ה"תמנון" – חקירה קינמטית כמותית של תנועה דו ממדית מורכבת תוך שימוש בגיליון excel

אלי שלו, ביה"ס התיכון ליד האוניברסיטה העברית, שדרות רופין, ירושלים

תקציר: מובא תרגיל מקורי שניתן כעבודת בית לתלמידים בכיתה טובה. התרגיל ניתן לאחר סיום הוראת הפרק: "קינמטיקה דו-ממדית". המטרה המוצהרת היתה לבדוק את מידת הקישור, הקיימת אצל התלמידים, בין הפרק המתמטי החדש - אלגברה וקטורית - והמושגים הפיזיקליים המתאימים. בתרגיל נחקרת כמותית תנועתו של מתקן שעשועים - "תמנון". מובאים גרפים שסורטטו בעזרת גיליון excelשתוכנת למשימה. מעניינת חקירת הדמיון בין הצורות המתקבלות בעזרת משחק הילדים - הספירוגרף - והדוגמאות הקינמטיות. בסוף המאמר מובאת הערכה דיאגנוסטית של קשיי התלמידים והתרשמותם מתרגיל חריג זה.

מילות מפתח: קינמטיקה דו-ממדית, וקטורים, "תמנון", גיליון excel, ספירוגרף.

מבוא

עם סיום הוראת הפרק על קינמטיקה דו-ממדית, חיפשתי דרך לתת לתלמידי לחקור קינמטית תנועה לא שיגרתית, חקירה שתדגים להם "דרך הרגליים" את כוחם הרב של הכלים שרכשו. באמצעות חקירה זו ביקשתי גם למצוא פתרון לתחושת חוסר נוחות שעולה אצל התלמידים מידי שנה, בעקבות הוראת הפרק. עיקרה של תחושה זו הוא בעיית ה-"כמותי/איכותי". הדיון בקינמטיקה הדו-ממדית לפי ספרם (המצוין!) של רוזן וקרקובר[1] מתחיל בהצגה איכותית וכמותית של מושג הוקטור. רבים בו התרגילים הכמותיים. דיון זה הוא רק המבוא המגיע לשיאו בהצגת מושג התאוצה ורכיביה בתנועה על קו עקום. אלא, שמבלי משים (מבחינת התלמיד), התירגול משנה את אופיו והופך לאיכותי. בכל שנה נשמע בכיתתי תלמיד מתוסכל המעלה את זעקתו: "אבל איך **מחשבים** את התאוצה?!" רציתי, לכן, שהחקירה תהיה גם **כמותית**.

המטרה שהיצבתי לעצמי הייתה לבנות כלי דיאגנוסטי שיבדוק את רמת השליטה של התלמידים במושגים השונים, ויותר מזה, את מידת הקישור הקיימת אצלם בין המושגים הקינמטיים והמושגים המתמטיים החדשים. רציתי לברר האם האלגברה הוקטורית מְתֻרְגֶמֶת לתמונת עולם בעלת משמעות; האם תלמידי אכן הפנימו דרך התבוננות חדשה על העולם.

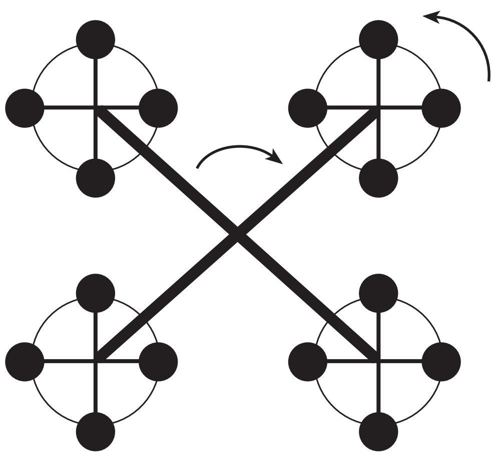
התרגיל, שנכתב לאור העקרונות שלמעלה, ניתן לתלמידי כחלק מרכזי ממבחן בית. לרשות התלמידים עמד סוף שבוע ארוך לצורך העבודה. במאמר זה אביא את נוסח התרגיל המקורי, אצביע על מסקנות העולות מביצועי התלמידים, ואציע דרכים לשימוש מגוון בו ובדומים לו.

להלן הנוסח המקורי של תרגיל הבית

בתרגיל זה נחקור את תנועתו של מתקן שעשועים הנמצא בלונה פארק.

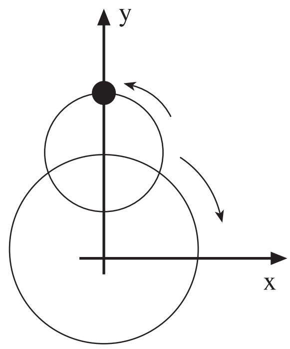
המתקן, המכונה (לפחות בלונה פארק שבתל אביב) **תמנון**, בנוי ממוטות היוצאים ממרכז משותף. המוטות סובבים סביב המרכז המשותף. בקצה כל מוט נמצא מבנה דומה נוסף הסובב אף הוא, אלא שהפעם, סביב ציר הנמצא בקצה המוט הראשי.

המבקרים יושבים במושבים הנמצאים בקצות המוטות המשניים, ונעים תחת השפעת הסיבוב המשולב. (ראה תרשים 1).



תרשים 1: תאור סכמתי של "התמנון"

המתקן נע כך שהמבנה **הראשי** (המוטות הגדולים) מסתובב **עם כיוון השעון**, בעוד שהמבנים **המשניים** נעים **נגד כיוון השעון**.



תרשים 2: גבולות המעגלים שמתווים המוטות הראשיים והמשניים וכיווני הסיבוב. מושב האדם במצב התחלה מסומן בנקודה.

תרשים 2 מתאר מצב התחלה בו אדם יושב בנקודה המרוחקת ביותר מציר הסיבוב הראשי.

בתרשים מצויירים מושב האדם (הנקודה), וגבולות המעגלים שמתווים המוטות הראשיים והמשניים. בתרשים מופיעים גם כיווני הסיבובים.

נתונים:

אורך המוט הראשי:	$R = 4$ m
אורך המוט המשני:	$r = 2$ m
זמן מחזור סיבוב המתקן כולו סביב צירו:	$T_1 = 4$ s
זמן מחזור סיבוב המבנה המשני סביב צירו:	$T_2 = 2$ s

נקבע מערכת צירים במרכז המעגל הראשי.

מערכת הצירים אינה מסתובבת, אלא קבועה במישור.

