

ניתוח עקבות

פיתוח הפעילות¹: זאב קרקובר, המכון למצוינות בהוראה, המרכז הישראלי למצוינות בחינוך

מטרות היחידה

יחידת לימוד זו היא חלק מתכנית הלימודים בתחום "תנועה". היחידה עוסקת בניתוח תרשים עקבות שסומנו במרווחי זמן קבועים, במיוחד כאשר הם הושגו באמצעות סימון נקודות על סרט נייר (באמצעות ההתקן שמקובל לכוונתו "רשם זמן").

מיומנויות: עריכת ניסוי, זיהוי איכותי של מהלך התנועה, מדידת מרחקים, יצירת טבלאות, בניית גרפים, מעבר בין ייצוגים, יכולת לזהות סוגים שונים של מהירות (קצובה, מואצת, מואטת).

מבנה היחידה

1. הצגת מכשיר המדידה, הסבר פעולתו ודרכי הפענוח
2. הרצת סרטי נייר במערכות שונות
3. השוואה איכותית בין המערכות השונות והסקת מסקנות
4. מדידת מרחקים ובניית טבלה
5. יצירת גרפים
6. השוואה בין הגרפים שהתקבלו מן המערכות השונות והסקת מסקנות

לוח זמנים אפשרי

יחידה זו נמשכת שיעור כפול. אפשר להותיר השלמות לשיעורי בית ודיון מסכם קצר בתחילת המפגש הבא.

הרקע של התלמידים

ההנחה היא כי התלמידים כבר למדו את יחידות המרחק, הזמן והמהירות.

ציוד

"רשמי זמן" (לפחות אחד, אך רצוי ארבעה), ספקי מתח, תילי חיבור וכליבה, סרטי נייר מתאימים, סלוטייפ, סרגלים, מישור משופע, מסילה עם עגלה ומשקולת, מחשב מורה, מקרן.

¹ שותפים חשובים למעשה מוזכרים בעמוד הבא.

שותפים לעשייה²

קראו והעירו:

ד"ר רחל קנול, מדריכה ארצית במו"ט, המינהל למדע וטכנולוגיה
מיכאל סבין, הפיקוח על הוראת הפיזיקה
ד"ר אבי פולג, ראש המכון למצוינות בהוראה, המרכז הישראלי למצוינות בחינוך

תרמו מניסיונם:

משתתפי השתלמות העתודה באשדוד

התלמיד כבלש

חקירה מדעית דומה לחקירה בלשית. אנו מנסים להתחקות אחרי הטבע, שמסתיר בפנינו את סודותיו. הטבע מציג בפנינו חזות חיצונית תמימה, אך חשיפת דרכי פעולתו מחייבת חקירה בעלת אופי בלשי. כאשר התלמיד לומד בדרך של חקר, הוא חש כבלש שמצליח בכישורו לפענח את המוצפן. זה מאתגר. זה מספק.

חקירת עקבות היא פעילות מן הסוג הזה. אנו רואים את הגוף הנופל, אך קשה לעקוב אחריו. הכול מתנהל מהר מדי. העקבות הן תיעוד שאפשר להשתמש בו בזמן מאוחר יותר, כאשר עתותינו בידינו.

כדאי לשים לב שהדימוי של עקבות שונה ממה שקורה בחקירה המשטרית. שם העקבות הן כול מה שיש לנו, כיוון שלא צפינו באירוע. כאשר אנו עוקבים אחרי עגלה שנעה על מסילה, אנו רואים את האירוע. הבעיה שלנו היא שאיננו מספיקים לתעד, ולכן אנו נזקקים לעקבות. בעיה אחרת היא שאנו רואים במציאות הרבה דברים שאינם מועילים לחקירת התנועה ואפילו מסיחים את הדעת. המציאות מורכבת מאוד ומטעה מאוד באינסוף פרטיה. מטרתו של הניסוי המתוכנן היא לסלק גורמים משניים, לבדד משתנים ולהותיר אותנו רק עם המידע שרלוונטי למה שאנו חוקרים. זהו תהליך של הפשטה שאופייני למחקר בפיזיקה.

דווקא ההפשטה עלולה להיות קשה לחלק מן התלמידים בתחילת הדרך. המערכת הניסויית נראית סטריילית ובלתי רלוונטית למציאות. היא עלולה להיות מנוכרת לתלמיד. האתגר הוא להביא את התלמיד, בהדרגה, להעריך את ההפשטה ככלי רב ערך בפענוח המציאות. ייתכן שבתחילת הדרך המופשט יוגנב בחסותם של רכיבים "מגניבים". בסופו של דבר, במהלך רב שנותי, המופשט יהיה גם "מגניב".

² כתיבת יחידת לימוד זו החזירה אותי באחת כרבע מאה אחורה, עת עסקתי בכתיבת יחידה דומה באוניברסיטה העברית עם עמיתי המנוח ראובן ששון, שייצג קלאסיקה של הוראת פיזיקה במיטבה. יהי זכרו ברוך.

ניתוח עקבות

מדידה, ניתוח, פענוח



עקבות אינן רק שרידי תנועה. מדובר כאן בסוג של ייצוג תנועה. השימוש ב-"Ticker timer" חביב מאוד על מורי פיזיקה ותיקים. הוא מזכיר להם את ימי נעוריהם, כאשר מתקן זה הציג את חזית הטכנולוגיה. הם מאמינים כי המתקן הזה אינו "קופסה שחורה" שגונבת את ההצגה מן המדידה. עדיין נותר לתלמיד לעשות שימוש נכון בסרגל. עדיין נותר למורה ללמד את התלמיד הרבה מתוך דיון בעקבות.

רקע למורה

שביל קליפות התפוזים

אדם ההולך בדרך, עשוי להותיר עקבות. הוא יכול להשאיר אחריו קליפות תפוזים, כפי שתיאר זאת נחום גוטמן בספרו "שביל קליפות התפוזים". הקליפות שנותרות מאחור הן תיעוד של מסלול התנועה. תיעוד זה אינו כולל מידע על הזמן. אפשר להכניס את ממד הזמן. אם מכונית שנוסעת משחררת בפרקי זמן קצובים טיפות של צבע, נקבל סדרה של כתמי צבע על הכביש, שמתעדים את מקום המכונית במרווחי זמן קבועים. (מעניין להזכיר כי על עקרון זה מבוססות מכוונות מודרניות לסימון קווי הפרדה מקוטעים על כבישים). אם יתברר, לדוגמה, כי הכתמים מתרווחים והולכים, נדע כי המהירות גדלה. נתבונן בסדרת כתמי הצבע על הכביש שלפנינו:



אם ידוע לנו כי המכונית נעה משמאל לימין, נוכל לומר כי המהירות הייתה במגמת גידול, אחר כך הייתה קבועה ולקראת ההגעה לקצה הימני של המסלול המסומן המהירות ירדה בקצב מהיר. "כביש כתמי הצבע" נותן יותר מידע מ"שביל קליפות התפוזים". אם נדע מה קצב שחרור טיפות הצבע, ונוכל למדוד את המרחקים בין הנקודות, יהיה לנו תיעוד כמותי של התנועה ונוכל לחשב מהירויות.

אין הכרח להחזיק את מכל הצבע בתוך הגוף הנע. החלופה האפשרית היא שמכל צבע ימצא במקום קבוע, בעוד הגוף הנע (בקו ישר) יגרור אחריו סרט. טיפות הצבע יפגשו כל פעם נקודה אחרת על הסרט וכך יתקבל תיעוד של נקודות על גבי הסרט הנע. תיעוד זהה לתיעוד התנועה.



על עקרון מדידה זה מבוסס מכשיר ה-"Ticker timer" (שמוכר בארץ כ"רשם זמן"). מצמידים סרט נייר לחלקו האחורי של הגוף הנע. הסרט עובר מבעד לאתר קבוע שבו מסומנות עליו נקודות.

מכשיר פשוט או קופסה שחורה?

מורים מחשיבים את ההתקן הזה מפני שהוא מתעד, אך מותיר לתלמיד את מדידת המרחקים על גבי הסרט. זה מאפשר לתלמידים לחוות את המדידה במובנה הראשוני, כך שהדברים ייקלטו היטב בתודעתו. זה נראה עדיף, בשלב הזה, על שימוש בקופסאות קסם "שחורות", שאופן פעולתן אינו שקוף. עם זאת, אף שמדידת המרחק נותרת בפשטותה, ההתקן הוא "קופסה שחורה" בכל הנוגע למדידת הזמן, המבוססת על קוצב זמן אלקטרומגנטי, שאופן פעולתו נסתר לגמרי מן הלומד המתחיל. אמנם, מורים מסבירים לתלמידיהם כי המכשיר מסמן בקצב קבוע של 50 פעם בשנייה מפני שזוהי תדירות הרשת, אך מדובר בהסבר של הבלתי מובן באמצעות הבלתי מובן לחלוטין. אנו מסוגלים לערוך מדידות ראשוניות של מרחק, אך קשה מאוד לבצע מדידות ראשוניות של מרווחי זמן קצרים. השעונים המתאימים אינם מוסברים בשלב זה.

עמודים אלה הם הקדמה למורה. הם כוללים רקע נרחב. לא הכל אמור להיכלל בכיתה. בעמוד 9 אפשר למצוא את משימת החובה (גם לצורך משימה זו הרקע למורה אמור להיות רלוונטי).

האם מכשיר המדידה משפיע על המדידה?

כדי למדוד יש להימצא באינטראקציה עם הנמדד. זה משפיע, במידה זו או אחרת, על תוצאות המדידה. כדי לצמצם את הבעיה, אנו משתדלים להשתמש בדרכי מדידה כאלה שהשפעת מכשיר המדידה בהן היא זניחה (כלומר: נמצאת מתחת לסף הדיוק שאנו מבקשים). כאשר אנו מודדים מרחק באמצעות סרגל, עלינו לזכור במערכת. לשם כך נדרשת הארה. האור נמצא באינטראקציה עם הנמדד, אך השפעתו זניחה. סרט הנייר, שאותו אנו מוסיפים לגוף הנמדד, מתחכך במערכת המסמנת. החיכוך הזה משפיע על המדידה. הנה דוגמה קלאסית. מי שמבקש לברר האם גופים כבדים נופלים מהר יותר מגופים קלים באמצעות ההתקן, ימצא עצמו בוחן נפילה של גופים בעלי מסות שונות. הוא יבחן למשל גופים בעלי מסות של 10 גרם, 20 גרם וכן הלאה עד 200 גרם. הוא יגלה שהקלים נופלים בזמן ממושך יותר מן הכבדים. זה נמצא בניגוד מוחלט לטענתו של גלילאו, לאתוס המדעי, למה שאנו מלמדים בכיתה ולמה שמתקבל מניתוח סרטי וידאו של נפילה חופשית. מתברר כי החיכוך משפיע באופן שונה על תנועת גופים שונים, והוא זה שיוצר את ההבדלים. זה עלול ממש להטעות. יש להיות מודעים לדבר. אין טעם להסתירו בהנחה שהתלמידים לא יבחינו בו. יש חשש חמור שהם יבחינו ויסיקו מסקנות מביכות על טיבו של הניסוי המדעי. מוטב להפוך מקרים כאלה לשיח על מורכבות המעשה המדעי והדרכים להתמודד עמה.

בחינה מוקדמת של סרטי נייר – מה השתבש בדרך?

במקרים רבים אנו רואים את המורה בוחן את סרט הנייר בחינה מוקדמת, לפני שהוא מאפשר לתלמידים להיכנס לניתוח המדוקדק. זה נעשה במטרה לזהות פגמים שמדוקרים לעין ולחסוך לתלמידים מפח נפש. התהליך הטקסי הזה מזכיר את הסיטואציה בבית החולים שבה ראש המחלקה מעיף מבט בחולה ויודע לקבוע, בחושי המקצועיים המחוודים, את מצבו של החולה. זה מחזק את מעמדו של המורה כמומחה. במקרה כזה אין להתפתות ולהשאיר את הנימוקים נסתרים מן התלמיד. המורה אמור לשתף את התלמיד באבחנה המוקדמת הזאת. עליו לשאול אותו אם הוא מזהה בעיות בסרט ולבחון עמו אם נימוקיו תקפים. עליו להסביר לתלמיד את שיקוליו. זוהי למידה של שוליה במיטבה.

מדוע דווקא בניסוי זה נעשה הטקס המוקדם? זה מפני שהמכשיר מועד לתקלות כאלה מדי פעם. הזכרנו קודם את החיכוך המוסף במערכת המודדת. יש לדעת שהחיכוך הזה אינו משתקף בהכרח בחוסר סדירות בנקודות, שאפשר לאבחנה בבחינה המוקדמת. לעתים החיכוך הזה משנה את מערך הנקודות ממערך סדיר אחד למערך סדיר אחר. במקרה כזה, יש חשש שהבחינה המוקדמת לא תועיל. עם זאת, חיכוך בחלקים מסוימים של המסלול עלול לשנות את אופי התנועה. מהמורות כמעט בלתי נראות במסילה עלולות להשפיע על תנועת העגלה. סרט נייר לא מיושר או בלתי סדיר עשוי לסייע לנו לזהות זאת.

דוגמה מובהקת לאי סדירות היא התחושה הברורה שחסרה בסרט נקודה. קל לזהות זאת. כאן עולה השאלה אם אנו אכן משוכנעים שהדבר בלתי סביר. על כך יש לדבר עם התלמידים, כאשר הדבר קורה.

דוגמה מובהקת אחרת היא כאשר אנו מבקשים לחקור מערכת שהתאוצה אמורה להיות בה קבועה, כפי שאנו יודעים מניסוינו ומניסיון הדורות. זה אמור להתבטא בסרט שבו הנקודות הולכות ומתרחקות זו מזו בקצב קבוע. אם מתקבלות חריגות מן הכלל הזה, אנו מודאגים. אם אנו מזהים כי בתוך סדרת הנקודות, שהמרחקים ביניהן גדלים בקצב קבוע, יש אזור שבו המרחק אינו גדל, ואולי אפילו קטן, אנו מבינים שאין מדובר במערכת שאותה התכוונו לחקור, גם אם היא נראית כך ממבט ראשון. המורה התכוון להביא את התלמידים לחקור מערכת מסוימת, והוא מגלה שהמערכת שהתקבלה היא אחרת. האם עליו לעמוד בעקרונותיו ולומר כי הניסוי מכריע, גם אם הוא נוגד את הציפיות, או שהוא יכול למצוא סיבות לפסול את הסרט הסורר? זוהי בעיה מן המעלה הראשונה בחינוך מדעי. אם נפעל כאן בדרך שגויה, נעלה את התלמיד על מסלול השרלטנות (או של זלזול במערכת החינוך). במקרה כזה יש לנמק היטב כל צעד, לערוך ניסויי בקרה, לערוך השוואה עם סרטי נייר אחרים באותה מערכת ובמערכות מקבילות (שהיו אמורות להיות זהות) ולנמק פסילה אפשרית של סרט בצורה משכנעת.

אם משתמשים בניירות העתקה ("קופי") יש להסביר לתלמידים מהו "נייר קופי", וכיצד נהגו להשתמש בו רק לפני עשרות שנים בודדות. נייר קופי משומש מידי עלול לגרום לאי רישומן של נקודות אחדות.

אלה מערכות אפשר לחקור עם סרטי נייר?

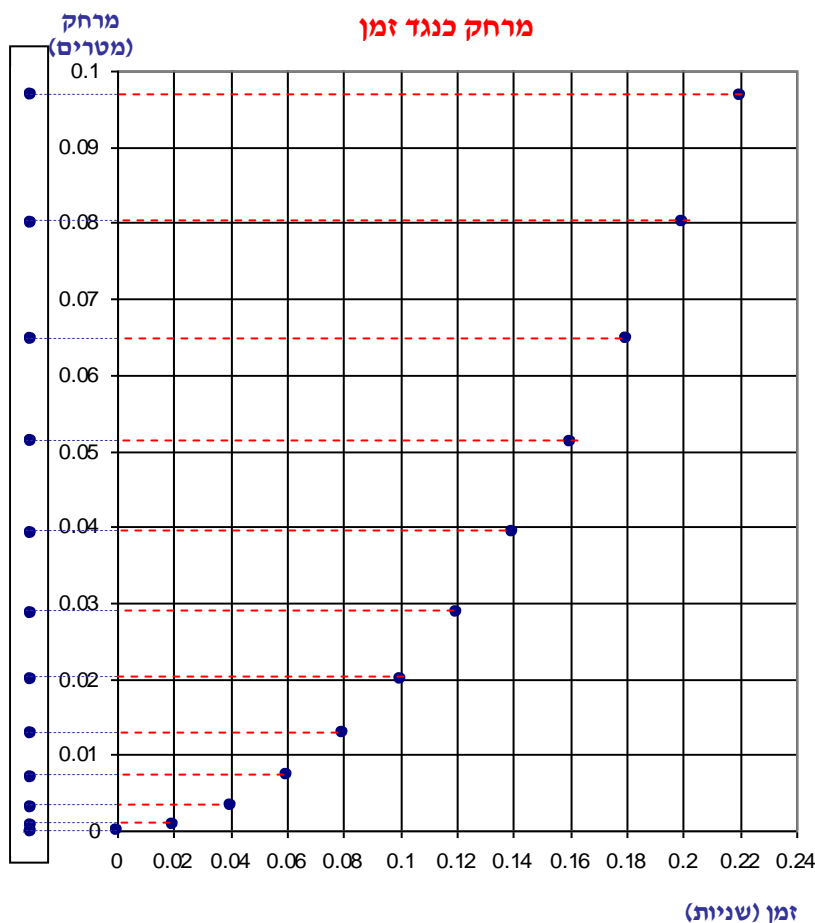
התופעה הנחקרת ביותר באמצעות סרטי נייר היא הנפילה החופשית. אם המשקולת אינה קטנה מדי, מתקבלות סדרות סדירות של נקודות. בכל המקרים שבהם התאוצה קבועה אפשר להגיע להערכה כמותית טובה של התאוצה.

סרט נייר מיועד למעקב אחרי תנועה בקו ישר, אך לא כל תנועה כזאת מתאימה לו. מקרה מובהק שבו לא נשתמש בסרט נייר, או ב"כביש כתמי הצבע", הוא כאשר הגוף נע הלך ושוב. במקרה כזה סדר הנקודות על הנייר (או על הכביש) אינו מייצג את סדר הזמנים. משאיבדנו זאת, לא נוכל להסיק מסקנות אינטיליגנטיות.

מה באשר להאטה? על "כביש כתמי הצבע" הדבר מתבטא בכך שהמרווח בין הנקודות הולך ומצטמצם. הדברים מורכבים יותר כאשר מדובר בסרט נייר. נתבונן לדוגמה במקרה שבו עגלה נעה על מסילה וסרט נייר אופקי קשור אליה ונע בעקבותיה. אם העגלה תואט, ייתכן מאוד שסרט הנייר לא יישאר מתוח. במקרה כזה, הסימון על סרט הנייר אינו מייצג את תנועת העגלה. **מעתה: סרטי נייר הם כלי מתאים לתנועה מואצת (להבדיל מתנועה מואטת) ובמיוחד כאשר התאוצה קבועה.** מד הטווח העל-קולי (סוניק ריינג'ר) נותן מענה מעולה לבעיה זו.

מעבר בין ייצוגים

סרטי נייר מזמנים שימוש במעבר בין ייצוגים ותרגולו. תרשים העקבות מתורגם לטבלה. מן הטבלה אפשר לקבל גרף. למעשה, אפשר לתרגם את תרשים העקבות לגרף מקום-זמן ללא תיווך של הטבלה, כפי שמראה האיור הבא:



יחידת המרחק בגרף זה היא היחידה התקנית – המטר. עבור תלמידי כיתה ז אפשר לחרוג מן התקן ולהשתמש בסנטימטר המוכר.

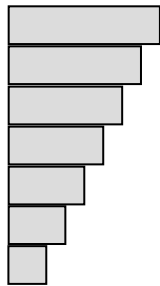
עמודים אלה הם הקדמה למורה. הם כוללים רקע נרחב. לא הכל אמור להיכלל בכיתה. בעמוד 9 אפשר למצוא את משימת החובה (גם לצורך משימה זו הרקע למורה אמור להיות רלוונטי).

ייצוג העקבות בתרשים "פיזור" הוא פריסה של תרשים העקבות על ציר הזמן. תרשים העקבות הוא היטל של תרשים הפיזור על ציר המקום. באופן עקרוני, מתברר כי אנו מסוגלים לעבור בין ייצוגים גם ללא שימוש בסרגל מכיל עבור כל נקודה ונקודה.

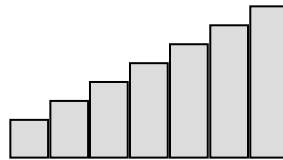
עם זאת, השימוש בטבלה מקובל מאוד, בעיקר מפני שאפשר לחשב ממנה מהירויות ממוצעות ומשם לקבל הערכות לתאוצות. דווקא המסלול הזה פחות מעניין אותנו בשלב זה. איננו מעוניינים להגיע להגדרת התאוצה וממילא גם לא לחישובי תאוצה. כפי שראינו, זה אפשרי, אך ייעשה בכיתה ח. עם זאת, אפשר לחשב מהירויות ממוצעות במרווחי זמן שונים על פני סרט הנייר, וללמוד משהו על מגמות. נדבר על שינויים במהירות, אך לא ברמה כמותית.

אף שהדבר אינו הכרחי, אנו מעוניינים שהתלמיד יתנסה במעברים מגוונים בין ייצוגים. לכן נבקש ממנו לתרגם את תרשים העקבות לטבלה ואת הטבלה לתיאור גרפי.

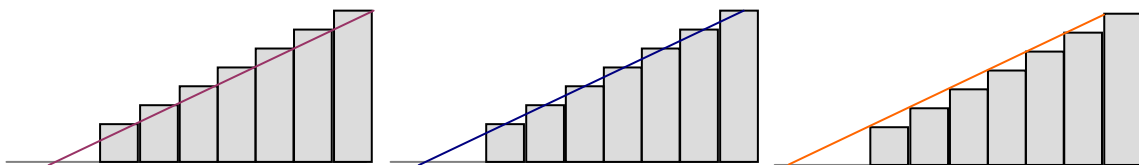
סרט הנייר על שולחן המנתחים



הנה דרך אפשרית נוספת להכרה של מאפייני התנועה מתוך סרט נייר גם ללא שימוש בסרגל. אנו יכולים לנתח את הסרט במשמעות הפיזית של המונח ניתוח. כאזמל מנתחים ישמשו מספריים. אם גוזרים את הסרט בכל מקום שבו סומנה נקודה מתקבלת סדרת מקטעים של הסרט. יש שמדביקים אותה באופן אופקי, זו מעל זו. בדוגמה שלפנינו רואים כי יש התארכות קבועה ממוקטע למקטע. זה מעיד על שינוי קבוע במהירות, כאשר יש שינוי קבוע בזמן. כדי לראות את הדברים בדרך גרפית מקובלת נציג את סדרת המקטעים כך:

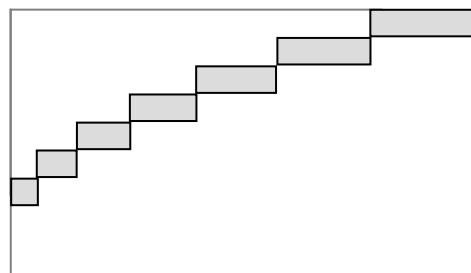
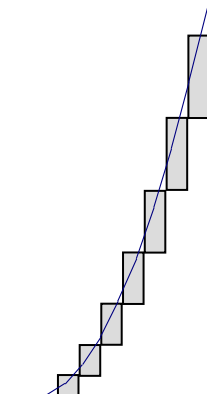


כעת ציר הזמן אופקי. מתבקש להוסיף קו, באחת הדרכים הבאות:



הגרף הזה, המציג את גודל המקטע כנגד מספר המקטע, משקף בעקיפין גם את המהירות הממוצעת בכל מקטע כפונקציה של הזמן (של תחילת מקטע, סוף מקטע, או זמן ביניים). במקרה של תאוצה קבועה הגרף הזה משקף את המהירות הרגעית כפונקציה של הזמן. סדרת הטענות הכלולה בפסקה זו אינה פשוטה כלל. יש כאן חשיבה מסדר גבוה מדי לתלמידים בחטיבת הביניים (בייחוד בתחילתה). ייצוג זה מכוון אותנו גם לרעיון שהעתק הכולל מתקבל כ"שטח" שנמצא מתחת לגרף מהירות-זמן. זוהי הצגה שיש בה חן רב, וגם נותנת הצצה אינטואיטיבית, אך לא נוכל לעשות מעבר לזה. בגיל גבוה יותר נוכל לעשות הרבה יותר עם הייצוג הזה. בשלב זה מגמה של גידול קבוע באורך המקטעים תלמד אותנו כי המהירות משתנה בקצב קבוע (במובן האינטואיטיבי של המושג). בעצם מדובר כאן בתצוגות עמודות יותר מאשר בגרף קווי.

אפשר גם להציג את מקטעי הנייר כך שיציגו סדרה של מרחקים מנקודת המוצא:



אפשר לצרף גרף מקום-זמן (איור משמאל):

איזו משתני ההצגות עדיפה? בעניין זה נחלקו מורותינו המעולות שבאשדוד. למי יש העוז והסמכות להכריע ביניהן?

עמודים אלה הם הקדמה למורה. הם כוללים רקע נרחב. לא הכל אמור להיכלל בכיתה. בעמוד 9 אפשר למצוא את משימת החובה (גם לצורך משימה זו הרקע למורה אמור להיות רלוונטי).

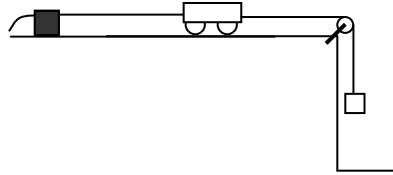
נפילה מוחלשת ועוד

הניסוי הקלאסי הוא, כמובן, נפילה חופשית. הניסוי אמור לשקף את קביעות התאוצה ואת אי התלות של התנועה במסה של הגוף הנופל. כבר הערנו שחיכוך עלול לקלקל את השמחה. זה מתרחש כאשר הגופים קלים מדי (עשרות גרמים). הדברים תלויים גם במכשיר (יש מגוון גדול בשוק). ניסוי כזה נועד להתמודד עם הזמן הקצר שבו מתרחשת הנפילה (בדרך-כלל פחות משנייה). כיצד התגבר על כך גלילאו, שלא עמדה לרשותו הרשת של חברת החשמל? גלילאו ערך ניסויים שבהם הנפילה הוחלשה על ידי גורמים שונים. דוגמה חשובה לכך היא המטוטלת, שאינה רלוונטית לענייננו מפני שאינה נעה על קו ישר. הדוגמה המעניינת של גלילאו היא התנועה על המישור המשופע, שאת מדידתה מתאר גלילאו בפרוט. הוא השתמש בזרימת מים למדידת זמן. אנו נשתמש ברישום עקבות.

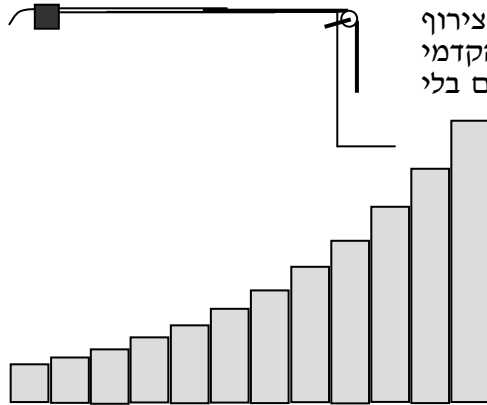
נתבונן בעגלה שנעה במורד מישור משופע, כאשר סרט הנייר נע בעקבותיה. הסימון על סרט הנייר נעשה בראש המישור המשופע (רשם הזמן מתואר באיור כקופסה שחורה). התנועה ממושכת יותר מזו שבנפילה חופשית. המהירות גדלה בקצב מתון יותר. התלמידים יוכלו לראות זאת בעיניהם גם ללא מדידה בסרגל. כמו בנפילה חופשית, מתברר כי זמן הנפילה אינה תלוי במסת העגלה.



מערכת רלוונטית אחרת מורכבת מעגלה שנמשכת על ידי חוט שעובר מעל גלגל כאשר לקצהו השני קשורה משקולת. המשקולת, שמושכת אחריה את העגלה, אינה נופלת חופשית, אלא בתנועה מתונה יותר. עיון בסרט מראה כי הוא דומה לזה שמתקבל במישור המשופע. הפעם התאוצה תלויה במסה (נכון יותר: ביחס שבין מסת המשקולת למסת העגלה).



במערכת מעניינת נוספת מחליפים את הצירוף "עגלה+חוט+משקולת" בשרשרת (או כבל) שחלקה הקדמי תלוי וחלקה האחורי נע על המשטח האופקי (אפשר גם בלי הגלגל). הפעם חלק אחד של השרשרת ממלא את תפקיד המשקולת. חלק זה גדל והולך עם התנועה. כתוצאה מכך מתקבלת תנועה בעלת אופי אחר. הפעם האורכים של המקטעים העוקבים אינם גדלים בתוספות קבועות, כסדרה חשבונית, אלא דווקא כסדרה הנדסית (דבר המעיד על שהמהירות אינה גדלה בקצב קבוע, אלא בקצב שהולך וגדל). כל זה, כמובן, בהנחה שהניסוי נקי מגורמים משניים. המציאות תהיה פחות נקייה. בניסוי שלפנינו אפשר להתחיל את הניסוי כאשר חצי החוט נמצא במצב אנכי. ניסוי זה ממחיש שלא כל התנועות הן בתאוצה קבועה. הוא יהיה הניסוי האחרון, ויעשו אותו בעיקר תלמידים שהשלימו מוקדם את המדידות האחרות.



מעבר לכל אלה, יש עניין לבחון את תנועת היד שלנו כאשר היא עצמה מושכת את הסרט. האם היד נעה במהירות קבועה? האם אנו מסוגלים להניע אותה באופן מבוקר במהירות קבועה? יש היגיון לפתוח את ההתנסות במדידת עקבות בדרך זו.

בכל אלה יעסקו התלמידים בפעילות החקר שתוצע בהמשך.

מאימתי מתחילים למדוד את הזמן?

כאשר מתעדים את התנועה בטבלה או בגרף יש צורך להגדיר מתי מתחילה מדידת הזמן. לתלמיד הדברים ברורים. מדידת הזמן מתחילה ברגע שבו מתחילה התנועה. בתחילת הניסוי המערכת מוחזקת במנוחה. כאשר משחררים את המערכת מתחילה התנועה. זהו, באופן טבעי, הרגע $t=0$. מתברר כי בניסויים שלפנינו יש קושי דווקא בזיהוי רגע השחרור. "רשם הזמן" מופעל מעט לפני שחרור הגוף. כתוצאה מכך יש סימונים שמייצגים רגעים שקודמים לרגע השחרור. עקרונית, סימונים אלה אמורים להיות חופפים. מעשית, הם אינם ממש חופפים, מפני שהיד שלנו, שמחזיקה את סרט הנייר במצב מתוח, אינה יציבה לחלוטין. כתוצאה מכך עלול להתקבל מקבץ של נקודות, שקשה לזהות בו את נקודת התחלת התנועה. יתר על כן, לעתים גם לאחר השחרור הנקודות סמוכות מאוד זו לזו, כיוון שטרם הגענו למהירות מספיק גדולה. נקודות קרובות מדי אינן מאפשרות רזולוציה מספקת במדידת המרחק (במדידה זו מדידת המרחק מדויקת עד כמילימטר). במקרים כאלה ממליצים לתלמיד להתחיל למדוד מנקודה שבה הנקודות מובחנות

עמודים אלה הם הקדמה למורה. הם כוללים רקע נרחב. לא הכל אמור להיכלל בכיתה. בעמוד 9 אפשר למצוא את משימת החובה (גם לצורך משימה זו הרעק למורה אמור להיות רלוונטי).

