

חקר מצנחים – תשובה למורה - עמותת בשער

חקר מצנחים

כיתה ט' ביצעה ניסוי הבודק השפעת שונות על מהירות הצניחה. קבוצה שחקרה השפעת מסת הצנחן על מהירות הצניחה הממוצעת, קיבלה בתוצאות הניסוי שככל שמסת הצנחן גדלה, גם מהירותו גדלה. כיצד ניתן להסביר זאת במסגרת הידע של התלמידים? קבוצה נוספת בדקה את השפעת גובה הצניחה על מהירות הצניחה הממוצעת וראתה שככל שגובה הצניחה גבוה יותר, כך מהירות הצניחה גדולה יותר. כיצד ניתן להסביר זאת?

חקר מצנחים - תשובה למורה

השאלות שעלו בשתי קבוצות המחקר - מעניינות ביותר. על מנת לענות עליהן – נברר תחילה מה הם הכוחות הפועלים על מערכת הצנחן והמצנח בעת נפילתם. נתחיל מהמקרה הפשוט ביותר:

אילו הצנחן היה נופל בריק, ללא התנגדות האוויר, הרי נפילתו היתה **נפילה חופשית** בהשפעת כוח הכובד בלבד: $\Sigma F = mg$ כוח הפועל כלפי מטה (לכיוון מרכז כדור הארץ). כוח זה היה גורם לתנועה בתאוצה a קבועה (כלפי מטה לכיוון מרכז כדור הארץ), על פי החוק השני של ניוטון:

$$\Sigma F = m a$$

$$m g = m a$$

$$g = a \quad \text{כלומר, התאוצה:}$$

ולכן, במקרה של נפילה חופשית בריק, המהירות גדלה והולכת, ככל שזמן הנפילה t נמשך:

$$v = v_0 + g t$$

תוצאה זו מוכרת לתלמידים ממשוואות התנועה במקרה של תנועה שוות תאוצה. עד כאן דיון במקרה של נפילה בריק – בלא התנגדות האוויר.

אך, במציאות, הצנחן צונח באוויר ולכן עלינו לקחת בחשבון את הכוח שמפעיל האוויר במגמה המעכבת את התנועה של הגוף הנופל. כוח ההתנגדות לתנועה שמפעיל האוויר הנו מעין כוח חיכוך. כוח זה נקרא **כוח גרר**. כוח הגרר פועל במגמה המנוגדת לתנועת הצנחן (וליתר דיוק, כוח הגרר פועל בכיוון המנוגד למהירות היחסית שבין הגוף הנע ובין התווך, האוויר, בו נע הגוף). כיוון שהצנחן נופל כלפי מטה, יפעל כוח הגרר במגמה הפוכה, כלומר, כלפי מעלה. כוח הגרר הנו כוח מורכב התלוי בצורה האווירודינמית של הגוף הנע ובמהירות התנועה. המצנח בנוי כך שיגרום להיווצרות כוח גרר מרבי, על מנת לעכב את הנפילה ככל האפשר, ולהביא את הצנחן לקרקע בשלום, במהירות בטוחה וללא סכנת התרסקות.

גודלו של כוח הגרר (Drag force) מסומן באות D .

ניסויים מראים כי במקרים רבים, גודלו של כוח הגרר תלוי בגודל המהירות היחסית v בין הגוף הנע לבין התווך (ה'זורם', במקרה שלנו, האוויר).

כוח הגרר מתקבל באופן ניסויי, ומתואר בנוסחה:

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2$$

כאשר: C_D הנו מקדם הגרר drag coefficient

ρ (האות היוונית רו) מייצגת את צפיפות האוויר (מסה ליחידת נפח)

A שטח החתך האפקטיבי של הגוף (השטח של חתך בניצב לכיוון המהירות v)

v גודל המהירות היחסית בין הגוף הנע (המצנח) לבין התווך (ה'זורס', במקרה שלנו, האוויר).

משום כך, שקול הכוחות הפועלים על מערכת הצנחן והמצנח הוא:

$$\Sigma F = m g - D \quad \text{בכיוון התנועה (כלפי מטה).}$$

ניתן לראות כי בתחילת הנפילה, כאשר מהירות הצנחן קטנה, גם כוח הגרר D קטן, ואז פועל הכוח השקול כלפי מטה, ולכן הצנחן מואץ כלפי מטה, ומהירותו הולכת וגדלה.