א. **סרטט**, בקנה מידה ובעזרת מחוגה, את מקום האדם בזמנים:
$t = 0$ s , $(1/8)\,T_1$, $(2/8)\,T_1$,$(3/8)\,T_1$, . . . , $(7/8)\,T_1$.

ב. **חשב** את הרכיבים של וקטורי המקום של האדם בזמנים אלו. הצג בטבלה. צרף את החישובים.

ג. **סרטט**, על מערכת צירים אחת, את וקטורי המקום בזמנים האמורים. ציין מפורשות מיהו כל וקטור.

ד. **סרטט**, על אותה מערכת צירים, ובצבע שונה, את וקטורי ההעתק בשמינית הראשונה של המחזור, בשמינית השניה, . . . , בשמינית השמינית.

ה. **חשב** את וקטורי ההעתק (**גודל וכיוון**) בפרקי הזמן האמורים (שמיניות המחזור). ערוך בטבלה. צרף את החישובים.

ו. **מה** צורת המסלול שעושה האיש במשך סיבוב אחד? הערך את אורך המסלול. הסבר את שיקוליך.

ז. **חשב** את רכיבי המהירות הממוצעת בפרקי הזמן הנתונים (שמיניות המחזור). הוסף לטבלה. הסבר כיצד חישבת, או צרף את החישובים עצמם.

ח. **רשום** באיזה חלק של המסלול המהירות הממוצעת (בשמינית מחזור) מקסימלית ובאיזה חלק המהירות הממוצעת מינימלית. הסבר.

ט. **סרטט**, על מערכת צירים חדשה, את וקטורי המהירות הממוצעת.

י. **הסבר**, על סמך עבודתך עד כה, באיזה חלק של המסלול התאוצה הממוצעת (במשך שמינית מחזור) מקסימלית, ובאיזה חלק מינימלית. נמק היטב!

יא. **חשב** את התאוצה המקסימלית ואת התאוצה המינימלית (גודל וכיוון).

יב. כיצד היה משתנה המסלול של האדם ביחס לקרקע במקרים הבאים (כל מקרה לחוד):
- הגדלת זמן המחזור של הסיבוב המשני ($\mathbf{T_2}$) פי **2**.
- הקטנת רדיוס הסיבוב המשני (**r**) פי **2**.
- קיום הסיבוב המשני באותה מגמה כמו הסיבוב הראשי (שניהם עם כיוון השעון).

נמק את תשובותיך.

יג. **סכם** בקצרה את אשר למדת מהתרגיל.

יד. **רשום** את הערכתך למבחן: קושי, עניין, מידת האתגר וכדומה. האם היית מעוניין להמשיך במתכונת זו?

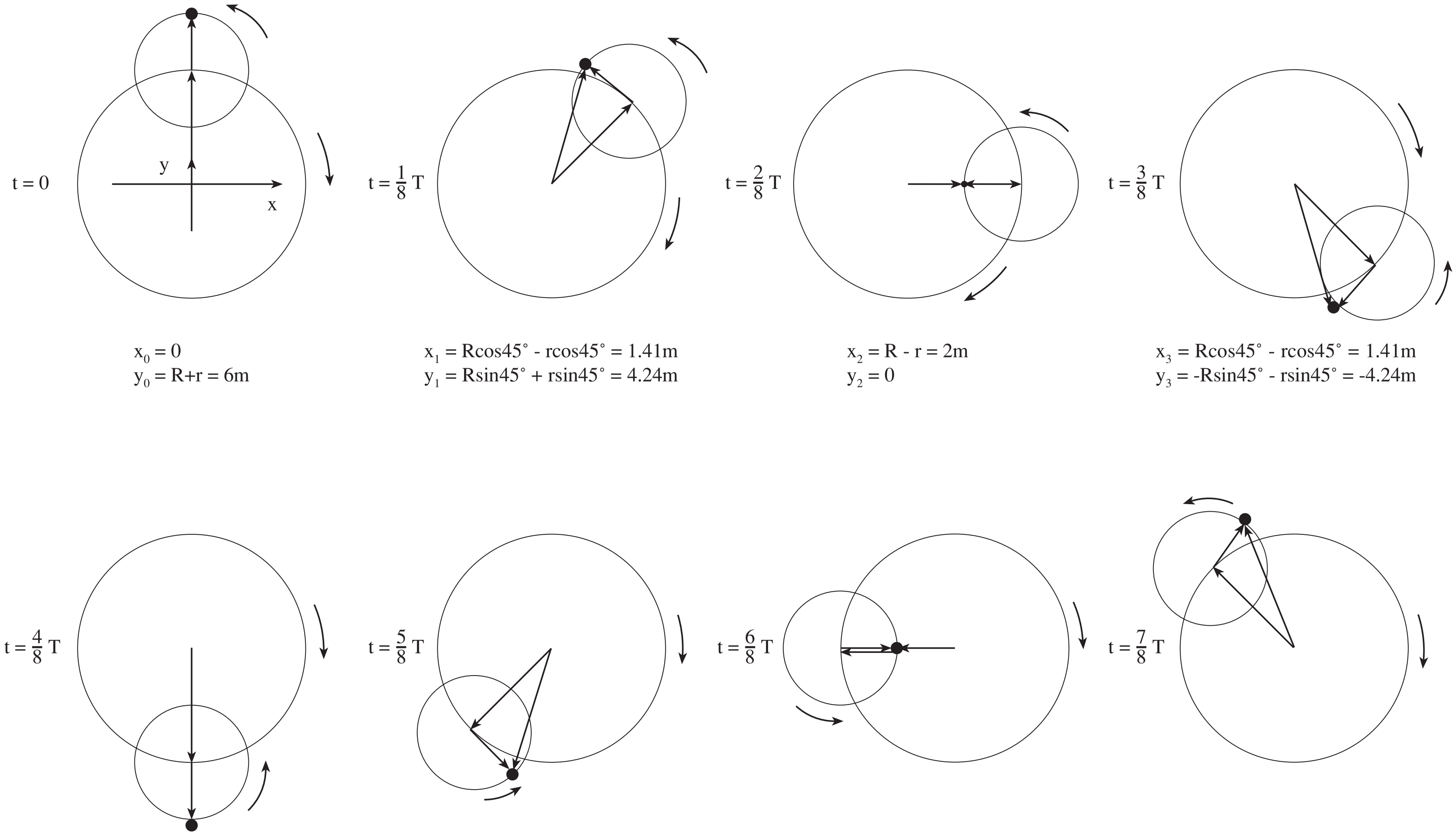
עד כאן נוסח התרגיל.

תרשים 3 מציג, בקנה מידה, את מצב המערכת בזמנים האמורים. מקומו של האדם בכל רגע נקבע על ידי חיבור של הרדיוס -וקטור (היוצא מהמרכז המשותף) למרכז ציר הסיבוב המשני עם וקטור המקום של האדם ביחס לציר המשני. בתרשים מודגש החיבור הוקטורי, יחד עם חישוב רכיבי המקום. זמן המחזור של התנועה המורכבת מסומן ב-T. ברור כי במקרה זה $T = T_1$.

תרשים 4 מציג גרפית את וקטורי המקום בזמנים:

$t = 0,\ (1/8)T_1\ ,\ (2/8)T_1,\ (3/8)T_1\ ....,\ \ (7/8)T_1$

בתרשים מופיעים גם וקטורי ההעתק. חישוב וקטורי ההעתק מתבצע על ידי חיסור וקטורי של וקטורי המקום. הזוויות נמדדות על פי המוסכמה המקובלת - מהצד החיובי של ציר ה- X ונגד כיוון השעון.



$x_0 = 0$
$y_0 = R + r = 6m$

$x_1 = R\cos45^\circ - r\cos45^\circ = 1.41m$
$y_1 = R\sin45^\circ + r\sin45^\circ = 4.24m$

$x_2 = R - r = 2m$
$y_2 = 0$

$x_3 = R\cos45^\circ - r\cos45^\circ = 1.41m$
$y_3 = -R\sin45^\circ - r\sin45^\circ = -4.24m$

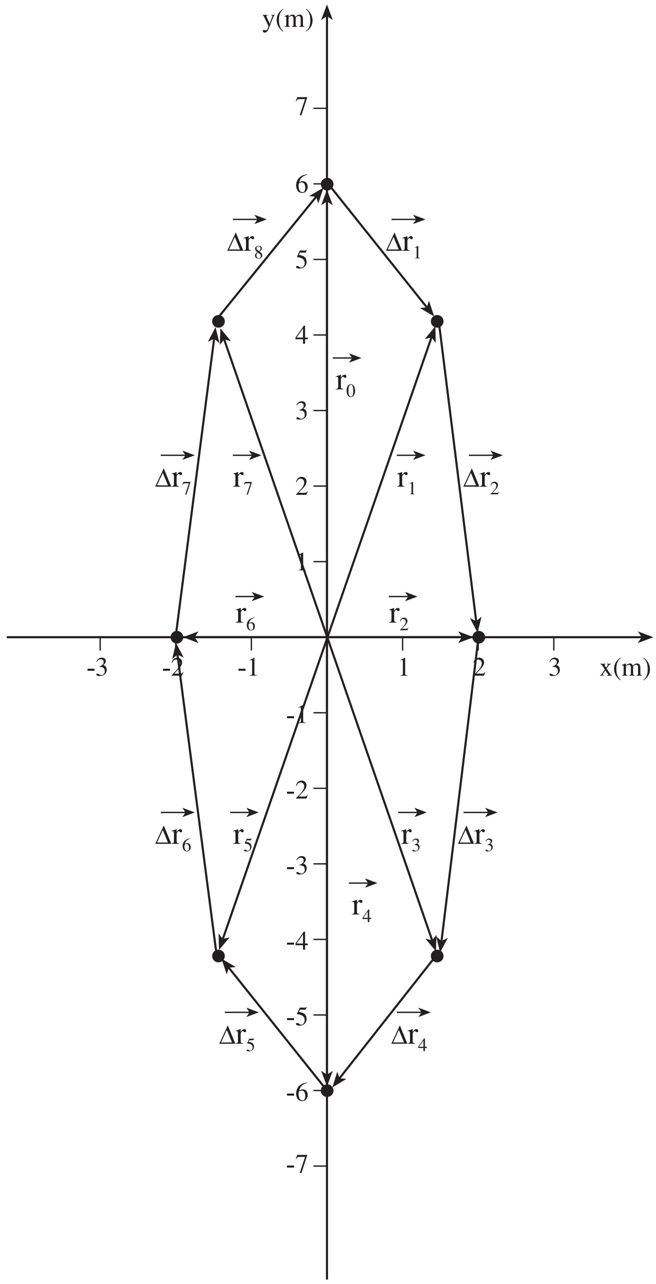
$x_4 = 0$
$y_4 = -R - r = -6m$

$x_1 = -R\cos45^\circ + r\cos45^\circ = -1.41m$
$y_1 = -R\sin45^\circ - r\sin45^\circ = -4.24m$

$x_6 = -R + r = -2m$
$y_6 = 0$

$x_7 = -R\cos45^\circ + r\cos45^\circ = -1.41m$
$y_7 = R\sin45^\circ + r\sin45^\circ = 4.24m$

תרשים 3: סרטוט המעגלים של מצב המערכת בזמנים: $t = T/8; 2T/8; \ldots 7T/8$ מקומו של האדם בכל רגע נקבע על ידי חבור הרדיוס-וקטור למרכז ציר הסיבוב המשני עם וקטור המקום של האדם ביחס לציר המשני. זמן המחזור של התנועה המורכבת מסומן ב T. ברור כי במקרה זה $T_1 = T$.



תרשים 4: א. וקטורי המקום וההעתק, (גודל וכיוון)

מתרשים 4 עולה גם שמסלול האיש הוא דמוי אליפסה. אין ביכולתנו לקבוע, על סמך הניתוח הנוכחי האם המסלול אכן אליפטי ממש. ההערכה הטובה ביותר שאנו יכולים לספק לאורכו של המסלול הוא סכום רכיבי ההעתקים (כ- 26 מטרים במקרה שלפנינו). הערכה זו היא חסם תחתון לאורכו המדויק של המסלול.

i	פרק הזמן (s)	$\lvert\Delta\vec{r}_i\rvert$ (m)	q
1	[0, T/8]	2.26	308.7°
2	[T/8, 2T/8]	4.28	277.9°
3	[2T/8, 3T/8]	4.28	262.1°
4	[3T/8, 4T/8]	2.26	231.3°
5	[4T/8, 5T/8]	2.26	128.7°
6	[5T/8T, 6T/8]	4.28	97.9°
7	[6T/8, 7T/8]	4.28	82.1°
8	[7T/8, T]	2.26	51.3°

תרשים 4: ב. טבלת ההעתקים

רכיבי המהירות הממוצעת בפרקי הזמן השונים מחושבים מיידית על ידי הביטויים:

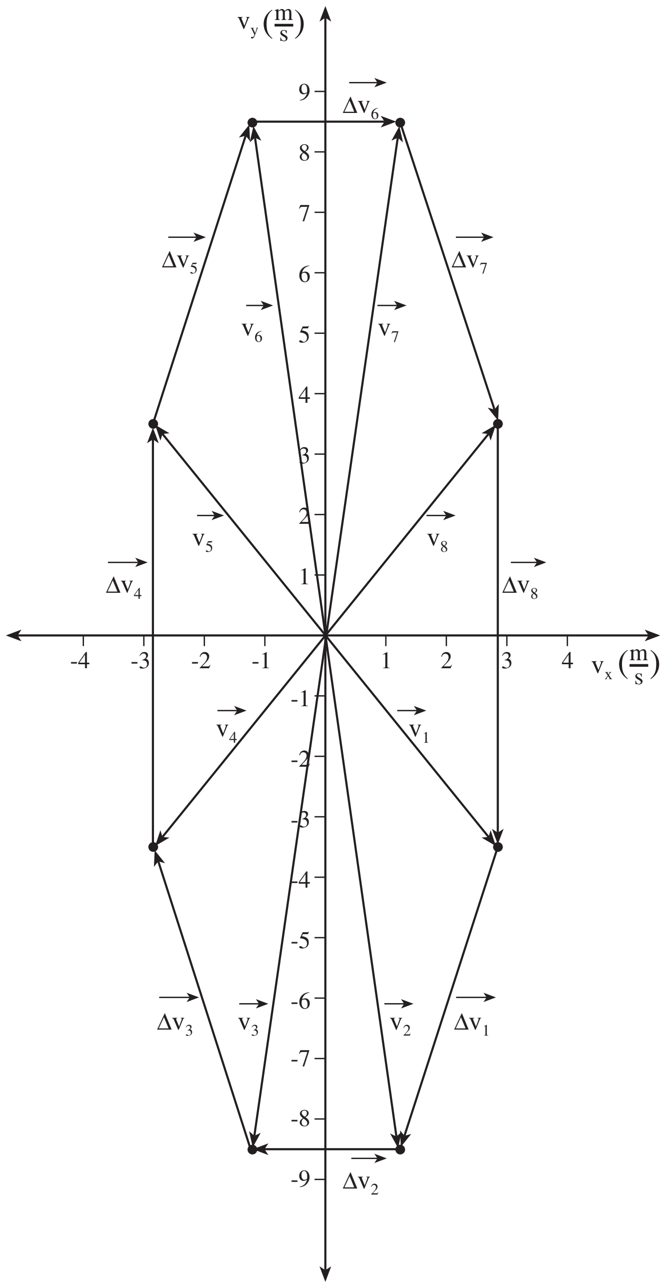
$v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$, $v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. במקרה שלנו $\Delta t = \frac{1}{8}T$. ניתן לסרטט את וקטורי המהירויות במקביל לוקטורי ההעתק, על מערכת הצירים שבתרשים 4, אלא שהצגה שכזו אינה הטובה ביותר. ראשית, ישנו טעם לפגם בסרטוט וקטור שיחידותיו מטרים לשניה על מערכת צירים שיחידותיה מטרים. שנית, לא ניתן להמשיך ולנתח סרטוט זה בצורה נוחה למציאת התאוצות. דרך הצגה גרפית טובה יותר מובאת בתרשים 5. הצירים בתרשים 5 פורשים את **מרחב המהירויות**. בתרשים מופיעים גם וקטורי שינוי המהירות, למרות הדמיון החזותי בין תרשימים 4 ו-5, אל לנו להתבלבל. רק תרשים 4 מציג את מרחב הקואורדינטות. עיון בסרטוט 4 מראה שהמהירות מקסימלית כשהאיש חוצה את ציר ה- X (בקצות הציר הקצר של האליפסה) ומינימלית כשהאיש חוצה את ציר ה-Y (בקצות הציר הארוך של האליפסה). הסיבה: בנקודות אלו ההעתקים מקסימליים ומינימליים בהתאמה.

הסרטוט בתרשים 5 מאפשר לנו להסיק מסקנה זו גם כן. עיון בסרטוט מגלה שהוקטורים בעלי אורך מקסימלי הם הוקטורים $\vec{v}_2$, $\vec{v}_3$, $\vec{v}_6$, $\vec{v}_7$. וקטורים אלו מתאימים להעתקים בזמן מעבר **ציר ה-X**, למרות שעל מערכת הצירים במרחב המהירויות הם מתקבלים על ***הציר האנכי***.

היתרון הגדול של ההצגה במרחב המהירויות הוא בכך שמיד אנו מקבלים אינפורמציה על **התאוצה**, שהרי

$$a_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t} \quad , \quad a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} .$$

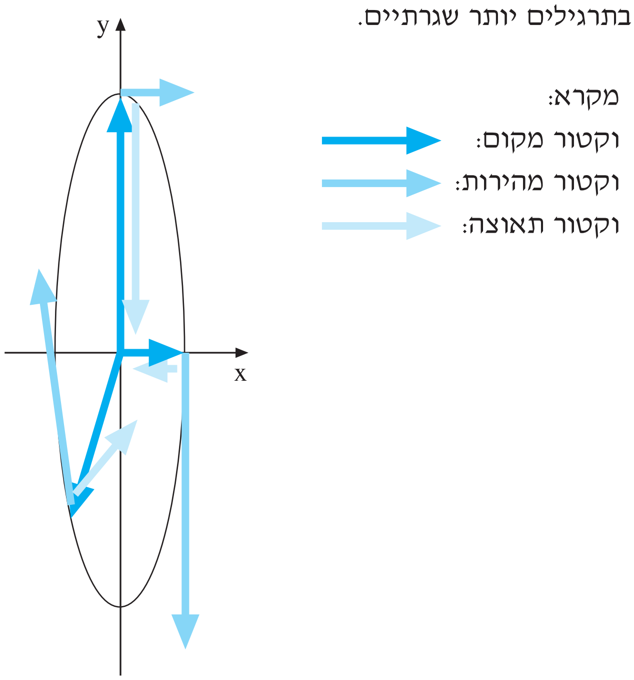
מאחר ווקטורי שינוי המהירות מתכונתיים לתאוצה, אנו מזהים מייד שהתאוצה הממוצעת מקסימלית בזמנים בהם



תרשים 5: מרחב המהירויות

$\vec{v}_4$ עובר ל-$\vec{v}_5$, ו-$\vec{v}_8$ עובר ל-$\vec{v}_1$. ומאחר והמהירויות מתכונתיות להעתקים, עיון בתרשים 4 מגלה כי התאוצה מקסימלית כאשר האדם חולף דרך **ציר ה-y** (בקצות הציר הארוך של האליפסה). באופן דומה קל להסיק שהתאוצה מינימלית על ציר ה-x. טבלה 1 מסכמת את עיקרי החקירה הקינמטית עד כה.

תרשים 6 מציג את סרטוט הוקטורים על המסלול, במעבר דרך צירי הקואורדינטות ובנקודת ביניים, בדומה לסרטוטים בתרגילים יותר שגרתיים.



תרשים 6: תאור הוקטורים

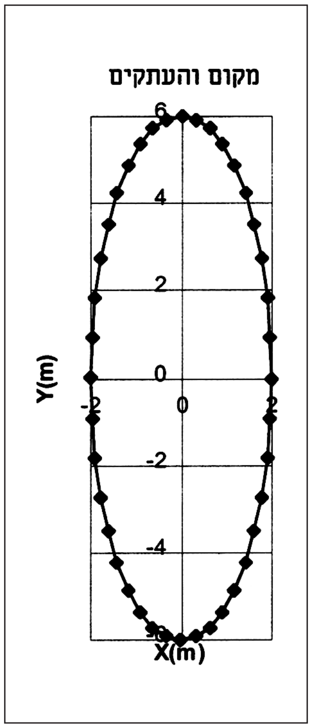
התשובה לתסריטי ה ״מה יקרה אם...״ שבסעיף י״ב בשאלון, ״מתחננת״ ממש להעלאת הפתרון על המחשב. (ניתן, כמובן, לבצע את מהלך סרטוט המיקום של האדם מחדש עבור כל מקרה. ניתן גם, במקרים הנדונים בסעיף י״ב, להפעיל שיקולים היוריסטיים ולהגיע לתשובות נכונות).

	וקטור המקום, $\vec{r}$	**וקטור המהירות,** $\vec{v}$	**וקטור התאוצה,** $\vec{a}$
מקסימלי	על ציר ה-Y; גודלו 6m, וכיוונו 90°, 270°	על ציר ה-X; גודלו 8.5 m/s, וכיוונו 90°, 270°	על ציר ה-Y; גודלו 14 m/s^2, וכיוונו 90°, 270°, **מנוגד** לכיוון וקטור המקום
מינימלי	על ציר ה-X; גודלו 2m, וכיוונו 0°, 180°	על ציר ה-Y; גודלו 2.8 m/s, וכיוונו 0°, 180°	על ציר ה-X; גודלו 4.7 m/s^2, וכיוונו 0°, 180°, **מנוגד** לכיוון וקטור המקום

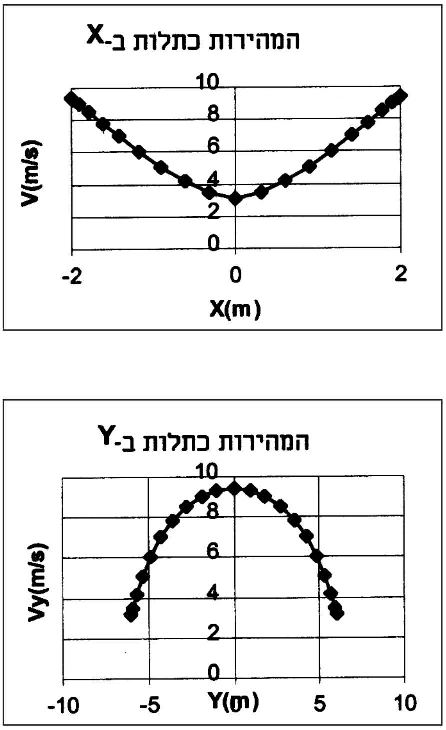
טבלה 1: סיכום עיקרי החקירה הקינמטית

פתרון ממוחשב של הבעיה פותח אפיקים נוספים. הקטנת פסיעת הזמן (ולכן קרוב טוב יותר של המסלולים) והיכולת להציג גרפים מגוונים הם רק חלק קטן מאפיקים חשובים אלו.

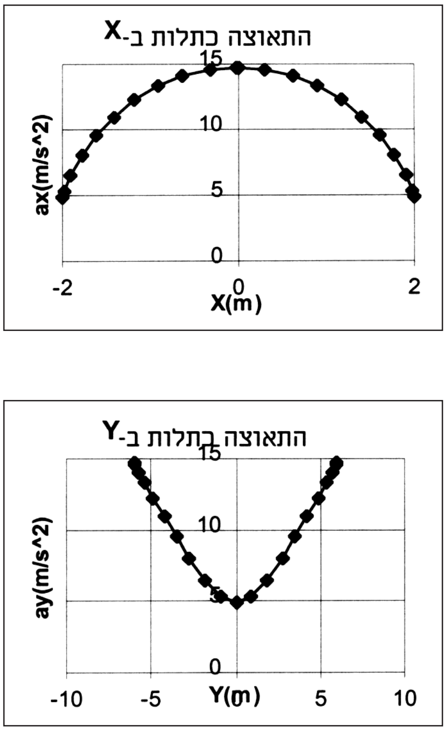
להלן הגרפים שהופקו מגליון excel שתוכנת למשימה. (המעוניינים יכולים לקבל את מערך הגליון מאלי שלו)



תרשים 7

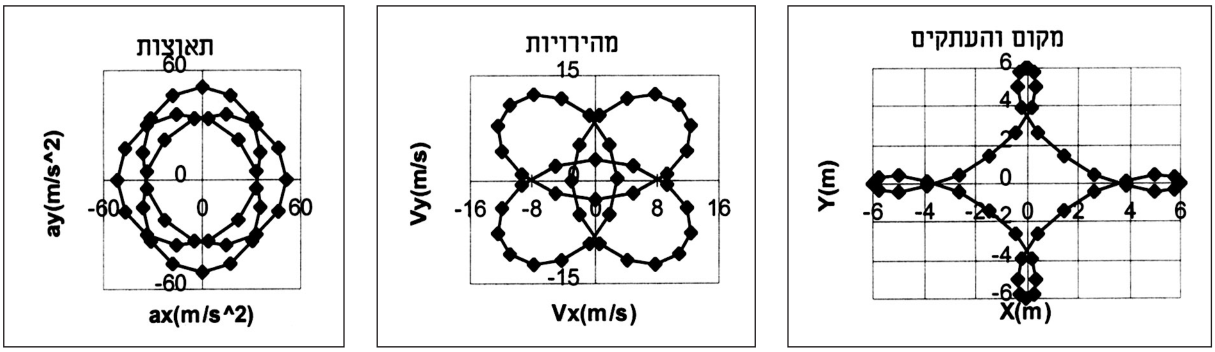


תרשים 8

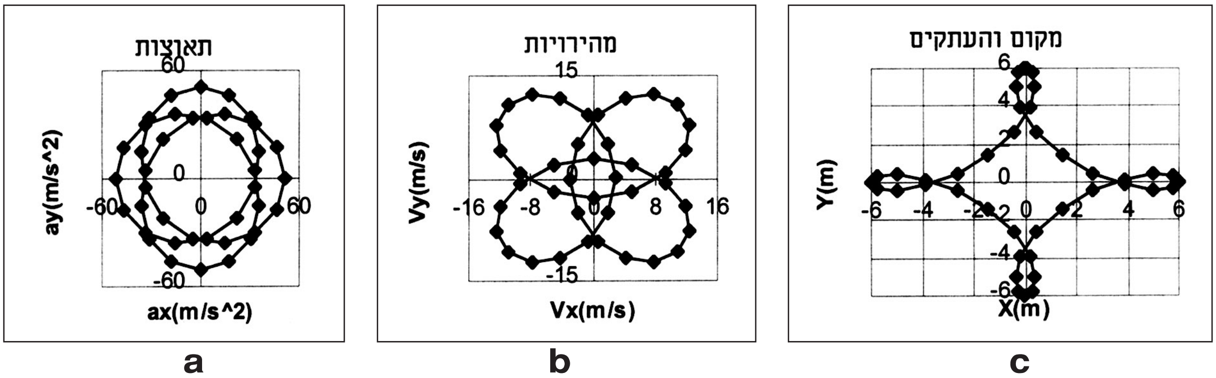


תרשים 9

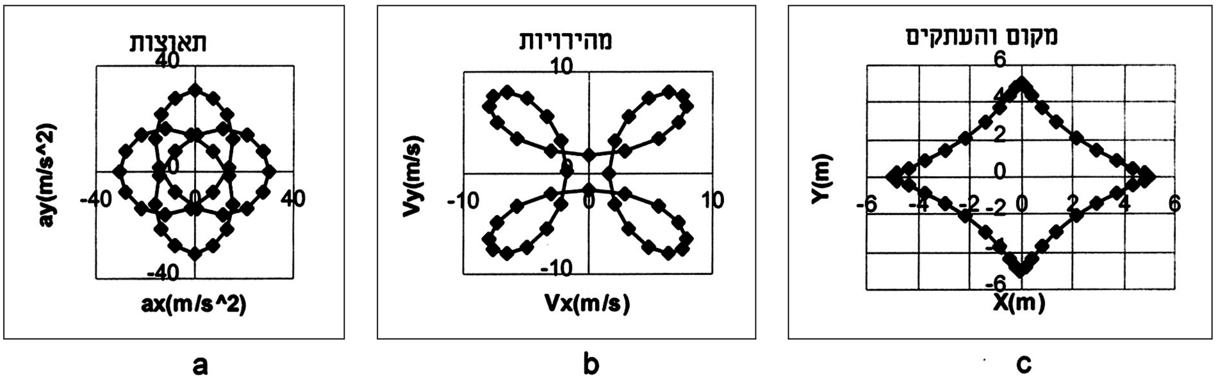
הגיליון מאפשר לנו גם לחקור באמצעים גרפיים קשרים בין משתנים שונים. כך, למשל, תרשים 8 מציג גרפים של גודל המהירות כתלות בשיעורי ה-X וה-Y של האדם שבמתקן. מהגרפים ברור שגודל המהירות מקסימלי כאשר $y = 0$ (כלומר על ציר ה-x), ומינימלי כאשר $x = 0$ (כלומר על ציר ה-y), בהתאמה עם דיוננו הקודם. באופן דומה ניתן לסרטט בעזרת הגיליון את הגרפים של גודל התאוצה כתלות בשיעורי צירי המקום, ולהגיע בקלות רבה למסקנה היכן התאוצה מקסימלית והיכן מינימלית. תרשים 9 מציג תלויות אלו. הקורא הסקרן יכול לבדוק גם קשרים נוספים בין הגדלים הפיזיקליים המעורבים בבעיה. נסו, למשל, לסרטט גרף של גודל התאוצה כתלות בגודל וקטור המקום, או של גודל המהירות כתלות בגודל וקטור המקום. התוצאות מפתיעות. כוחו הגדול של הגיליון מתבטא במהירות שבה יכולים להיבדק תסריטי "מה אם" שונים. תרשימים 14-10 מביאים דוגמאות שונות, המדגימות עד כמה רחוק ניתן לקחת את הבעיה, אם רק חפצים בכך:



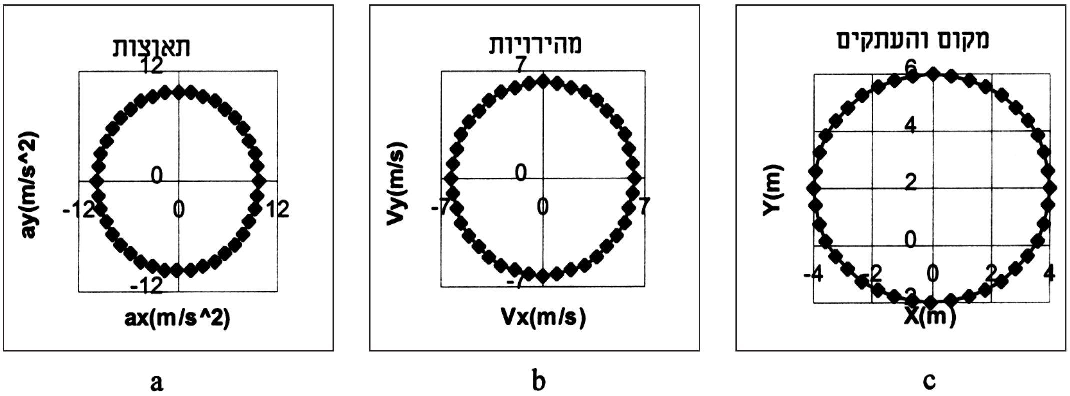
תרשים 10



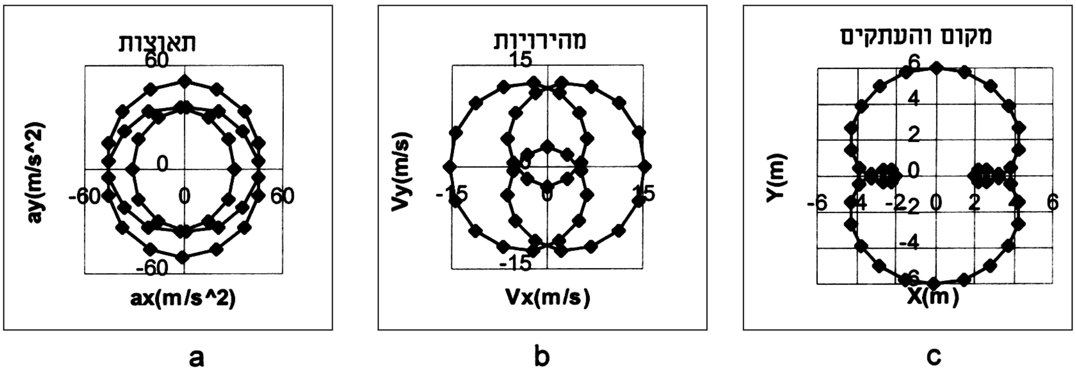
תרשים 11



תרשים 12



תרשים 13



תרשים 14

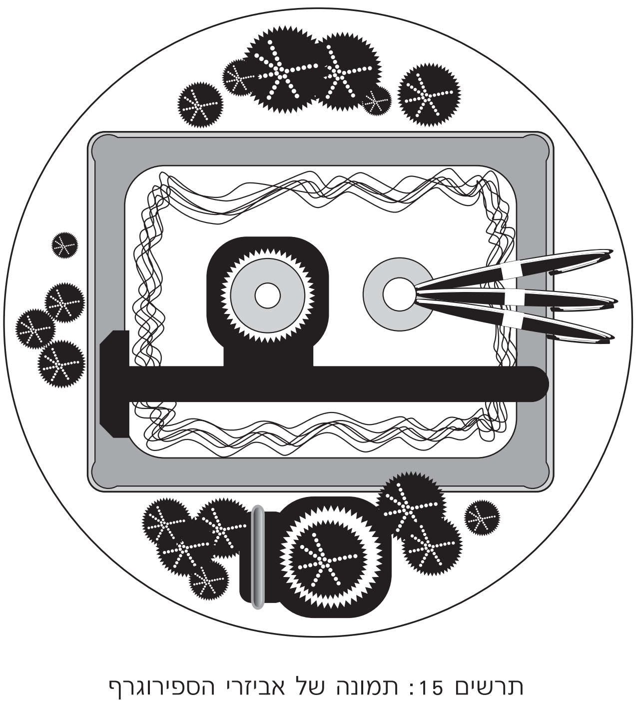
עיון בגרפים מראה מיד את העושר הטמון במערכת. למשל:

* שינוי קל באחד הפרמטרים מוביל לשינויים דרסטיים בצורת המסלול, במהירויות ובתאוצות.
* המסלולים נראים סימטריים. אלמנט הסימטריה הוא ציר סיבוב שסידרו שווה ליחס התדירויות. הקורא מוזמן לבדוק נקודה מרתקת זו עבור יחסי תדירות שונים.
* גם המסלולים הפשוטים ביותר מכילים כר נרחב לדיון. במקרה ויחס התדירויות שווה, והסיבובים מתרחשים במגמה הפוכה זה לזה, צורת המסלול היא מעגל שמרכזו מוסט מראשית הצירים (תרשים 13) הקורא מוזמן לבחון, למשל, את מידת ההסטה כתלות ביחס בין רידוסי הסיבוב.

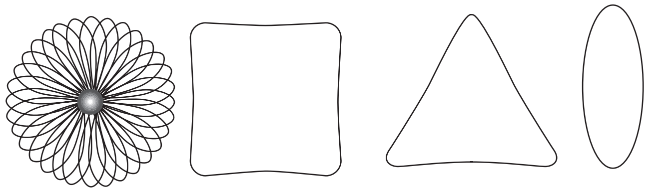
מה עוד ניתן לעשות עם התרגיל הזה?

המון. להלן מספר רעיונות:

* משחק ילדים ידוע, הנקרא ספירוגרף (spirograph), מכיל גלגלי שיניים בגדלים שונים היכולים לנוע בתוך גלגל שיניים גדול (ששיניו מופנות כלפי פנים). תרשים 15 מראה את המערכת. בגלגלי השיניים חורים במקומות שונים. מכניסים עט לתוך אחד החורים ומסובבים. העט טווה קו עקום, סגור. צורת הקו נקבעת בהתאם ליחס בין מספרי השיניים בין הגלגלים, ובמיקומו של העט על הגלגל הקטן. תרשים 16 מראה מספר דוגמאות לקווים אלו. נראה מוכר? הנה, מבלי דעת, חקרנו משחק שרבים מהתלמידים מכירים! גילוי זה הביא בכיתתי ל"וואו" גדול.



תרשים 15: תמונה של אביזרי הספירוגרף



תרשים 16: תרשימי ספירוגרף המתאימים לדוגמאות שלנו

* לבנות דגם של המערכת (זה לא מסובך! צריך שני מנועים קטנים הפועלים על סוללות ופוטנציומטר), ולבחון נסיונית את המסלול בערת מערכת V-Scope, למשל. תמיד נקודת ההשקה בין ניסוי לתיאוריה מוצלחת היא רגע של חגיגה. החקירה הנסיונית פותחת גם פתח לשאלות מעניינות נוספות. למשל, מה יקרה אם יחס התדירויות יהיה מספר אי רציונלי?
* לצאת ללונה פארק ולמדוד את המתקן עצמו! (ורצוי, בהזדמנות זו, גם מתקנים אחרים...)
* המערכת הנחקרת במאמר זה היא הבסיס לאסטרונומיה של תַלְמַי. ניתן, בסיום הפעילות, להקים לרגע את תלמי מקברו ולארחו בחלל הכיתה.
* מסלול הירח סביב **השמש** מתאים (בקירוב של תנועה מעגלית של הארץ ושל הירח) למודל שלפנינו. מה צורת מסלול זה?

על הפדגוגיה של התרגיל, ומה למדתי מתלמידי

התרגיל ניתן, כאמור, כחלק ממבחן בית המסכם את לימודי הקינמטיקה. חלקו הראשון של המבחן כלל שתי שאלות שגרתיות (יחסית) בתנועה דו ממדית. שאלות אלו מופיעות בנספח א'.

רמת הביצוע הכללית בשתי שאלות אלו הייתה גבוהה משמעותית מרמת הביצוע בתרגיל החקר נשוא מאמר זה. הנקודות המרכזיות הראויות לתשומת לב היו:

* רוב התלמידים הסתדרו היטב עם סעיפים א', ג', ד', ה', ו'. סעיפים אלו עוסקים בוקטורי המקום וההעתק. סעיף ב', המבקש **לחשב** את וקטורי המקום, גרם לקשיים ניכרים. חלק נכבד מהתלמידים פנה **למדידה** של הרכיבים על הסרטוט, ולא לחישוב של החיבור הוקטורי.
* הסעיפים ז' - ט', שעסקו בוקטורי המהירות הממוצעת, היו סעיפים המבדילים בין התלמידים הטובים יותר לתלמידים הטובים פחות. התלמיד השקדן נתקל בעבר בצורך לחשב את וקטורי המהירות במספר מצומצם של בעיות בספר הלימוד. יכולת החישוב של וקטורי המהירות הייתה, מן הסתם, נחלתם של תלמידים אלו בלבד.

* סעיפים י׳, י״א עסקו בוקטורי התאוצה, והיו קשים מדי. אף תלמיד לא עלה בעצמו על האנלוגיה של המהלך הנדרש לחישוב התאוצות למהלך שהוביל לחישוב וקטורי המהירות. הסוגיה הייתה קשה הן מבחינה איכותית והן מבחינה כמותית. למרות שבכיתתי הושם דגש רב על אנלוגיית המהלכים בקינמטיקה חד ממדית, לא התרחשה העברה למקרה הדו ממדי. מסקנתי שהתלמידים לא הטמיעו את מובנו העמוק של מושג הוקטור, ואת המשמעות הפיזיקלית של אי התלות בין רכיביו. **מניפולציה ברכיבים של וקטור** לא הייתה כלי זמין לחלק גדול מהתלמידים.

שתי מסקנות עולות מהאמור לעיל: תמונת העולם הוקטורית עדיין אינה שלמה, וקיימים קשיים מתמטיים ניכרים במניפולציה של וקטורים. לאור זאת, מציע אני לשקול ברצינות את הוראת החלקים הקינמטיים של תנועת קליעים כבר בשלב זה של לימוד הקינמטיקה. רצף שכזה יעזור להגיע לשליטה טובה יותר במתמטיקה הנדרשת, וחשוב יותר, להטמיע את מושג הוקטור ואי התלות בין רכיביו. אפשרות נוספת היא, למי שזמנו מאפשר, להעביר בכיתה תרגיל מסכם מעין זה שלפנינו.

מעניינת במיוחד התייחסותם של התלמידים לסעיף י״ד. רובם הגדול העריכו את התרגיל כקשה (אמת דיברו), כארוך (מן הסתם), **כמעניין ומאתגר**. חלק ניכר מהתלמידים אף העדיף להמשיך במתכונת בחינה שכזו, למרות היותה תובענית. אינני בטוח אם אכן ראוי לעשות זאת בכל כיתה, אך בוודאי שממליץ אני בכל פה לערוך פעילות שכזו בשלב כלשהו של הלימוד. חדוות הגילוי, וההפתעות המזדמנות בדרך, שוות את המאמץ של המורה והתלמיד.

נספח - שתי שאלות ״שגרתיות״ בקינמטיקה דו-ממדית

שאלה 1

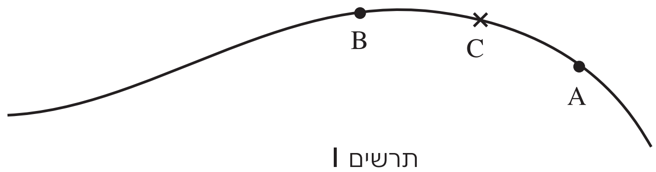
גוף נע במסלול עקום במהירות v קבועה בגודלה, מהנקודה A לנקודה B, כמתואר בתרשים I.

C היא נקודת ביניים על המסלול.

א. סרטט על התרשים, באופן איכותי, את וקטורי המהירות בנקודות A, B.

ב. קבל באופן איכותי את וקטור התאוצה בנקודת הביניים, C. הסבר.

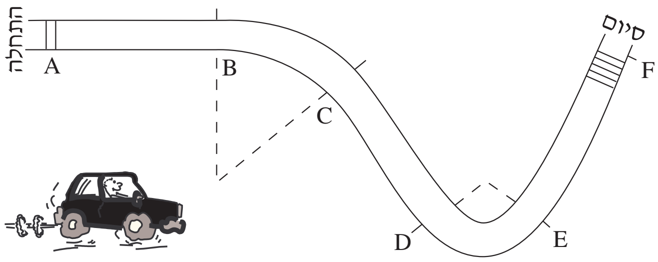
ג. מה יהיה כיוון וקטור התאוצה ב-C אם הגוף ינוע בכיוון ההפוך, מ-B ל-A? הסבר.



תרשים I

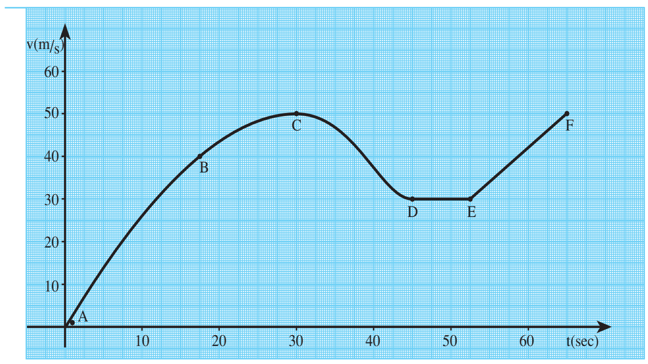
שאלה 2

בתרשים IIא׳ מצויר מסלול מירוץ של מכוניות. המסלול מורכב משלושה קטעים ישרים (AB, CD, EF) ושני קטעים מעגליים (BC, DE).



תרשים IIא

בתרשים IIב׳ מוצג גרף המתאר את **גודל המהירות** של המכונית המנצחת במירוץ, כתלות בזמן.



תרשים IIב

א. באיזה מהקטעים לוחץ הנהג על דוושת הגז? על דוושת הבלמים?

ב. באילו קטעים תאוצת המכונית משיקית בלבד? באילו רדיאלית בלבד? באילו קטעים לתאוצת המכונית יש גם רכיב משיקי וגם רכיב רדיאלי? נמק את תשובותייך.

ג. סרטט על תרשים המסלול (תרשים IIא׳), באופן מקורב, את וקטורי המהירות ואת וקטורי התאוצה באמצע כל קטע. הקפד שהסרטוט ידגיש את ההבדלים (אם ישנם) בגדלים ובכיוונים של הוקטורים השונים.

ד. מהו אורך קטע המסלול EF?

ה. חשב את שיפוע גרף המהירות בזמן $t = 25\ s$. מה המשמעות הפיזיקלית של השיפוע?

תהודה