היטב זו מזו והמרחק ביניהן ברור. מרחק מזערי של סנטימטר (ואפילו יותר) הוא סביר. כתוצאה מכך, נקודת הייחוס למדידה אינה נקודת השחרור וגם רגע הייחוס ($t=0$) אינו רגע השחרור.

הרעיון שהרגע $t = 0$ אינו רגע השחרור אינו קל לתלמיד. הוא נראה לו מלאכותי. מרעיון כזה משתמע כי השחרור נעשה לפני הרגע $t = 0$. במילים אחרות: השחרור נעשה בזמן שלילי! יש תלמידים שתופשים זאת כאבסורד. זה עלול לתרום לפרידה נפשית מן הפיזיקה, שנתפשת כמלאכותית וכמופשטת. פיזיקאים מנוסים מורגלים בדיבור כזה. מבחינתם לכל רגע ייחוס יש רגע שקדם לו (אלא אם כן רגע הייחוס הוא בריאת העולם או המפץ הגדול, אך זה יהיה מסורבל למדי). יש לפעול כאן ברגישות רבה. התלמידים יתבקשו לבחור את נקודת הייחוס על הסרט, למספר את הנקודות שבעקבותיה בסדר עולה, ולדון רק במה שקורה מכאן ואילך. זהו בעבורנו רגע תחילת התייעוד, גם אם התנועה החלה קודם לכן. זוהי תוצאה בלתי נמנעת משיטת המדידה. עם התייחסות מתאימה הדברים מתקבלים.

מה אפשר לעשות בכיתה

חקר עקבות מאפשר פעילויות רבות שמחזקות את הבנת התנועה ומושגיה, את הייצוג באמצעות עקבות ומעברים בין ייצוגים. אין טעם לעשות הכל בכיתה ז'. הנה "כללי אצבע" של "עשה" ו"לא תעשה". בעמוד הבא תוצג ההמלצה לפעילות המינימלית בכיתה.

מה אפשר לעשות בכיתה (בשלב זה)

- להריץ ניסויים שונים עם סרטי נייר
- לספר את סיפור התנועה על סמך התבוננות בסרט בלבד (ללא מדידה)
- לסרוק סרטים, או קטעים, ולהציג באמצעות מקרן
- לזהות ולנתח אזורים חשודים בסרט הנייר (נקודות חסרות, נקודות כפולות...)
- לערוך השוואה איכותית בין סרטים מניסויים שונים
- למדוד מרחקים ולהכין טבלת מקום-זמן
- לבנות גרף מקום-זמן על סמך הטבלה
- לערוך מדידות של מרחקים בין נקודות סמוכות
- לחשב מהירויות במקטעים חלקיים
- לבחון אם המהירויות משתנות בקצב קבוע
- אפשר גם לגזור (במספריים) סרטי נייר מסומנים ולבנות ייצוגים מגזרי הסרט

מה לא כדאי לעשות בשלב זה (אך ייעשה בהמשך הדרך)

- לעסוק במושג התאוצה – הגדרתו, חישובו, מדידתו
- לחשב שיפועים ממוצעים
- לעסוק במשיק ובשיפועו
- לייצג באמצעות פונקציה מתמטית
- לבנות קווי מגמה ממוחשבים

עמודים אלה הם הקדמה למורה. הם כוללים רקע נרחב. לא הכל אמור להיכלל בכיתה. בעמוד 9 אפשר למצוא את משימת החובה (גם לצורך משימה זו "הרקע למורה" אמור להיות רלוונטי).

החקר המוצע

בעמודים הקודמים עסקנו ברקע למוה. נציג עתה את המשימה הבסיסית שהתלמידים אמורים לעשות. הצגת המערכת, ביצוע המשימה, הפקת המסקנות והדיון המסכם אמורים להשתרע על פני שני מפגשים כפולים. אם מתברר כי יש זמן לפעילויות נוספות – אפשר להרחיב.

לב החקר הוא הפקת סרטי נייר וניתוחם. המשימה תיעשה בצוותים. חלק מן המערכות יחקרו על ידי חלק מן הצוותים, אך בדיון המסכם יכללו כל המערכות. הצוותים יציגו זה לזה את תוצאות החקר שלהם וייערך דיון.

לקראת משימה זו כדאי להכין תחנות עבודה שבכל אחת מהן מערכת ניסויית מתאימה. אם אין "רשמי זמן" במעבדה כדאי להביאם במיוחד לשיעור זה. הרצת סרט נמשכת שניות ספורות ולכן אין צורך בעמדות רבות. כדאי להעמיד עמדות שונות – אחת לכל ניסוי, אך בהעדר ציוד אפשר להשתמש ב"רשם זמן" אחד ולצרפו במהלך השיעור למערכות השונות. הנה מספר מערכות אפשריות, שהוצגו קודם:

- נפילה חופשית
- תנועת עגלה על מישור משופע
- תנועת עגלה שנעה על מישור אופקי כשהיא קשורה למשקולת באמצעות חוט שעובר על גבי גלגל
- תנועת שרשרת שחלקה נמצא על מישור אופקי, וחלקה תלוי אנכית
- משיכה ידנית של סרט נייר

כל צוות יריץ ניסויים בכל העמדות (כל ניסוי נמשך שניות אחדות), יתייחס לכל סרט איכותית וישווה בין סרטים. בהמשך תחולק המשימה בין צוותים. יהיו שינתחו לעומק (סימון, מדידה, טבלה, גרף...) את הנפילה החופשית. אחרים ינתחו את צוותים התנועה על המישור המשופע או את תנועת העגלה עם המשקולת. כל קבוצה תנתח סרטי נייר שהתקבלו ממשיכה ביד. קבוצה שתסיים ראשונה תזכה לנתח את הסרט עם השרשרת. לאחר מכן יתקיים דיון במליאת הכיתה.

כדאי לוודא היטב מראש שהמערכות עובדות כראוי. בהזדמנות זאת כדאי להריץ מראש ניסויים ולהכין סרטי נייר מסומנים למקרה שתקלה תשבש את האפשרות של צוותים מסוימים להפיק סרטים מתאימים.

יש טעם לפתוח את השיעור דווקא בהרצת מידות על סרטי נייר שנמשכים ביד על ידי התלמידים. תלמידים יכולים לנסות למושך "חזק" או "חלש" ולראות כיצד הדבר משפיע על מערך העקבות זה נותן תחושה פיזית של הפיזיקה. לאחר התוודעות ראשונית זו אפשר לגשת לחקר מערכות הניסוי על פי ההנחיות שב"דף החקר".

"דף חקר" נמצא בעמוד הבא.

בעקבות דף החקר יש הערות מפורטות למורה.

דף חקר – פענוח של עקבות תנועה

בחקירה זו תערכו מדידות במספר מערכות שמוצבות בכיתה. בכל המדידות המעקב אחרי התנועה יהיה באמצעות סימון נקודות על סרט נייר שצמוד לגוף הנמדד ונע בעקבותיו. הנקודות יסומנו במרווחי זמן קצובים – חמישים נקודות בשנייה (כלומר: מרווח הזמן בין שני סימונים עוקבים הוא 0.02 שנייה).

- א. הריצו את המדידה הראשונה.
- ב. הניחו את סרט הנייר על השולחן ורשמו מה אתם לומדים (ברמה האיכותית) מהתבוננות על סרט הנייר. רשמו את תשובתכם על דף נפרד.
- ג. הריצו את המדידות האחרות. בסיום כל מדידה רשמו על הסרט באיזו מערכת הוא נוצר וציינו את הצד המייצג את תחילת התנועה.
- ד. חזרו על סעיף ב בעבור כל אחת מן המדידות. רשמו את תשובותיכם בדף הנפרד.
- ה. ערכו השוואה בין הסרטים שהתקבלו במדידות השונות. מה שווה? מה שונה? רשמו את מסקנותיכם בדף.
- ו. עתה גשו לניתוח כמותי של הסרט שהתקבל בניסוי הנפילה החופשית (או המישור המשופע, העגלה עם המשקולת, השרשרת). הצמידו את הסרט לשולחן, באמצעות סלוטייפ, כשהוא ישר.
- ז. בחרו בנקודה מובחנת ברורה בתחילת התנועה וסמנו אותו במספר 1. מספרו בעקבותיה את שאר הנקודות בסדר עולה.
- ח. הכינו טבלה שבה יירשמו המקום והזמן של כל אחת מן הנקודות. תכננו מראש כמה שורות יהיו בטבלה ומלאו מראש את עמודת הזמן.
- ט. מדדו את המרחק של כל נקודה מן הנקודה הראשונה (זו שסומנה כנקודה 1) ורשמו אותו בטבלה.
- י. הכינו מערכת צירים לתיאור גרפי של התוצאות. תכננו מראש את קנה המידה של כל ציר, רשמו כותרות לטבלה ולכל אחד משני הצירים וציינו בה באיזה יחידות נמדדים המרחק והזמן.
- יא. הציבו את הנקודות במקומות המתאימים (תוך שימוש בטבלה).
- יב. מה אפשר ללמוד מן הגרף? רשמו בפירוט.
- יג. מעתה החקר הוא שלכם. חשבו. הציעו רעיונות. חשבו מה שניתן לחשב.

פענוח של עקבות תנועה – הערות למורה

כאורה, פעילות זו סגורה למדי – היא בנויה מסדרת סעיפים מונחים. זה נובע משיקולים של לוחות זמנים. עם זאת, כמעט כל סעיף הוא פתוח באופיו. שנים עשר הסעיפים הראשונים הם הלוח של הפעילות, אך מורים עשויים לשקול לשנות ולהוסיף, בין היתר ברוח הדברים שהועלו בהקדמה למורה. סעיף יג מייצג אפשרות להציע לתלמידים להיות אלה שיציעו משהו נוסף.

כדאי מאוד שבכיתה יעמדו מספר מערכות, כך שאפשר לתת לקבוצות שונות לעבוד במקביל. אמנם הניסוי קצר מאוד, ואפשר לסיים סבב של כל הקבוצות בדקות אחדות. מצד שני, כדאי שהמערכות השונות יוצבו בקביל, כדי שהמורה (או הלבורנט) לא יאלץ לעסוק בשינוי המערכת במהלך השיעור. בדרך זו כל הסרטים יעמדו לרשות כל הצוותים מתחילת השיעור. זה יאפשר לערוך את השלב האיכותי של הניתוח, כולל ההשוואה בין סרטים מניסויים שונים.

א. כדאי מאוד שהתלמידים יריצו את הניסוי בעצמם, בהשגחת המורה. הלחץ להספיק להעביר כמה שיותר צוותים עלול להביא לכך שהדברים ייעשו במהירות רבה. חשוב שהתלמידים יחושו שהם ביצעו את הניסוי, על הדקויות שלו. כדאי שיערך דיון מקדים עם המורה על הסרט – האם הוא נראה מופרך על פניו.

ב. התלמידים יוכלו להצביע על גידול במרווחים בין הנקודות, מה שמעיד על גידול במהירות. האם הגידול הזה קבוע? קשה לומר בוודאות, אך אי אפשר לשלול זאת.

ג. יש חשיבות רבה לסימונים. בלעדיהם נמצא תלמידים חוזרים שוב ושוב על ניסויים שלא נרשם עליהם התיעוד הרלוונטי.

ד. כל סרט אמור להיות נדון בפני עצמו. במשיכה הידנית אפשר לאתגר תלמידים לנסות וליצור תנועה קצובה (מהירות קבועה) ולבחון עד כמה עלה הדבר בידם.

ה. התלמידים יוכלו להשוות את סרט הנפילה החופשית עם הסרטים שבהם יש "נפילה מוחלשת" (ראו בהקדמה למורה). האם יש הבדלים עקרוניים? כמותיים? אם תהיה גם שרשרת, אפשר יהיה לראות הבדל ברור. המשיכה הידנית תהיה בעלת אופי משלה.

ו. הכנה נכונה של הסרט למדידה היא תנאי הכרחי למדידה מדויקת. יש לחלק את ניתוח המערכות השונות בין הצוותים השונים.

ז. יש להכין את התלמידים לבחירת הנקודה המתאימה ולמשמעות היות הנקודה הזאת נקודת האפס של הזמן.

ח. הכנת הטבלה מראש על ידי התלמידים היא אתגר. בשלב זה, אחרי שהם כבר התנסו במילוי טבלה, הגיעו הזמן שיתכננו מראש. תפקיד המורה אינו להכתיב כאן דרך פעולה, אלא לסייע.

מטבע העניינים, עולה השאלה האם להשתמש במחשב. גיליון אלקטרוני (Excel לדוגמה) נפוץ מאוד בבתי הספר. השימוש בו הוא חובה בלימודי הפיזיקה בחטיבה העליונה. האם אין זו הזדמנות טובה להכנסת הגיליון? שיקולים של גודל הכיתה וזמינות המחשבים הביאו אותנו למסקנה שניח לזה, לפי שעה. עם זאת, מי שגודל הכיתה תואם את זמינות המחשבים ועתותיו בידו, יכול להתחיל לשלב גיליון אלקטרוני כבר בשלב זה.

ט. במשימה זו מודדים את המרחק מנקודות הייחוס שנבחרה ולא את המרחק בין נקודות עוקבות. יש להפנות את תשומת הלב של תלמידים שעושים אחרת.

י. ההערה מסעיף י תופסת גם כאן.

יא. אין להתערב בשלב זה בהצבת הנקודות על ידי התלמידים עד לסיימה.

יב. כאן אפשר ליישם את מה שנלמד ביחידת הגרפים.

יג. כאמור, בשלב זה מורים יוכלו להוסיף משימות משלהם, או להותיר לצוותים להעלות הצעות משלהם. כאן אפשר לעסוק בדיאגרמת עמודות של מהירויות – בסרטוט, בגזירה ועוד. יש לערוך דיון מסכם (אפשר בתחילת השיעור הבא).

דוגמאות לשאלות (תרגילי כיתה, משימות בית)

מהו כיוון התנועה?

מכונית יוצאת ממנוחה. מהירותה גדלה בקצב מתון. לאחר זמן המכונית נעה במהירות קבועה, עד לרגע שבו הנהג מבחין במכשול ובולם. המכונית נעצרת בתוך זמן קצר. בכל מהלך הנסיעה נושרות טיפות צבע במרווחי זמן קצובים. טיפות אלה הותירו עקבות של כתמי צבע על הכביש:



איזו מן הקביעות הבאות מתארת היטב את תנועת המכונית.

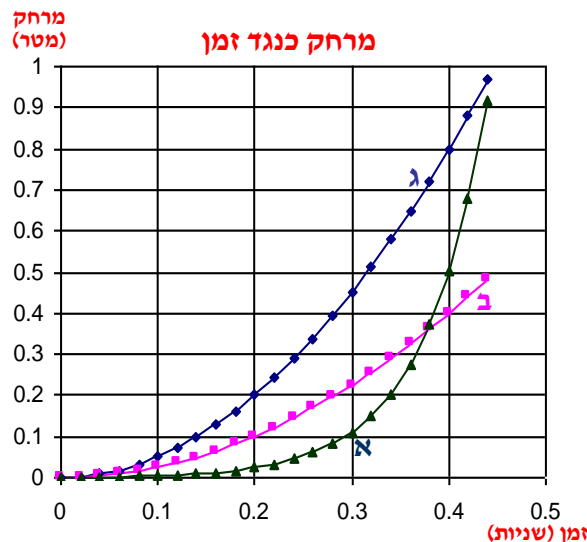
1. ייתכן שהמכונית נעה ימינה כשם שיתכן שהיא נעה שמאלה.
2. המכונית נעה ימינה.
3. המכונית נעה שמאלה.
4. אף אחת מן התשובות אינה נכונה.

התאמת גרפים לסרטים

בשלושה ניסויים התקבלו שלושה סרטים (1, 2, 3). לפנינו הסרטים.



תלמידים הציגו תיאור גרפי של כל אחד מן הסרטים. שלושת הגרפים (א, ב, ג) מוצגים לפנינו.



- א. ערכו התאמה בין הגרפים לסרטים. הסבירו.
- ב. לאיזה גוף יש המהירות הגבוהה ביותר באחד המקטעים שלו (בין שתי נקודות עוקבות)?
- ג. שלושת הניסויים נערכו במקביל. כל הגופים החלו לנוע באותו רגע. ברגע מסוים שניים מן הגופים נמצאו באותו מרחק מנקודת המוצא. זהו את שני הגופים.
- ד. איזה משני הגופים מהיר יותר באותו רגע? כיצד יודעים זאת?
- ה. מהו המרחק בין גוף ג לגוף ב שתי עשיריות השנייה אחרי היציאה לדרך?
- ו. מהו המרחק בין גוף ג לגוף ב- 0.4 שניות אחרי היציאה לדרך?
- ז. איזה גוף עובר את המרחק הקצר ביותר במשך 0.4 השניות הראשונות?

פתרונות

מהו כיוון התנועה?

צפיפות הנקודות גבוהה יותר בצד ימין. זה מתאים לשלב בלימה המהירה. מכאן שהתנועה היא משאל לימין, בהתאמה אם אפשרות 2.

התאמת גרפים לסרטים

- א. בסרט 2 יש נקודות רק בחציו. זה מתאים לגרף ב. בסרט 3 הנקודות צפופות בתחילתו ומרווחות במיוחד בסופו. זה מתאר תהליך שבו בתחילת הדרך ההתקדמות אטית ביותר ובסופו מהירה ביותר. זה מתאים לגרף א. זה מותיר את סרט 1 עם גרף ג.
- ב. הגוף המתועד בסרט 3 ובגרף א מהיר במיוחד בסוף הדרך. המרווח בין הנקודות על הסרט גדול מאוד וכך גם שיפוע הגרף.
- ג. ברגע שבו שני גופים נמצאים באותו מקום, הגרפים נחתכים (מקום זהה בזמן זהה). הגרפים שנחתכים הם א ו-ב.
- סעיף זה (ושלושת הבאים) עוסק בהשוואה בין תנועה של שני גופים. במובן זה מדובר בכיוון ניתוח חדש. יש לשים לב לכך.
- ד. גרף א תלול יותר בנקודת החיתוך ולכן הגוף שאת תנועתו הוא מתאר מהיר יותר.
- ה. גוף ג עבר 0.2 מטרים. גוף ב עבר 0.1 מטרים המרחק ביניהם הוא 0.1 מטרים.
- ו. גוף ג עבר 0.8 מטרים. גוף ב עבר 0.4 מטרים המרחק ביניהם הוא 0.4 מטרים.
- ז. התיאור הגרפי מורה כי ברגע זה גוף ב נמצא מאחורי שני הגופים האחרים.