ככל שמהירות הנפילה v גדלה, כך גדל יותר ויותר כוח הגרר,

עד שבמהירות מסוימת, מתאזן כוח הכובד מול כוח הגרר ושקול הכוחות הנו אפס.

כאשר שקול הכוחות הנו אפס, הצנחן ינוע במהירות קבועה ובקו ישר (כלפי מטה). תוצאה זו נובעת כמוכר, מהחוק הראשון של ניוטון, חוק ההתמדה.

מהירות קבועה זו נקראת: 'מהירות הצניחה' או המהירות הסופית, ומסומנת: V צניחה.

איזון כזה של הכוחות יתקיים **אם המצנח** (שטח החתך A של המצנח), **מספיק גדול** ביחס למסת הצנחן, ואם הצנחן עבר מרחק צניחה מספיק וצבר את **המהירות הדרושה** על מנת שכוח הגרר שיצור המצנח – ישתווה לכוח הכובד שבו נמשך הצנחן אל כדור הארץ.

מרגע שהושגה מהירות הצניחה - הצנחן עם המצנח ימשיכו לנוע במהירות קבועה.

ולכן, מכאן ואילך, מהירותם אינה תלויה בגובה הנפילה ולא בזמן הנפילה.

זאת כמוכר בהנחה שהמצנח מספיק גדול על מנת לגרום לגרר (התנגדות האוויר לתנועה) מספיק גדול – כך שתושג מהירות הצניחה לפני שיגיע הצנחן לקרקע.

אם המצנח אינו גדול מספיק, כך שכוח הגרר שיוצר המצנח אינו מספיק גדול בהשוואה לכוח הכובד של הצנחן – **ימשיך הצנחן לנוע בתאוצה** ומהירותו תגדל עוד ועוד.

אם הגובה שבו מתרחשת הנפילה - מספיק גדול, יגיע הצנחן עם המצנח למהירות הצניחה המתאימה לגודל המצנח ולמשקל הצנחן – ומכאן ואילך ימשיך בתנועה במהירות קבועה – היא מהירות הצניחה המתאימה.

אנו מכנים בשם **'מרחק הצניחה'** את המרחק שהגוף חייב ליפול ממצב מנוחה, כדי להגיע למהירותו הסופית שהיא מהירות הצניחה.

[ליתר דיוק, אנו מגדירים את מרחק הצניחה: המרחק שהגוף חייב ליפול ממצב מנוחה

כדי להגיע ל- 95% ממהירותו הסופית].

ראו בהמשך הדין, טבלה של נתוני מהירות הצניחה ומרחק הצניחה עבור גופים שונים הנופלים באוויר.

אם גובה הנפילה אינו מספיק גבוה (גובה הנפילה קטן ממרחק הצניחה), הצנחן יתנגש בקרקע עוד לפני שהגיע למהירות הצניחה המתאימה. במקרה זה מהירותו הולכת וגוברת ככל שגובה הנפילה שלו גדול יותר.

כעת נוכל לענות לשאלות של שתי קבוצות המחקר:

הקבוצה הראשונה גילתה כי ככל שמסת הצנחן גדולה יותר – גם מהירות הצניחה גדולה יותר. תוצאה זו אכן מתיישבת היטב עם הדיון שלנו: הצנחן הכבד יותר, יאלץ לפול עד שמהירותו תגדל ותגרום לגרר גדול יותר שיאזן את כוח הכובד הגדול שפועל עליו.

כלומר, על מנת לאזן את כוח הכובד mg של הצנחן הכבד יותר דרוש כוח גרר D גדול יותר, ולשם כך דרושה מהירות v גדולה יותר.

מהירות הצניחה של הצנחן תהיה גדולה יותר – ככל שמסתו גדולה יותר. מרגע שהשיג הצנחן את מהירות הצניחה המתאימה לגודל המצנח שלו ולמשקלו – ימשיך לנוע באותה מהירות צניחה, וזו תישאר קבועה.

