 הסבר התנהגות גז אידאלי באמצעות המודל הקינטי	- הנחות המודל הקינטי. - פיתוח ביטוי מתמטי ללחץ שמפעיל גז אידאלי $\left(p=\frac{1}{3}\frac{Nmv^2}{V}\right)$. - טמפרטורה של גז כמדד לאנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולות הגז. - הקבוע של בולצמן. - משוואת המצב של הגז האידאלי.	$\overline{E}_k=\frac{3}{2}kT$ $pV=NkT$	- הדמיות מחשב של המודל הקינטי.	3
5.3 החוק הראשון והחוק השני של התרמודינמיקה	- המושגים "אנרגיה תרמית", "אנרגיה פנימית" ו"חום". - החוק הראשון של התרמודינמיקה. - החוק השני של התרמודינמיקה.	$\Delta E=Q+W$		1

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

מודל הגז האידאלי: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

5.1 תכונות מַקרוסקופיות 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 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 (°C) תשמש יחידת טמפרטורה; יש לציין כי סקלת צלזיוס היא שרירותית, וכי יש גם סקלות שרירותיות אחרות.

ג. במקום לצאת מהחוקים האמפיריים של בויל וגי-לוסק, אפשר להסתפק בהצגת הנוסחה $\frac{pV}{T+273.16}=\text{Const.}$ כנוסחה אמפירית המתארת התנהגות גזים. חשוב לציין כי נוסחה זו מתארת את התנהגותם של כל הגזים (כל עוד הגז אינו דחוס מדי). לאחר מכן מגדירים משתנה חדש: $T+273.16$, המייצג טמפרטורה בקלווין (K ולא °K). מן הקשר $\frac{pV}{T}=\text{Const.}$ ייגזר "האפס המוחלט".

ד. "**גז אידאלי**" 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 אידאלי (3 שעות)

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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

ג. יש לפתח את הביטוי ללחץ: $p=\frac{1}{3}\frac{Nmv^2}{V}$ (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 $\frac{pV}{T}=Const.$ ו- $p=\frac{1}{3}\frac{Nmv^2}{V}$ מראים כי במסגרת המודל הקינטי של הגז האידאלי (חד-אטומי כגון הליום ונאון), הטמפרטורה של גז והאנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולות הגז פרופורציוניות זו לזו: $\overline{E}_k=\frac{3}{2}kT$ (k – 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 אידאלי חד-אטומי תוגדר כסכום האנרגיות הקינטיות (הטרנסלטוריות) של כל המולקולות שבו, דהיינו: $N\overline{E}_k$.

ו. את משוואת המצב של הגז האידאלי 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 אידאלי, 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 מַקרוסקופי - 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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 שבוזבזה, וצריך לחפש דרך קבע "מקורות אנרגיה" חדשים.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

פרק 6 : תנועה הרמונית פשוטה

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

נושא	פירוט	נוסחאות	פעילויות מומלצות	שעות
6.1 תנועה מחזורית, תנודות, תנודות הרמוניות	- 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.	תנועה מחזורית : $p(t) = p(t+T)$ לכל t. כאשר : p(t) - מקום הגוף ברגע t. $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ $\Sigma\vec{F} = -c\vec{x}$	ניסויים : - דגימת הכוח הפועל על גוף מתנודד כפונקציה של המקום. - דגימת המקום של גוף מתנודד כפונקציה של הזמן.	2
6.2 נוסחאות קינמטיות לתיאור תנועתו של אוסצילטור הרמוני	- 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.	$-c\vec{x} = m\ddot{\vec{x}}$ $x(t) = A\cos\left(\sqrt{\frac{c}{m}}t + \phi\right)$ $x(t) = A\cos(\omega t)$ $v(t) = -A\omega\sin(\omega t)$ $a(t) = -A\omega^2\cos(\omega t)$ $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	- גיליון אלקטרוני : פתרון משוואת התנועה של אוסצילטור הרמוני באופן נומרי.	3
6.3 דוגמאות : תנודות גוף הקשור לקפיץ אנכי ותנודות של מטוטלת פשוטה	- 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.	$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$	- מדידת זמן-המחזור של תנודות אנכיות כפונקציה של המסה. - מדידת זמן-המחזור של מטוטלת פשוטה כפונקציה של אורך המטוטלת.	6

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

תנועה הרמונית: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

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

א. מוצע לפתוח את הנושא "תנועה הרמונית" בדיון **כללי** ב**תנועה 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 בידיעת אחד משלושת הגדלים האלה כדי לאפיין תנועה מחזורית - כל שניים מבין השלושה 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 $\left(s^{-1}\right)$, 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:

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

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

<u>דרך ב'</u> 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".

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 ל**פיתוח אנליטי** של נוסחאות קינמטיות:

<u>דרך א':</u> 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 משמעויות 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**.

<u>דרך ב':</u> 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 המתנודד 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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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 ωt, 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:

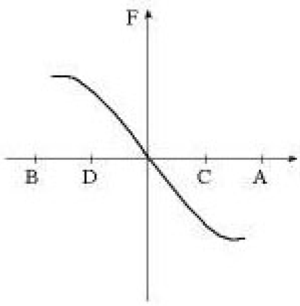
<u>דרך א׳</u>: האנרגיה הפוטנציאלית מוצגת כסכום של אנרגיית כובד $mg\Delta h$ ושל אנרגיה אלסטית $\frac{1}{2}k\Delta\ell^2$, כאשר $\Delta\ell$ מייצג את התארכות הקפיץ מעבר למצבו הרפוי.

<u>דרך ב׳</u>: 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).

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים



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.)

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

פרק 7 : כבידה

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

נושא	פירוט	נוסחאות	פעילויות מומלצות	שעות
7.1 רקע היסטורי וחוקי קפלר	- 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.	$T^2 = kr^3$ $\left(\frac{\bar{r}_1}{\bar{r}_2}\right)^3 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2$	- ניתן לצפות בשני הסרטים : ״שלושת חוקי קפלר״ ו״בעיית קפלר״ מסדרת סרטי הווידאו ״היקום המכני״ (או״פ).	2
7.2 חוק הכבידה	- 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.	$F = G\frac{Mm}{r^2}$ לגבי גרם שמים כדורי $g^* = \frac{GM}{r^2}$	- הדמיית מחשב : תנועת לוויינים או ירחים סביב כוכב או פלנטה (כדוגמת צדק בפרוייקט Clea).	5
7.3 המושג ״שדה״, עבודה ואנרגיה בשדה הכבידה	- המושגים : ״עָצמת 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.	$U_G = -\frac{GMm}{r}$ $E_k = -\frac{U_G}{2}$ $E = -\frac{GMm}{2r}$		6

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

כבידה: פירוט, דגשים, הערות דידקטיות

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 שסרט 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:

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

- 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 מופעל על-ידי השמש ; $\frac{4\pi^2}{k}$ מייצג את יכולתה להפעיל כוחות על כוכבי הלכת.

(3) בהסתמך על החוק השלישי של ניוטון לגבי האינטראקציה בין השמש לכוכב לכת, מסיקים כי ניתן להציג : $\frac{4\pi^2}{k} = GM$.

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

(5) מכלילים את הביטוי $F = G\frac{Mm}{r^2}$ 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 גילויו של כוכב הלכת נפטון תחילה 'על הנייר', ורק אחר כך בשמים.
2. את תופעת הגיאות והשפל. יש לתאר את התופעה ואת מחזוריותה ולציין כי ניתן לה הסבר מלא במסגרת תאוריית הכבידה.
3. קיומם של לוויינים מלאכותיים.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

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.

© כל הזכויות שמורות לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים