

# סדנאות – שבוע 4

שימוש בחוקי ניוטון

## כוחות

כוחות תמיד פועלים בין גופים

יש סוגים שונים של כוחות:

**1. כוח מגע** – כוח שגוף אחד מפעיל ישירות על גוף אחר (למשל, אני מקפל דף נייר). יש סוגים שונים של כוחות מגע:

1. כוח נורמלי – כוח דוחף הפועל בכיוון ניצב למשטח עליו הוא פועל
2. כוח חיכוך – כוח הפועל במקביל למשטח
3. מתיחות חוט – כוח מושך שחוט מפעיל על גוף כאשר מותחים אותו

**2. כוח ארוך טווח** – כוח שגוף אחד מפעיל על גוף אחר בלי לגעת בו. דוגמאות:

1. כוח הכבידה
2. הכוח החשמלי
3. הכוח המגנטי
4. כוחות גרעיניים

שימו לב שכוח הוא ווקטור – יש לו גודל וכיוון

# חוקי ניוטון

חוקי ניוטון מתארים איך כוחות גורמים לתנועה. מכיוון שההגדרות האלה לא תמיד מסתדרות עם האינטואיציה שלנו צריך לשים לב כשפותרים שהפתרון מסתמך על חוקי ניוטון ולא על אינטואיציה מוטעית

חוקי ניוטון (מערכת ייחוס התמדית)

1. אם לא פועל כוח – המהירות קבועה ביחס למערכת ייחוס התמדית (אינרציאלית) (האינטואיציה שלנו אומרת שאם לא מפעילים כוח הגוף נשאר במנוחה אבל ניוטון הראה שזה לא נכון).

2. אם פועלים כוחות, הגוף מאיץ בתאוצה הנקבעת לפי הקשר:

$$\vec{F}_T = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = m\vec{a}$$

3. אם גוף 1 מפעיל כוח על גוף 2, גוף 2 מפעיל על גוף 1 כוח זהה בגודלו והפוך בכיוונו:

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$$

# פתרון של בעיות – בלי תאוצה

איך ניגשים לפתור בעיה בעזרת חוקי ניוטון?

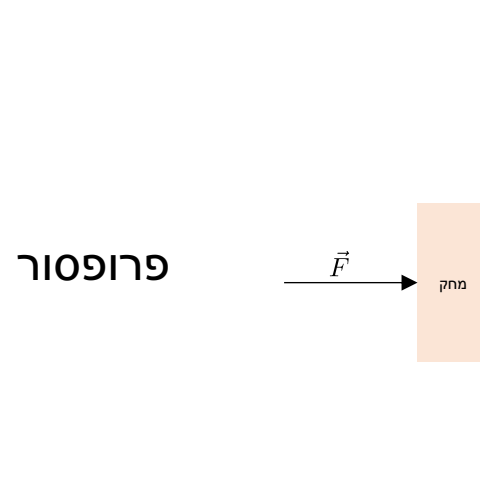
1. צייר איור סכמתי המתאר את הבעיה – צייר את כל הגופים בבעיה כך שהגדלים והזוויות יהיו ברורים ככל הניתן.
2. צייר דיאגרמת גוף חופשי עבור כל גוף בבעיה.  
בדיאגרמה זו מראים רק גוף אחד (בשלב זה בקורס גוף יצויין כנקודה).
3. צייר את כל הכוחות הפועלים על הגוף כחיצים עם גודל וכיוון. ליד כל חץ רשום את סימון גודל הכוח.  
שאל את עצמך אילו כוחות פועלים על הגוף:
  1. על כל גוף בעל מסה פועלת כבידה.
  2. אם הגוף נמצא במגע ומפעיל כוח על משטח, המשטח מפעיל עליו כוח נורמלי ולעיתים גם חיכוך.
  3. חוט או כבל מפעילים כוח משיכה.
4. אל תרשום בדיאגרמת הגוף החופשי כוחות שהגוף מפעיל על גופים אחרים – עבור כל כוח שאל את עצמך, איזה גוף מפעיל כוח זה?
5. בחר מערכת קואורדינטות נוחה וציין את הקואורדינטות.

# פתרון של בעיות – בלי תאוצה

פתרון:

1. אם יש יותר מגוף אחד, השתמש בחוק ה 3 של ניוטון בשביל למצוא איזה כוח גוף אחד מפעיל על גוף שני ולהיפך.
2. מצא את הרכיבים של כל כוח במערכת הקואורדינטות של דיאגרמת הגוף החופשי שלו והשווה את הסכום שלהם ל 0.
3. חזור על התהליך עבור כל גוף בבעיה.
4. וודא שמספר המשוואות ומספר הנעלמים זהה. אם יש פחות משוואות מנעלמים, כנראה שלא לקחנו משהו בחשבון.

2. פרופסור מחזיק מחק כנגד לוח אנכי על ידי כך שהוא דוחף את המחק לתוך הלוח. נתון שהכוח  $F$  שהפרופסור מפעיל גדול בהרבה מהכוח המינימלי שנדרש להחזקת המחק. כוח החיכוך שמפעיל הלוח על המחק יגדל כאשר הפרופסור:



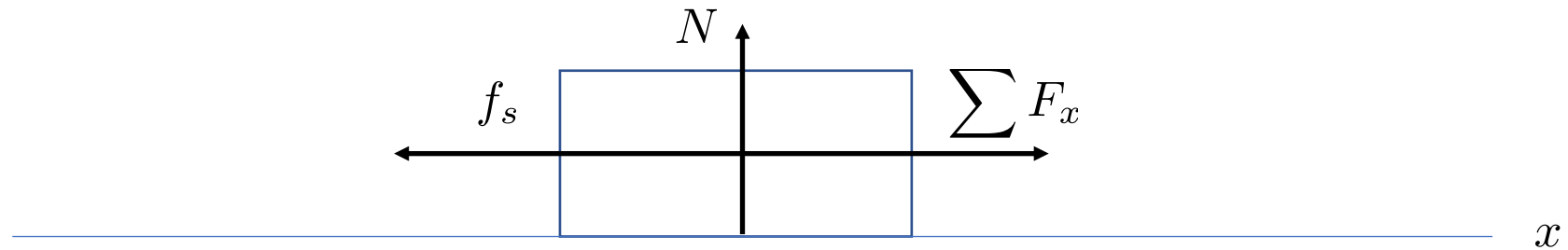
- (a) יפעיל כוח קצת יותר גדול בכיוון הלוח
- (b) יפעיל כוח יותר קטן בכיוון הלוח
- (c) יפסיק לדחוף
- (d) ידחוף כך שהכוח שהוא מפעיל יהיה מכוון מעט כלפי מטה אך יישאר באותו הגודל
- (e) ידחוף כך שהכוח שהוא מפעיל יהיה מכוון מעט כלפי מעלה אך יישאר באותו הגודל

כוח חיכוך הינו כוח הפועל בין שני משטחים וכיוונו מקביל לכיוון המשטחים.

אנחנו מבחינים בין שני סוגי כוחות חיכוך: חיכוך סטטי וחיכוך קינטי.

חיכוך סטטי פועל כאשר אין תנועה בין המשטחים, וחיכוך קינטי פועל כאשר יש תנועה.

החיכוך הסטטי הוא כוח הזהה בגודלו ומנוגד בכיוונו לשקול הכוחות הפועל על המשטחים – זהו בדיוק הכוח הדרוש על מנת למנוע תנועה יחסית בין המשטחים.

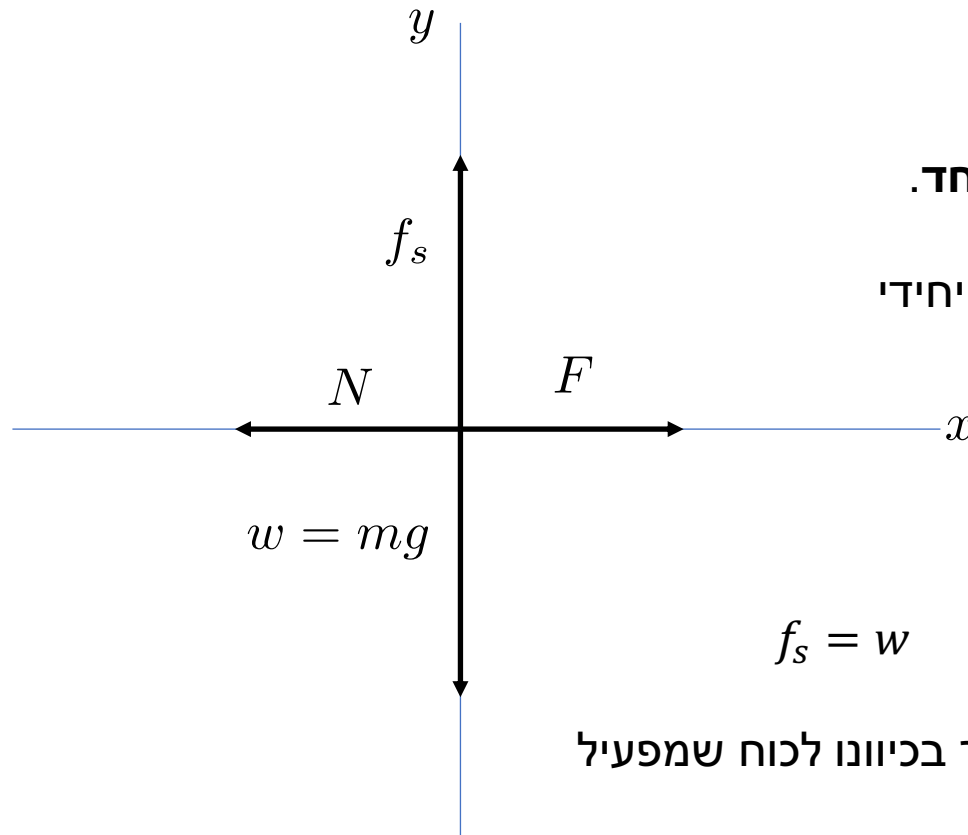


לכוח זה יש גודל מקסימלי, התלוי בכוח הנורמלי בין המשטחים:

$$f_s \leq \mu_s N$$

כאשר  $\mu_s$  הוא מקדם החיכוך הסטטי ו  $N$  הוא הכוח הנורמלי. אם הרכיב של שקול הכוחות הפועל בין המשטחים גדול מכוח זה, תתחיל תנועה בין המשטחים.

מאחר והמחק מצוי במנוחה, ברור שכוח החיכוך שפועל עליו, הוא כוח חיכוך סטטי, ושהגודל שלו מספיק על מנת למנוע מהמחק לנוע.



שלב ראשון - ציור דיאגרמת גוף חופשי.

בדיאגרמה זו מופיעים רק כוחות הפועלים על גוף אחד.

מכיוון שהכוח שהפרופסור מפעיל הוא אופקי, הכוח היחידי הפועל בכיוון האנכי מלבד כוח החיכוך הוא הכבידה.

לכן כוח החיכוך שווה בגודלו והפוך בכיוונו לכוח הכבידה:

$$f_s = w$$

כמו כן, קל לראות שהכוח הנורמלי שווה בגודלו והפוך בכיוונו לכוח שמפעיל הפרופסור:

$$N = F$$

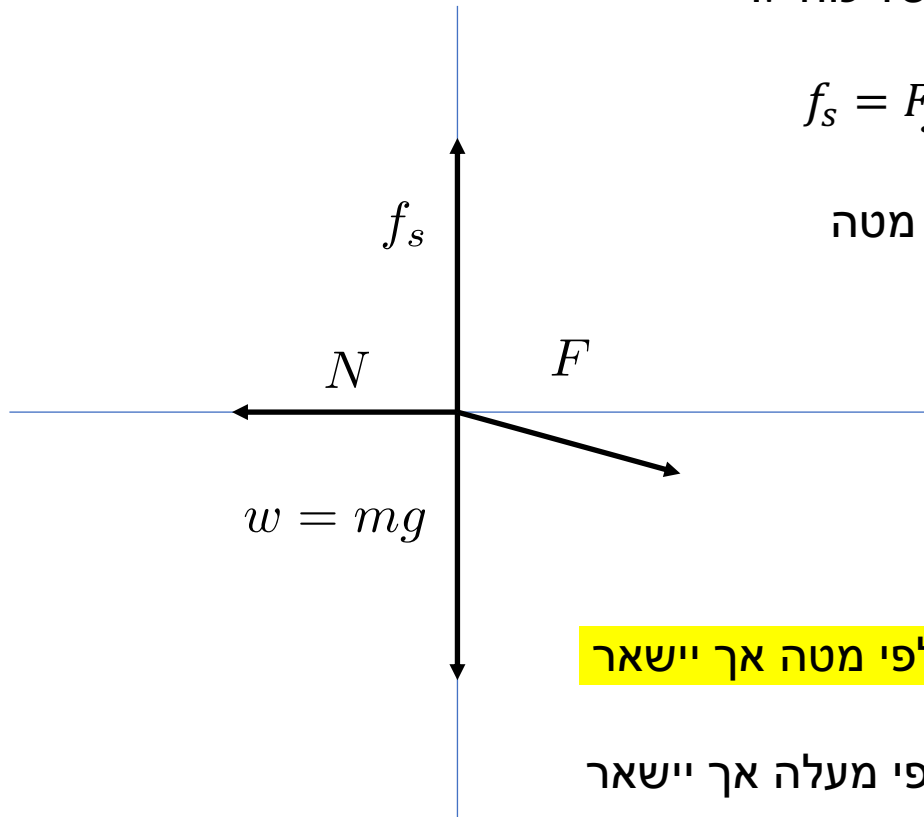
כל זמן שלכוח  $F$  אין רכיב בכיוון האנכי, כוח החיכוך יישאר שווה לכוח הכבידה גם אם  $F$  יגדל או יקטן.



אם הכוח  $F$  כבר לא מכוון בכיוון האופקי, ויש לו רכיב כלפי מטה, כוח החיכוך מתנגד לשקול הכוחות, במקרה זה שקול הכוחות הוא כוח הכבידה ביחד עם הרכיב האנכי של כוח  $F$ :

$$f_s = F_g + F_y$$

לכן אם הכוח שהפרופסור מפעיל, יהיה מכוון מעט כלפי מטה אך יישאר באותו הגודל, כוח החיכוך יגדל



- (a) יפעיל כוח קצת יותר גדול בכיוון הלוח
- (b) יפעיל כוח יותר קטן בכיוון הלוח
- (c) יפסיק לדחוף

(d) ידחוף כך שהכוח שהוא מפעיל יהיה מכוון מעט כלפי מטה אך יישאר באותו הגודל

(e) ידחוף כך שהכוח שהוא מפעיל יהיה מכוון מעט כלפי מעלה אך יישאר באותו הגודל

# פתרון של בעיות – עם תאוצה

1. צייר איור סכמתי המתאר את הבעיה.

2. צייר דיאגרמת גוף חופשי עבור כל גוף בתנועה.  
בדיאגרמה זו מראים רק את הגוף (בשלב זה בקורס גוף יצויין כנקודה).

3. צייר את כל הכוחות הפועלים על הגוף. לייד כל כוח רשום את סימון הגודל שלו.  
רשום אך ורק כוחות!  $m\vec{a}$  איננו כוח!

5. בחר מערכת קואורדינטות וציין את הקואורדינטות. בהרבה מקרים נוח לבחור מערכת צירים כך שציר ה  $x$  החיובי בכיוון התאוצה. אם יש מספר גופים המאיצים בכיוונים שונים, אפשר לבחור לכל גוף מערכת קואורדינטות שונה.

# פתרון של בעיות – עם תאוצה

פתרון:

1. מצא את הרכיבים של כל כוח במערכת הקואורדינטות שבחרת והשווה אותם ל  $ma_x$  ול  $ma_y$ .

2. חזור על התהליך עבור כל גוף בבעיה.

3. אם יש צורך הוסף משוואות נוספות (למשל קשר בין תאוצות של גופים שונים)

בדוק את עצמך:

האם היחידות נכונות?

האם הסימן נכון (למשל, האם הגוף מאיץ בכיוון הגיוני?)

האם הפתרון הגיוני?

מזחלת שלג מחליקה במדרון בעל שיפוע קבוע  $\alpha$  . נתון כי למזחלת מהירות התחלתית במורד המדרון וכי מקדם החיכוך הקינטי הוא  $\mu_k$  .

מה יהיה גודל תאוצת המזחלת?

.1  $g (\sin\alpha - \mu_k \cos\alpha)$

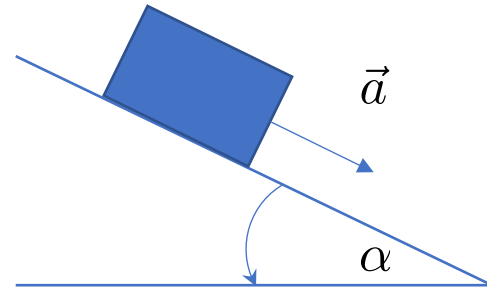
.2  $g (\cos\alpha - \mu_k \sin\alpha)$

.3  $g (\mu_k \sin\alpha - \cos\alpha)$

.4  $mg (\mu_k \sin\alpha - \cos\alpha)$



ראשית נצייר איור סכמטי:



הגוף היחידי הנע בבעיה הוא המזחלת ולכן נצייר עבורו דיאגרמת גוף חופשי:

שימו לב שאנחנו בוחרים את ציר x החיובי בכיוון התאוצה ועם השיפוע.

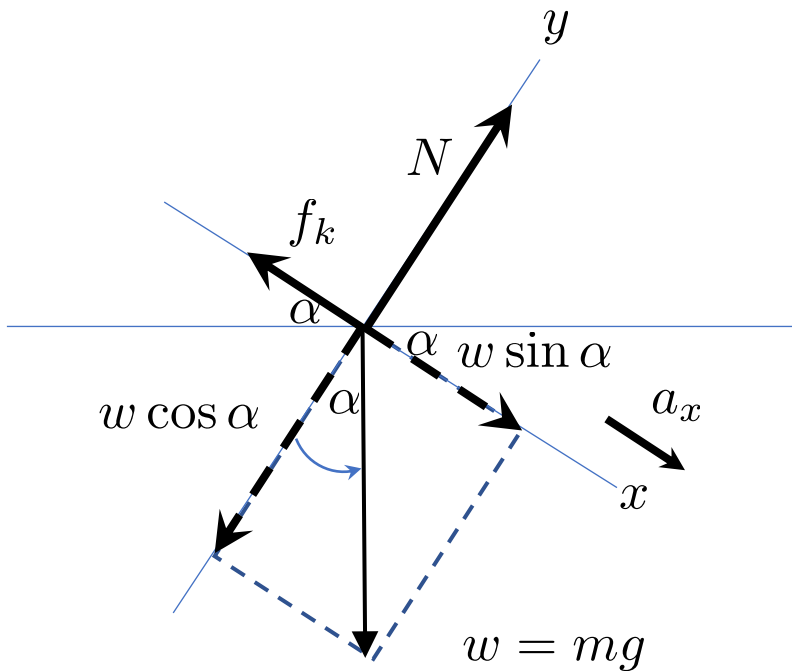
הכוחות הפועלים הם המשקל  $w$ , הכוח הנורמלי  $N$  וכוח החיכוך  $f_k$

רכיב x של החוק ה 2 של ניוטון הוא:

$$\sum F_x = mg \sin \alpha - f_k = ma_x$$

רכיב y:

$$\sum F_y = N - mg \cos \alpha = ma_y$$



חיכוך קינטי נתון על ידי המשוואה:

$$f_k = \mu_k N$$

לכן צריך למצוא קודם כל את הכוח הנורמלי  $N$  מהמשוואה עבור רכיב  $y$ . אנחנו יודעים שאין תאוצה בכיוון  $y$  ולכן:

$$N = mg \cos\alpha$$

נציב:

$$ma_x = mg \sin\alpha - \mu_k mg \cos\alpha$$

$$a_x = g (\sin\alpha - \mu_k \cos\alpha)$$

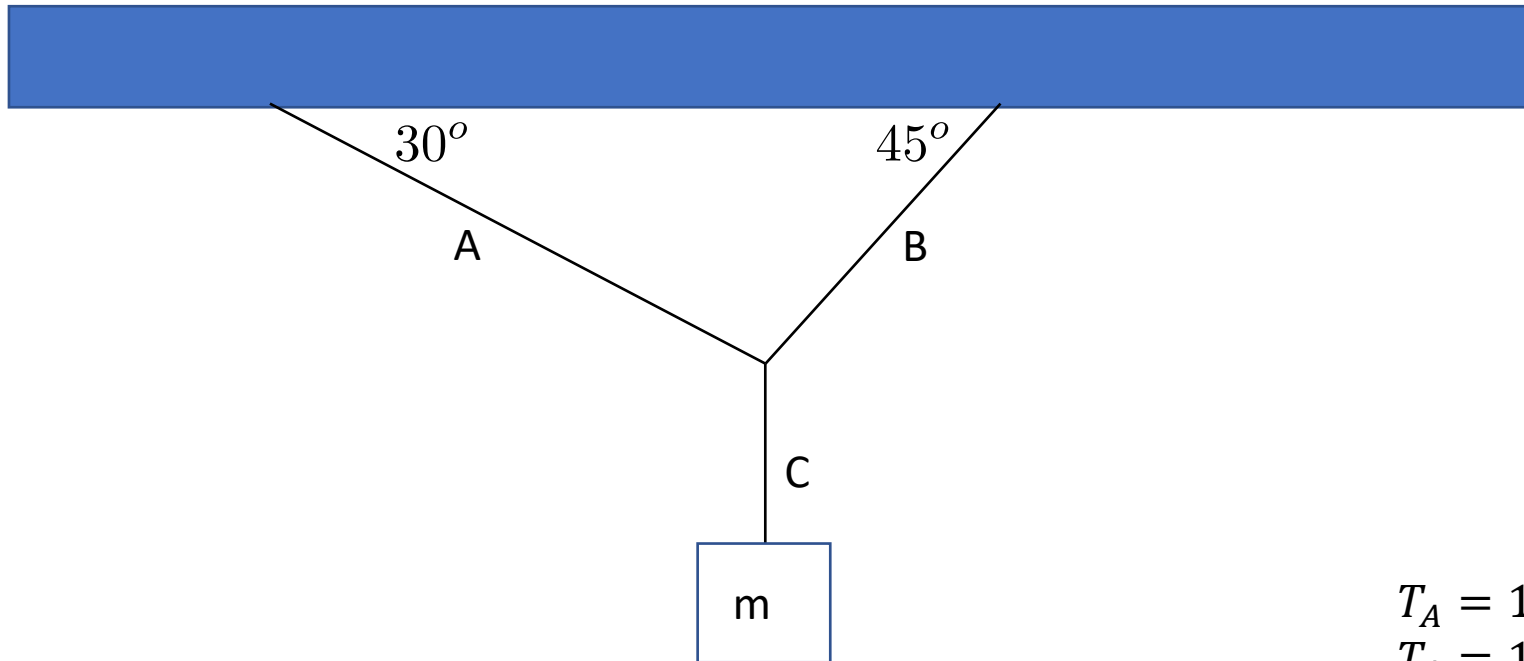
בדיקה - האם הפתרון הגיוני?

יחידות – כל הגדלים חסרי יחידות חוץ מ  $g$  שלה יחידות של תאוצה. לכן היחידות של צד ימין הן יחידות של תאוצה כדרוש.

נסתכל על מקרי קצה:

1. שיפוע השואף ל  $\alpha = 90$ . במקרה זה  $\cos\alpha = 0$  ו  $\sin\alpha = 1$  והתאוצה מתקרבת לנפילה חופשית  $a_x = g$
2. שיפוע השואף ל  $\alpha = 0$ . במקרה זה  $\cos\alpha = 1$  ו  $\sin\alpha = 0$  התאוצה תהיה שלילית  $a_x = -g\mu_k$  והגוף יגיע לעצירה

משקולת שמסתה  $m = 15\text{kg}$  תלויה בעזרת שלושה חוטים כמודגם באיור. מהן המתיחויות בחוטים?

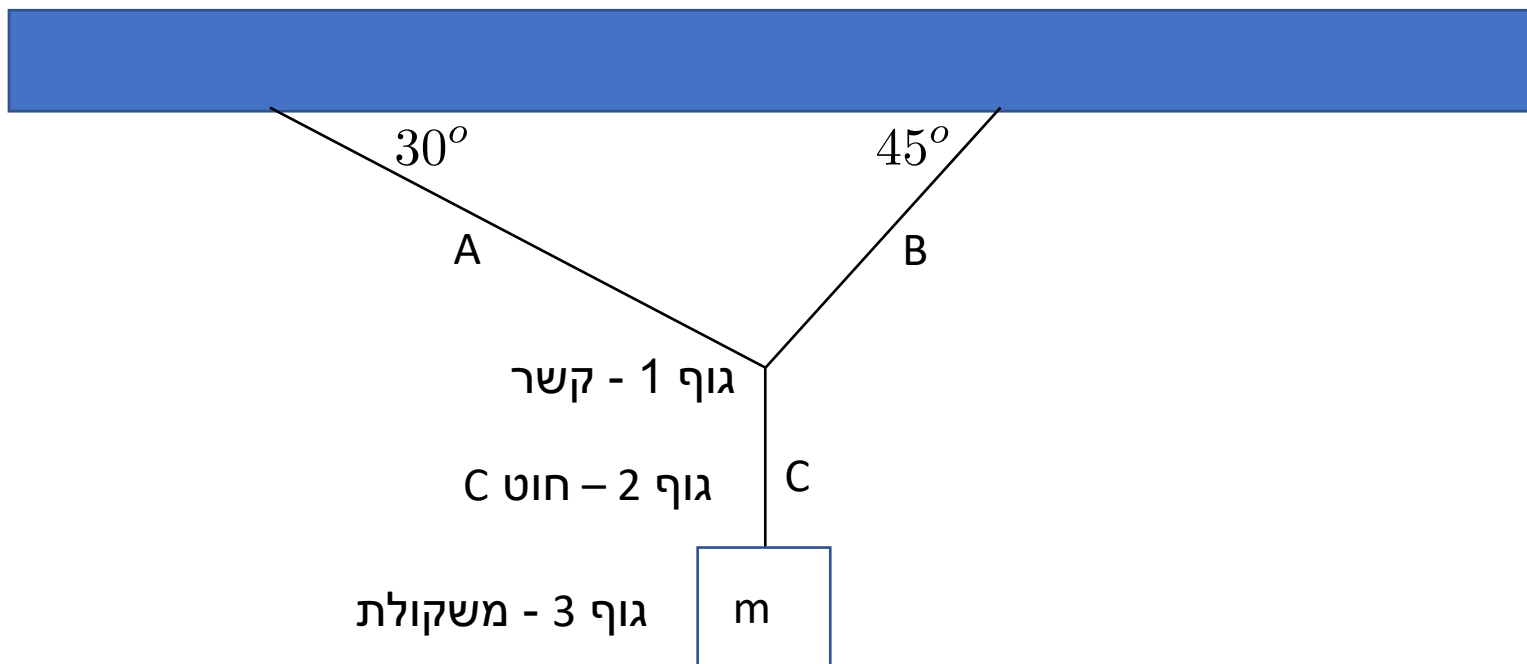


$T_A = 108\text{ N}, T_B = 132\text{ N}, T_C = 147\text{ N} \quad .1$

$T_A = 115\text{ N}, T_B = 144\text{ N}, T_C = 180\text{ N} \quad .2$

$T_A = 208\text{ N}, T_B = 162\text{ N}, T_C = 147\text{ N} \quad .3$

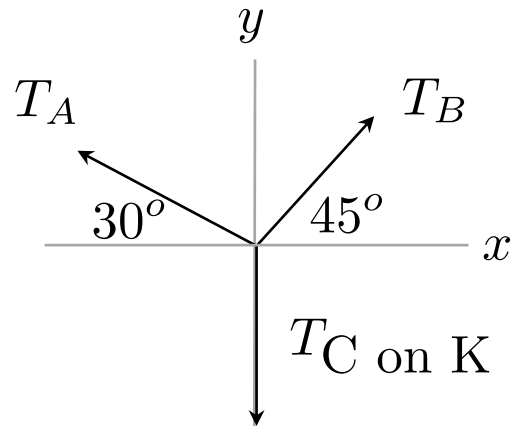
## איור סכמטי – במקרה זה נתון



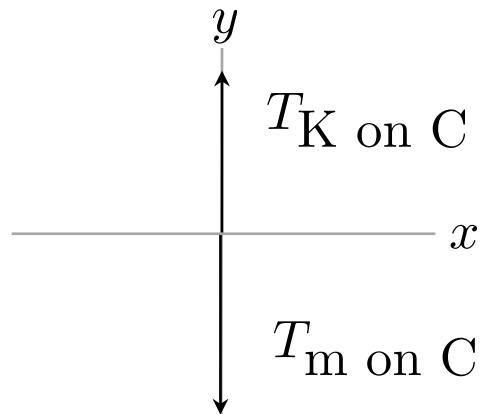
כדי לפתור נתייחס אל הקשר בין החוטים כאל גוף חסר מסה.  
לכן יש לנו 5 גופים – 3 חוטים, קשר ומשקולת.  
כפי שנראה, מספיק לצייר דיאגרמות גוף חופשי עבור הקשר, המשקולת וחבל C.



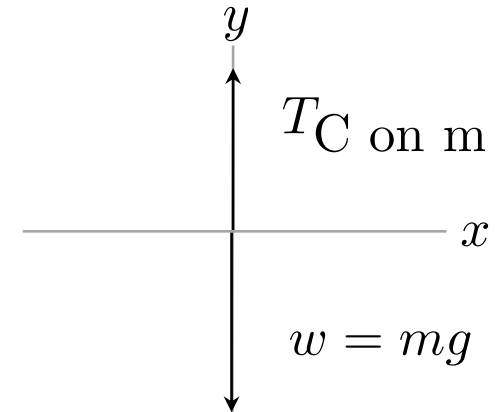
דיאגרמת גוף חופשי - קשר



דיאגרמת גוף חופשי - חבל C



דיאגרמת גוף חופשי - משקולת



נתחיל מחוט C: פועלים כוחות אך ורק בכיוון y והחוט לא מאיץ, לכן החוק השני של ניוטון נותן:

$$T_{K \text{ on } C} - T_{m \text{ on } C} = 0$$

ולכן אפשר לרשום:

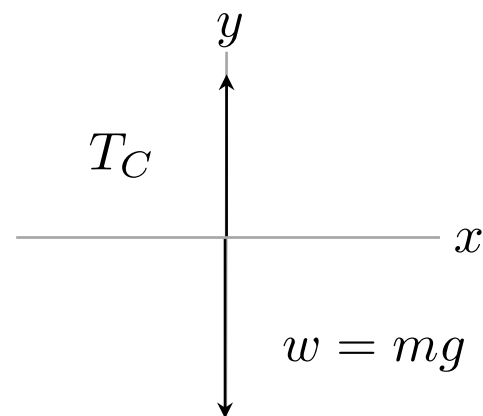
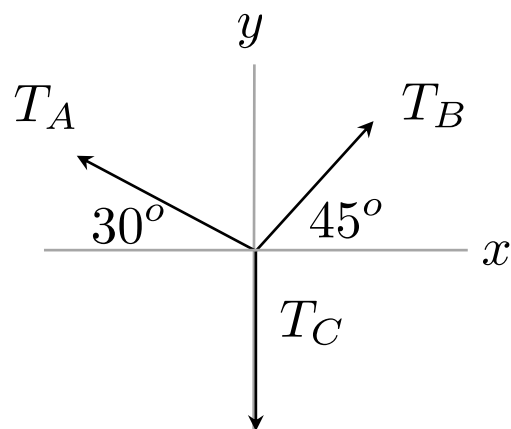
$$T_{K \text{ on } C} = T_{m \text{ on } C} = T_C$$

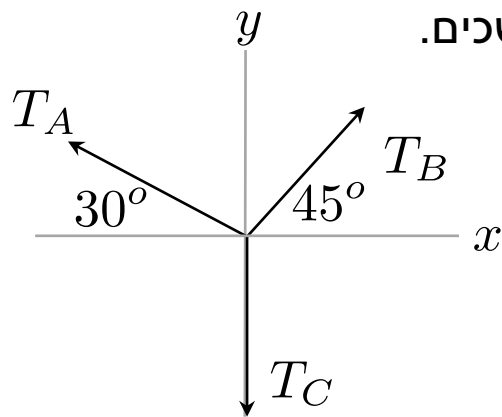
כמו כן, לפי החוק השלישי של ניוטון:

$$T_{C \text{ on } K} = T_{K \text{ on } C} = T_C$$

$$T_{m \text{ on } C} = T_{C \text{ on } m} = T_C$$

לאור זאת, נרשום מחדש את דיאגרמות הגופים:





בניח שלקשר מסה 0 ולכן פועלים עליו אך ורק מתיחויות החוטים שמפעילים עליו כוחות מושכים.  
 הקשר נמצא במנוחה ולכן אין תאוצה ולכן, לפי חוק 2 של ניוטון, סכום הכוחות הוא 0  
 גם ברכיב x וגם ברכיב y.

נכתוב את משוואת הכוחות לפי רכיבי x ו y.

רכיב x:

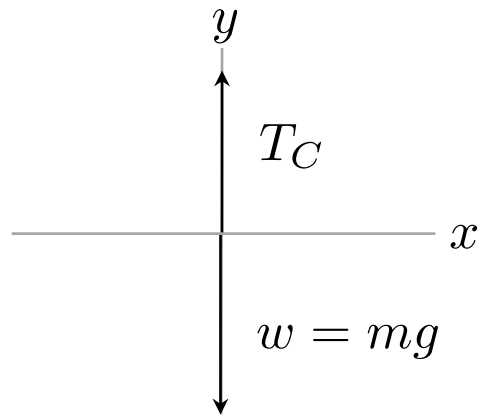
$$\sum F_x = T_B \cos 45 - T_A \cos 30 = 0$$

רכיב y:

$$\sum F_y = T_B \sin 45 + T_A \sin 30 - T_C = 0$$

יש שתי משוואות עם 3 נעלמים ולכן צריך לכתוב גם משוואות עבור גוף 2 (המשקולת).

נצייר את דיאגרמת הגוף החופשי של המשקולת:



מרכיב  $y$  נקבל:

$$-T_C = W = -mg$$

או:

$$T_C = mg = 147N$$

נפתור את סט המשוואות:

$$T_B \cos 45 - T_A \cos 30 = 0$$

$$T_B \sin 45 + T_A \sin 30 = mg$$

$$T_B = T_A \frac{\cos 30}{\cos 45}$$

$$T_A \tan 45 \cos 30 + T_A \sin 30 = mg$$

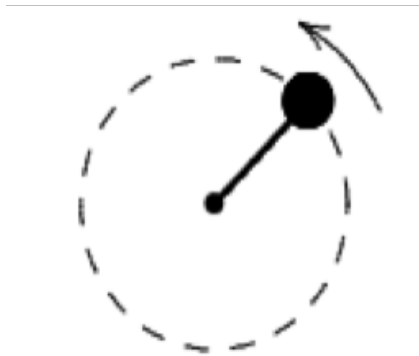
$$T_A (\sin 30 + \tan 45 \cos 30) = mg$$

$$T_A = 147 \text{ N} / (\sin 30 + \tan 45 \cos 30) = 108 \text{ N}$$

$$T_B = T_A \frac{\cos 30}{\cos 45} = 132 \text{ N}$$

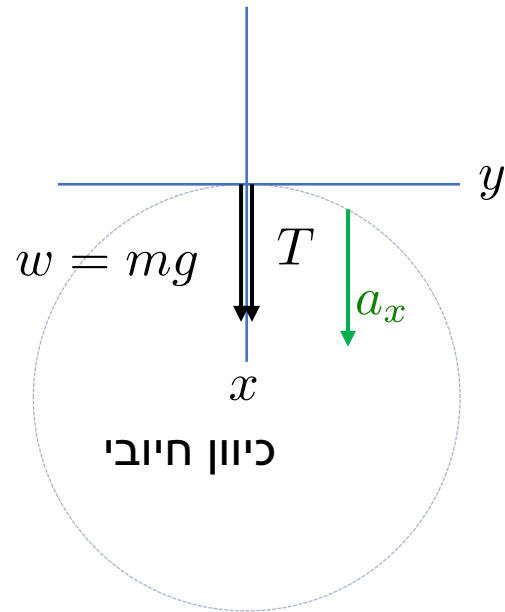
כלומר: תשובה מס' 1 היא הנכונה.

כדור ברזל מתנדנד במעגל אנכי בקצה מיתר באורך  $0.7\text{m}$ . מהי המהירות המינימלית של הכדור בנקודה העליונה כך שיעבור אותה כאשר המיתר מתוח?



- 1.3 m/s (a)
- 2.6 m/s (b)
- 3.9 m/s (c)
- 6.9 m/s (d)
- 9.8 m/s (e)

על מנת להבין את הכוחות הפועלים בבעיה, נצייר דיאגרמת גוף חופשי עבור הגוף כאשר הוא נמצא בשיא הגובה:



נבחר את הכיוון החיובי של ציר ה  $x$  ליהיות כלפי מטה מכיוון שהגוף מאיץ כלפי מטה.

שימו לב שאנחנו מציירים את התאוצה בצד מכיוון שהיא אינה כוח. אל תשכחו – גם  $m\vec{a}$  איננו כוח!

לפי החוק השני של ניוטון:

$$ma_x = T + w = T + mg$$

שימו לב שאנחנו כותבים את הכוחות **ביחס למערכת כדור הארץ**, לא מערכת כדור הברזל מכיוון שמערכת כדור הארץ היא מערכת התמדית בעוד שכדור הברזל נע בתנועה מעגלית ולכן מאיץ.

מכיוון שהגוף נע בתנועה מעגלית מתקיים הקשר הבא בין המהירות והתאוצה הרדיאלית:

$$a_x = a_r = \frac{v^2}{R}$$

ברגע שהגוף נמצא בשיא הגובה, התאוצה בכיוון האנכי היא גם בכיוון הרדיאלי ולכן:

$$m \frac{v^2}{R} = T + mg$$

על מנת שהחוט יישאר מתוח ולא יתחיל להתקפל, מתיחות החוט חייבת להיות גדולה או שווה ל 0. המהירות המינימלית בה זה קורה היא:

$$m \frac{v^2}{R} = mg$$

1.3 m/s (a)

2.6 m/s (b)

3.9 m/s (c)

6.9 m/s (d)

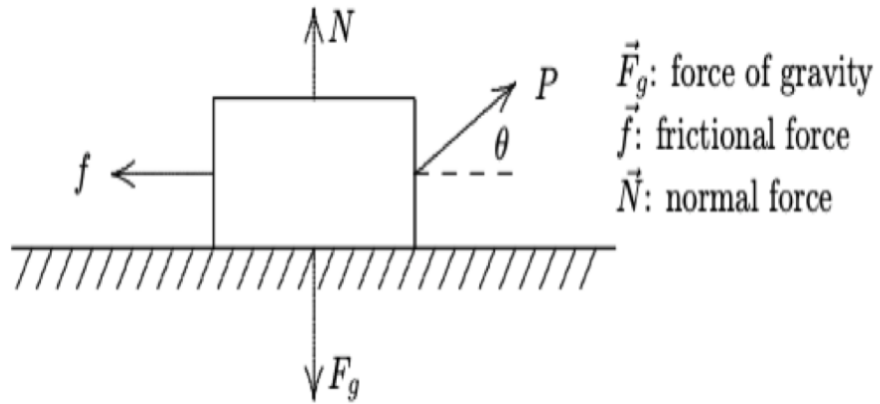
9.8 m/s (e)

$$v = \sqrt{Rg} \approx 2.6 \frac{m}{s}$$

במהירות גבוהה יותר התאוצה הצנטריפטלית תהיה גדולה יותר וכוח הכבידה לא יספיק בשביל לאזן אותה. במקרה זה מתיחות החוט תהיה גדולה מ 0 והמתיחות ביחד עם כוח הכבידה יאזנו את התאוצה הצנטריפטלית.



3. ילד מושך קופסת עץ לאורך רצפה אופקית מחוספסת במהירות קבועה באמצעות כוח  $P$  - כפי שמוצג בתרשים.  $f$  הוא גודל כוח החיכוך,  $N$  הוא גודל הכוח הנורמלי, ו  $F_g$  הוא גודל כוח הכבידה. איזה מההיגדים הבאים חייב להיות נכון?



$P = f$  and  $N = F_g$  (a)

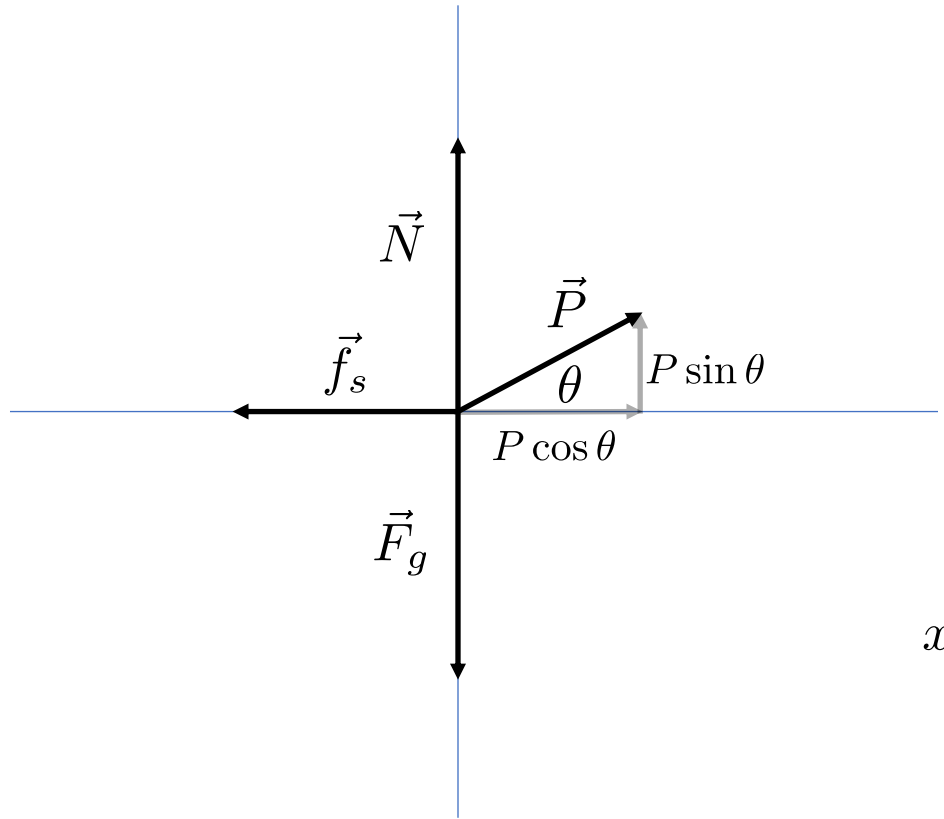
$P = f$  and  $N > F_g$  (b)

$P > f$  and  $N < F_g$  (c)

$P > f$  and  $N = F_g$  (d)

(e) אף אחד מאלה

כרגיל, נתחיל מדיאגרמת גוף חופשי:



מכיוון שנתון לנו שהילד מושך את הקופסא במהירות קבועה, אנו יודעים שאין תאוצה ולכן ששקול הכוחות הוא 0:

$$\vec{F}_T = m\vec{a} = 0$$

זה אומר שגם סכום הכוחות בכל אחד מהכיוונים מתאפס.

בציר ה X:

$$P \cos \theta - f_s = 0$$

$$P \cos \theta = f_s$$

$$P = f_s / \cos \theta$$

מכיוון ש  $\cos \theta < 1$  אנחנו מסיקים ש:

$$P > f_s$$

בציר ה Y:

$$N + P \sin \theta - F_g = 0$$

$$N = F_g - P \sin \theta$$

לכן:

$$N < F_g$$

$$P = f \quad \text{and} \quad N = F_g \quad (a)$$

$$P = f \quad \text{and} \quad N > F_g \quad (b)$$

$$P > f \quad \text{and} \quad N < F_g \quad (c)$$

$$P > f \quad \text{and} \quad N = F_g \quad (d)$$

(e) אף אחד מאלה