

תוכן העניינים

פרק 11 סיבוב 395	
11-1	העתקה וסיבוב 396
11-2	משתני הסיבוב 396
11-3	סיבוב בתאוצה זוויתית קבועה 402
11-4	קישור בין משתני העתקה קווית וסיבוב 404
11-5	האנרגיה הקינטית הסיבובית 408
11-6	חישוב ההתמד הסיבובי 409
11-7	מומנט סיבוב 412
11-8	החוק השני של ניוטון לתנועה סיבובית 414
11-9	עבודה ואנרגיה קינטית סיבובית 418
סיכום	פרק 11 421
פרק 12 גלגול, מומנט סיבוב ותנע זוויתי 431	
12-1	על סיבובים מורכבים 432
12-2	שילוב בין העתקה לבין סיבוב פשוט 433
12-3	משתני סיבוב כווקטורים 437
12-4	המכפלה הווקטורית 440
12-5	מומנט הסיבוב כמכפלה וקטורית 442
12-6	החוק השני של ניוטון במתכונתו הסיבובית 444
12-7	תנע סיבובי (או תנע זוויתי) 445
12-8	התנע הסיבובי של מערכת חלקיקים 446
12-9	התנע הסיבובי של גוף קשיח המסתובב סביב ציר קבוע 448
12-10	שימור התנע הסיבובי 450
סיכום	פרק 12 457
פרק 13 שיווי משקל ואלסטיות 465	
13-1	מבוא 466
13-2	שיווי משקל 466
13-3	מרכז הכובד 469
13-4	בעיות שיווי משקל שאינן ניתנות להכרעה 475
13-5	אלסטיות 476
סיכום	פרק 13 483
פרק 14 כבידה 493	
14-1	הגלקסיה שלנו וכוח הכבידה 494
14-2	חוק הכבידה של ניוטון 494
14-3	כבידה וסופרפוזיציה 498
14-4	כבידה בקרבת כדה"א 500
14-5	כבידה בתוך כדה"א 504
14-6	אנרגיה פוטנציאלית כבידתית 506
14-7	איינשטיין וכבידה 513
סיכום	פרק 14 516
פרק 15 זורמים 521	
15-1	חומרים זורמים והעולם סביבנו 522
15-2	מהו חומר זורם? 522
15-3	לחץ וצפיפות 522
15-4	זורמים במנוחה בנוכחות כוחות כבידה 527

17-5	מהירות הגל 606	15-	מדידת לחץ 530
17-6	מהירות הגל במיתר מתוח 609	15-	העקרון של פסקל 533
17-7	העברת אנרגיה והספק על ידי גל במיתר 611	15-	העקרון של ארכימדס 535
17-8	עקרון הסופרפוזיציה בגלים 613	15-	זורמים אידאליים בתנועה 540
17-9	התאבכות גלים 615	15-	משוואת הרציפות 541
17-10	גלים חוזרים וגלים עומדים 618	15-	שוטף נפחי 543
17-11	גלים עומדים ותהודה 621	15-	משוואת ברנולי 546
17-12	פאזורים 623	כום	פרק 15 550
	סיכום פרק 17 625		

פרק 16 תנודות 559

16-	תנועה מחזורית: סקירה כללית 560	16-	תנועה הרמונית פשוטה: מערכת מסה-קפיץ 565
16-	המתמטיקה של תנודות סינוסואידיות 561	16-	מהירות ותאוצה של תנועה הרמונית פשוטה 570
16-	נוסחאות מתמטיות 635	16-	מטוטלות מתמטית 572
16-	גורמי המרה 638	16-	גלגולי האנרגיה בתנועה הרמונית פשוטה 576
16-	התכונות של היסודות הכימיים 641	16-	תנועה הרמונית מרוסנת 579
16-	הטבלה המחזורית 644	16-	תנודות מאולצות ותהודה 583
		כום	פרק 16 586

תשובות לתרגילי קריאה ובעיות בלתי זוגיות 645

זכויות לתמונות 651

מפתח העניינים 653

הסדרה המדעית 657

פרק 17 גלים מכניים רוחביים 595

17-	גלים וחלקיקים 596
17-	סוגי גלים 596
17-	פולסים וגלים 597
17-	הביטוי המתמטי של גל סינוסואידי 601

הקדמה לספר מבינים פיזיקה

הקדמה למהדורה העברית

סטודנט להנדסה הפוגש לראשונה את תורת הפיזיקה עלול לחוש כאדם שנקלע לארץ זרה. המושגים שהוא רגיל בהם בחיי היומיום כמו: מהירות, כוח ועבודה לובשים משמעויות חדשות לחלוטין. לצד הקושי של מכמני הפיזיקה, מרבית הסטודנטים חווים קושי נוסף, עד לפני חמש שנים לא היה ספר פיזיקה ברמה אקדמית בעברית. בשיחות עם סטודנטים ומרצים עלה הצורך בעריכת ספר פיזיקה בעברית עבור סטודנטים להנדסה ומדעים. בעקבות שיחות אלה ביצענו מחקר בנושאי קריאה ולמידה^{1,2}. התברר כי סטודנטים בשנה הראשונה ללימודיהם כמעט ואינם קוראים ספרי לימוד, ובמיוחד לא ספרי לימוד בפיזיקה. הסיבות לכך רבות; אחת הבולטות בהן היא השילוב בין צבר הקשיים בהם נתקל הסטודנט בתחילת לימודיו: הקושי בכניסה לעול הלימודים האקדמיים, ההתמודדות עם עומס לימודים גבוה בסביבה לא מוכרת, ובנוסף לכך, הדרושה לקרוא ספרות מקצועית באנגלית. הסטודנטים טענו כי "לו היה ספר מתאים בעברית הייתי לומד בעזרתו פיזיקה". לראיה, רבים מהם מעדיפים לקרוא ספרי לימוד ברמה תיכונית בעברית בקורסי היסוד בפיזיקה של האקדמיה.

לאור זאת החליטה המכללה האקדמית להנדסה אורט בראודה, לפני חמש שנים, לפתח סביבת לימוד בהוראת פיזיקה ולהעמידה לרשות כל המוסדות להשכלה גבוהה בארץ.

בעקבות הופעת הסדרה "מבינים פיזיקה" זכינו לקבל תגובות נלהבות של סטודנטים ומרצים ממוסדות להשכלה גבוהה בארץ. פרופ' יגאל גלילי, ראש המחלקה להוראת המדעים באוניברסיטה העברית בירושלים, כתב על אחד מספרי הסדרה "מבינים פיזיקה":

"הספר נועד לקורסי מבוא בפיזיקה הניתנים לסטודנטים למדעים ולהנדסה בתחילת לימודיהם האקדמיים. קיימת חשיבות להופעת הספר, שהרי אין ספרי לימוד בעברית בפיזיקה ברמה אקדמית בהיקף ובאיכות שכזאת... מחברי הספר מרבים בהסברים שיכולים להוביל להכרות שיטתית של הפיזיקה מושגה ויישומיה הבסיסיים בטכנולוגיה ובתחומים שונים... הספר עשיר במגוון נושאי התוכן, הדגמות בהירות, דוגמאות לבעיות מבוא ודרכי פתרון, שאלות, תרגילים, סיכומים, הערות ועוד. איכות הספר ותכנון הם תוצאה של מסורת ופיתוח הנמשך כבר לאורך עשרות שנים... אינני מכיר ספר לימוד אחר, הכתוב בשפה העברית, שיכול להתחרות במימדים אלו עם ספר זה."

כמענה לצרכי הסטודנטים ולאור הרצון לעדכן את הוראת הפיזיקה פותחה סביבה התומכת בהוראת הפיזיקה. סביבה זו מבוססת על ארבעה מרכיבים עיקריים. המרכיב הראשון סדרת הספרים 'מבינים פיזיקה' שהופיעה בארבעה חלקים - א. מכניקה, ב. חשמל, מגנטיות ואופטיקה ג. פיזיקה מודרנית ד. זורמים, גלים ותרמודינמיקה; המרכיב השני הוא אתר אינטרנטי לתמיכה בלמידת סטודנטים ובהוראה של מרצים בפיזיקה, ובו מופיעים: תקצירים

1 Pundak, D. & Maharshak, A., (2010). Employing a marketing approach to create a learning environment for engineering student. **Research in Higher Education Journal**. <http://aabri.com/manuscripts/10452.pdf>.

2 פונדק, ד., הרשקוביץ, א., שחם, מ. (2010). מאפייני קריאה בספרי לימודים וחומרים מקוונים בקרב סטודנטים במכללה ובאוניברסיטה. על הגובה - כתב עת לענייני הוראה בחינוך הגבוה, 9, 20-25.

מהספר, שאלות, הדמיות, מערכות מושגים, פתרונות לשאלות, סרטי וידאו והרצאות. כתובת האתר: <http://up.braude.ac.il>. בדרך זו אנו מקווים לאפשר עדכון מתמיד של נושאים הקשורים בהוראת הפיזיקה והזדמנות לשפר את הספר והאתר התומך בו. מרכיב שלישי המסייע בהוראת הפיזיקה הוא בודק המטלות ברשת - WebAssign. במערכת זו, שפותחה בתחילת המאה ה-21 בארה"ב, מופיעות שאלות מספר זה (ומעוד כמה וחמישים ספרים נוספים בפיזיקה) אותן ניתן להציג לסטודנטים באמצעות הרשת. המערכת עובדת בהצלחה, בגרסתה העברית, מזה עשר שנים במכללתנו ובמכללות נוספות, ומסייעת לסטודנטים ולמרצים בלמידה ובהוראה. כתובת האתר של בודק המטלות היא: www.wa2u.net. המרכיב הרביעי הוא סדרת הדמיות שפותחה על ידי אוניברסיטת קולורדו ומאפשרת לסטודנטים לחקור באמצעות הדמיות רכיבים רבים בתורת הפיזיקה ובמדעים אחרים. כתובת האתר היא: <http://phet.colorado.edu>.

סדרת הספרים "מבנים פיזיקה" פותחה לאורך כחמש שנים כאשר מלווים אותה לאורך כל הדרך שני עורכים מסורים. הראשון, מר דוד אגמון, העורך המדעי של הספר, איש אשכולות המפליא בידיעותיו הרחבות, בנוסף להיותו מורה מוכשר לפיזיקה. בעריכת הספרים הקפיד דוד על קלה כבחמורה והוסיף שאלות רבות. השני הוא דר' אהרון גרו מהטכניון - מכון טכנולוגי לישראל. אהרון מרצה מצטיין בעל יכולת מופלאה להבחין בפרטים מבלי לאבד את השלם, הטיב להגיה פעם אחר פעם את סדרת הספרים. בעצה אחת עם צוות העורכים הוחלט להתקין מחדש את הספר "מכניקה" בסדרה "מבנים פיזיקה". הספר המקורי היה כבד-משקל וחסר את הנוחות הנדרשת מספר לימוד. לפיכך הוחלט לפצל את הספר לשני חלקים. לכל פרק נוסף סיכום המאפשר לסטודנטים לבחון במבט קצר את עיקרי הנושאים שנידונו בפרק. במהדורה זו נצמדנו לסדר הפרקים של הספר המקורי. נוסף לחלק השני פרק 15 המקורי העוסק בזורמים. בשני החלקים יש עתה 17 פרקים.

מיזם פיתוח סביבת למידה חדשה, תרגום ועריכה של סדרת ספרים מאופייין במורכבות ודורש שיתוף פעולה נרחב וסיוע של גורמים רבים. זוהי הזדמנות נעימה להודות לחלק מהם. ברצוני להודות למיכל ברוק העורכת הגרפית של הסדרה שעמלה בכישרון, ימים ולילות, על הכנתה תוך התאמתה לכל הדרישות המדעיות והאסטטיות. לאביחי בלמס ושאדי עסאקלה - בוני אתר הסדרה, עמיתי ליחידת התקשוב בהוראה, תודות על הפגנת ידע ותושייה רבים בתרגום רעיונות פיזיקאליים לביטים ושורות קוד. לדר' זאב רובין מהמחלקה לפיזיקה במכללה, שכתב השלמות לספר המקורי. השלמותיו עוסקות: ביחידות וממדים (1-11), תאוצה משיקית ותאוצה נורמאלית (5-8), משוואות תנועה (6-8), מערכות מואצות ועקרון ד'אלמבר (6-9), גרדיאנט וכוח משמר (10-11). תודתנו נתונה להוצאת Wiley על שנאותה להעניק לנו את זכויות התרגום, ולהוצאת מאגנס ומנהלה מר חי צבר שעבדו עמנו בשיתוף פעולה פורה בהפקה ובשיווק. לעונג היה לי לבלות עם עמיתי פרופ' אריה מהרשק בדיונים על שיפור ההוראה ופיתוח סביבות למידה והתרומה ניכרת בספר זה. עזרה חיונית הגישו לנו אנשי המנהלה במכללה: צביקה קרני - מנהל הכספים, ונתן שטיינפלד - החשב, שדאגו להיבטים חשובים בלעדיהם הספר לא היה רואה אור. אחרונים יבואו על הברכה מובילי החזון ואמונה בחשיבות פיתוח אמצעי לימוד והוראה, נשיאי המכללה האקדמית להנדסה אורט בראודה דר' שמריהו רוזנר, פרופ' יוחנן ארזי ז"ל ופרופ' אריה מהרשק הנשיא הנוכחי.

דר' דוד פונדק

ראש היחידה לתקשוב בהוראה

המכללה האקדמית להנדסה אורט בראודה

ערכים של קבועים פיזיקליים¹

נספח א'

אי-וודאות ²	ערך מדויק ³	ערך מקורב	סימון	שם הקבוע
מדויק	2.997 924 58	3.00×10^8 m/s	c	מהירות האור בריק
0.039	1.602 176 462	1.60×10^{-19} C	e	מטען האלקטרון
1500	6.673	6.67×10^{-11} m ³ /s ² ·kg	G	קבוע הכבידה העולמי
1.7	8.314 472	8.31 J/mol·K	R	קבוע הגזים
0.079	6.022 141 99	6.02×10^{23} mol ⁻¹	N_A	קבוע אבוגדרו
1.7	1.380 650 3	1.38×10^{-23} J/K	k_B	קבוע בולצמן
7.0	5.670 400	5.67×10^{-8} W/m ² ·K ⁴	σ	קבוע סטפן בולצמן
1.7	2.271 098 1	2.27×10^{-2} m ³ /mol	V_m	הנפח המולרי של גז אידיאלי ב-STP ¹
מדויק	8.854 187 817 62	8.85×10^{-12} C ² /N·m ²	ϵ_0	הקבוע הדיאלקטרי של הריק
5×10^{-10}	8.987 51 787	8.99×10^9 N·m ² /C ²	$k = 1/4\pi\epsilon_0$	הקבוע הקולוני
מדויק	1.256 637 061 43	1.26×10^{-6} N/A ²	μ_0	קבוע הפרמביליות
0.078	6.626 068 76	6.63×10^{-34} J·s	h	קבוע פלאנק
0.079	9.109 381 88	9.11×10^{-31} kg	m_e	מסת האלקטרון
0.0021	5.485 799 110	5.49×10^{-4} u		
0.079	1.672 621 58	1.67×10^{-27} kg	m_p	מסת הפרוטון
1.3×10^{-4}	1.007 276 466 88	1.0073u		
0.0021	1836.152 667 5	1840	m_p / m_e	היחס בין מסת הפרוטון למסת האלקטרון
0.040	1.758 820 174	1.76×10^{11} C/kg	e / m_e	היחס בין המסה למטען האלקטרון
0.079	1.674 927 16	1.68×10^{-27} kg	m_n	מסת הנתרון
5.4×10^{-4}	1.008 664 915 78	1.0087u		
0.0005	1.007 825 031 6	1.0078u	m_{1H}	מסת אטום המימן ¹
0.0005	2.014 101 777 9	2.0141u	m_{2H}	מסת דיאוטריום ¹
0.067	4.002 603 2	4.0026u	m_{4He}	מסת אטום ההליום ¹
0.084	1.888 531 09	1.88×10^{-28} kg	m_μ	מסת הנויטרינו
0.040	9.284 763 62	9.28×10^{-24} J/T	μ_e	המומנט המגנטי של האלקטרון
0.041	1.410 606 663	1.41×10^{-26} J/T	μ_p	המומנט המגנטי של הפרוטון
0.040	9.274 008 99	9.27×10^{-24} J/T	μ_B	המגנטון של בוהר
0.040	5.050 783 17	5.05×10^{-27} J/T	μ_N	המגנטון הגרעיני
0.0037	5.291 772 083	5.29×10^{-11} m	r_B	הרדיוס של בוהר
7.6×10^{-6}	1.097 373 156 854 8	1.10×10^7 m ⁻¹	R	הקבוע של רידברג
0.0073	2.426 310 215	2.43×10^{-12} m	λ_C	אורך הגל של אלקטרון לפי קומפטון

¹ הערכים המופיעים בעמודה זו עם בעלי אותם יחידות ואותו סדר גודל של הערכים המקורבים
² ערך אי-הודאות הוא אחד חלקי מליון מהיחידות שבהן נמדד הקבוע
³ המסה כתובה ביחידות מסה אטומית u שערכה $1.660 538 73 \times 10^{-27}$ kg.
 STP¹ - טמפרטורה ולחץ תקינים - הטמפרטורה היא 0°C והלחץ הוא 1.0atm.
 ערכים המופיעים בעמודה זו עם בעלי אותם יחידות ואותו סדר גודל של הערכים המקורבים

ערכים אסטרונומיים

מרחקים מכדור הארץ				
2.2×10^{20} m	למרכז הגלקסיה שלנו	3.82×10^8 m		*לירח
2.1×10^{22} m	לגלקסיית אנדרומדה	1.50×10^{11} m		*לשמש
$\sim 10^{26}$ m	קצה היקום הנראה	4.04×10^{16} m		לכוכב הקרוב ביותר - פרוקסימה סנטאורי

המרחק הממוצע

יחסים בין כדור הארץ, השמש והירח				
ירח	ארץ	שמש	יחידות	מאפיין
7.36×10^{22}	5.98×10^{24}	1.99×10^{30}	kg	מסה
1.74×10^6	6.37×10^6	6.96×10^8	m	רדיוס
3340	5520	1410	kg/m ³	כפיפות
1.67	9.81	274	m/s ²	תאוצת הכבידה
2.38	11.2	618	km/s	מהירות המילוט
27.3d	23h 56min	37 ימים בקטבים 26 ימים במרכז		מן המחזור להשלמת סיבוב
		3.90×10^{26}	W	הספק הקרינה

נמדד ביחס לכוכבים רחוקים.
מעל פני האטמוספירה שטף הקרינה של השמש הוא 1340 W/m^2 .

יחסים בין כדור הארץ, השמש והירח									
מרקורי	נוגה	ארץ	מאדים	צדק	שבתאי	אורנוס	נפטון	פלוטו	
57.9	108	150	228	778	1430	2870	4500	5900	מרחק ממוצע מהשמש (10^6 km)
0.241	0.615	1.00	1.88	11.9	29.5	84.0	165	248	מן ההקפה מסלולי (שנים)
58.7	243	0.997	1.03	0.409	0.426	-0.451	0.658	6.39	מן סיבוב עצמי (ימים)
47.9	35.0	29.8	24.1	13.1	9.64	6.81	5.43	4.74	מהירות מסלולית (km/s)
4880	12 100	12 800	6790	143 000	120 000	51 800	49 500	2300	קוטר (km)
0.0558	0.815	1.000	0.107	318	95.1	14.5	17.2	0.002	מסה (ארץ = 1)
3.78	8.60	9.78	3.72	22.9	9.05	7.77	11.0	0.5	תאוצת כבידה בקו המשווה (m/s^2)
4.3	10.3	11.2	5.0	59.5	35.6	21.2	23.6	1.1	מהירות מילוט בקו המשווה (m/s)

נמדד ביחס לכוכבים רחוקים,
וגו ואורנוס סובבים סביב צירם בכיוון הפוך לכיוון למסלול תנועתם סביב השמש.

תשובות לתרגילי קריאה ובעיות בלתי זוגיות

(תשובות הדורשות הוכחה, גרפים או פתרון ארוך אינן נכללות כאן)

(a) 340 s; (b) -4.5×10^{-3} rad/s²; (c) 98 s. **19.** 1.8 m/s², toward the center. **21.** 0.13 rad/s. **23.** (a) 3.0 rad/s; (b) 30 m/s; (c) 6.0 m/s²; (d) 90 m/s². **25.** (a) 3.8×10^3 rad/s; (b) 190 m/s. **27.** (a) 7.3×10^{-5} rad/s; (b) 350 m/s; (c) 7.3×10^{-5} rad/s; (d) 460 m/s. **29.** 16 s. **31.** (a) -2.3×10^{-9} rad/s²; (b) 2600 y; (c) 24 ms. **33.** 12.3 kg · m². **35.** (a) 1100 J; (b) 9700 J. **37.** (a) $5md^2 + 8/3Md^2$; (b) $(5/2m + 4/3M)d^2\omega^2$. **39.** 0.097 kg · m². **41.** $1/3M(a^2 + b^2)$. **45.** 4.6 N · m. **47.** (a) $r_1 F_A \sin \theta_1 - r_2 F_B \sin \theta_2$; (b) -3.8 N · m. **49.** (a) 28.2 rad/s²; (b) 338 N · m. **51.** (a) 155 kg · m²; (b) 64.4 kg. **53.** 130 N. **55.** (a) 6.00 cm/s²; (b) 4.87 N; (c) 4.54 N; (d) 1.20 rad/s²; (e) 0.0138 kg · m². **57.** (a) 1.73 m/s²; (b) 6.92 m/s². **59.** 396 N · m. **61.** (a) $mL^2\omega^2/6$; (b) $L^2\omega^2/6g$. **63.** 5.42 m/s **65.** $\frac{3}{2}\sqrt{\frac{g}{L}}$. **67.** (a) $[(3g/H)(1 - \cos \theta)]^{0.5}$; (b) $3g(1 - \cos \theta)$; (c) $3/2g \sin \theta$; (d) 41.8°. **69.** (a) $0.083519ML^2 \approx 0.084ML^2$; (b) low by (only) 0.22%.

פרק 12

ת.ק. 12-1: (א) מתי סינוס הזווית בין הוקטור $1 = 3 > 2 = 4 > 5$ שווה לאפס? כאשר הזווית היא 0° או 180°. (ב) במקרה זה ערך הסינוס צריך להיות ± 1 . כלומר הזווית היא 90° או 270°. (ג) במצב המתואר $|\vec{c}| |\vec{d}| \sin \phi = 3 \cdot 4 \sin \phi = 6$ כלומר $\sin \phi = 0.5$ מכאן שהזווית היא 30° או 150°.

ת.ק. 12-2: קצב השינוי של התנע הסיבובי שווה למומנט הסיבוב. אפס $= 4 = 2 > 1 > 3$.

ת.ק. 12-3: (א) אפס $= 5 > 4 > 2 = 3 = 1$, מפני שערכו של הוא 4 m עבור 1 ו-3, וערכו 1 m עבור 2 ו-4, ערכו אפס עבור 5. (ב) לחלקיקים 2 ו-3 מומנט סיבובי שלילי ביחס לציר σ , מפני שהמכפלה $\vec{\ell} = \vec{r} \times \vec{p}$ פונה אל תוך הדף, עבורם.

פרק 11

ת.ק. 11-1: (א) חיובי, מפני ש- θ גדילה. (ב) שלילי, מפני ש- θ קטניה.

ת.ק. 11-2: (א) חיובית; (ב) שלילית; (ג) שלילית; (ד) חיובית.

ת.ק. 11-3: מציאת התאוצה הזוויתית α , על ידי ביצוע נגזרת שנייה של θ לפי הזמן t . התאוצות של (א) ו- (ד) אינן תלויות בזמן t ולכן הן קבועות, ולכן חלות עליהן המשוואות בטבלה 11-1.

ת.ק. 11-4: מאחר והמהירויות מופיעות בחזקה שנייה v^2 ו- ω^2 הן סקלרים שגודלם תמיד חיובי.

ת.ק. 11-5: (א) כן, קיימת תאוצה צנטריפטלית; (ב) לא מפני ש- α שווה לאפס. (ג) כן; (ד) כן, מפני ש- α שווה לאפס.

ת.ק. 11-6: יש לחשב את mr^2 עבור כל אחד מהכדורים, ונמצא שהם שווים.

ת.ק. 11-7: (1) < (2) < (4) < (3). יש לזכור ש- I תלוי לא רק במסה אלא גם במרחק מציר הסיבוב.

ת.ק. 11-8: (א) $I = mr^2$ (ב) $I = 12 mr^2$ (ג) $I = 58 mr^2$ (ד) $I = mr^2$

ת.ק. 11-9: אפס $= E = B > D > A = C$. עבור A ו- C הזווית ϕ היא 90°, עבור D , ϕ בין אפס ל-90°, עבור E , ϕ היא אפס, ועבור C המרחק r שווה לאפס.

ת.ק. 11-10: (א) באותו כיוון. (ב) קטן יותר.

בעיות

1. (a) $a + 3bt^2 - 4ct^3$; (b) $6bt - 12ct^2$. **3.** (a) 5.5×10^{15} s; (b) 26. **5.** (a) 2 rad; (b) 0; (c) 130 rad/s; (d) 32 rad/s²; (e) no. **7.** 11 rad/s. **9.** (a) -67 rev/min²; (b) 8.3 rev. **11.** 200 rev/min. **13.** 8.0 s. **15.** (a) 44 rad; (b) 5.5 s, 32 s; (c) -2.1 s, 40 s. **17.**