הקבוצה השנייה בדקה את השפעת גובה הצניחה על מהירות הצניחה הממוצעת וראתה שככל שגובה הצניחה גבוה יותר, כך מהירות הצניחה גדולה יותר. כיצד ניתן להסביר זאת?

כפי שהראינו קודם לכן: אם המצנח מספיק גדול, כך שהמצנח יצור כוח גרר מספיק גדול ביחס למשקל הצנחן – ואם גובה הנפילה מספיק גדול – יגיע הצנחן למהירות קבועה: היא מהירות הצניחה. כלומר, אם נתבונן בצנחן שעבר את מרחק הצניחה הדרוש על מנת להגיע למהירות הצניחה הקבועה – ניווכח כי מכאן ואילך מהירותו אכן קבועה ואינה תלויה בגובה ממנו החל את תנועתו.

תוצאות המחקר של הקבוצה השנייה מצביעות על כך שככל שגובה הצניחה גבוה יותר (במקרים שנבדקו על ידי הקבוצה השנייה) כך המהירות בה הגיע הצנחן לקרקע – גדולה יותר. מכאן אנו למדים כי המצנח לא היה גדול מספיק ולא סיפק כוח גרר מספיק גדול שיאזן את משקל הצנחן, וכן שגובה הנפילה לא היה גדול מ'מרחק הצניחה' הדרוש על מנת לאפשר למערכת הצנחן – מצנח להגיע ל'מהירות הצניחה' שהיא המהירות הקבועה המתאימה לאותו מצנח ולאותו צנחן.

לסיכום: תוצאות המחקרים של שתי קבוצות מתיישבות היטב עם הניתוח שערכנו כאן. מומלץ היה לכל קבוצה לבדוק עוד מספר מקרים שונים של גודל מצנח ביחס למשקל הצנחן. בדיקה כזו עשויה הייתה לבחון את תקפותו של הניתוח שערכנו כאן, במקרים השונים.

המחקרים שעשו שתי קבוצות הם מחקרים מעניינים ביותר והחוקרים הצעירים ראויים להערכה רבה ויישר כוח – על המחקרים שערכו, ולקראת המשך המחקרים הבאים!

מקורות לעיון נוסף למורה:

קמינגו, קרן; לווז, פריסילה ו'; רדיש, אדוורד פ'; קוני, פטריק ג'; טיילור, אדווין פ' (2010). **מבנים פיזיקה – מכניקה לקורסי מבוא למהנדסים ומדענים**. מבוסס על יסודות הפיזיקה, המהדורה השישית של רזניק והלידיי. עמודים 177 – 179 סעיף: 5-6 **כוח גרר ומהירות סופית**. ירושלים: הוצאת ספרים על שם מאגנס, האוניברסיטה העברית, ירושלים ומכללת אורט בראודה.

במקור הזה נערך דיון מעניין לבעיה הנדונה, ונתונים מספר נתונים מרתקים עבור המהירות הסופית = מהירות הצניחה של גופים שונים באוויר:

<u>גוף</u>	<u>מהירות הצניחה (m/s)</u>	<u>95% מרחק הצניחה* (m)</u>
כדור ברזל (מהדיפת כדור ברזל)	145	2500
צניחה חופשית (טיפוסית)	60	430
כדור טניס	31	115
כדור סל	20	47
כדור פינג פונג	9	10
טיפות גשם (רדיוס = 1.5 mm)	7	6
צנחן (טיפוסי)	5	3

* זהו המרחק שהגוף חייב ליפול ממצב מנוחה כדי להגיע ל- 95% ממהירותו הסופית.

מקורות נוספים:

אביר, דוד (1986). **אויורודינמיקה**. תל אביב: משרד הבטחון – ההוצאה לאור. עמודים: 49 – 51 סעיף: המצנח.

אגמון, דוד (2004). **מכניקה קלסית ויחסותית**. הוצאת המחבר. עמוד 143 – 144 סעיף: כוח התלוי במהירות – בעיית הצנחן.

בברכה חמה ובהצלחה!

ד"ר עמוס כהן

מרכז אחר"ת ואורנים – המכללה האקדמית לחינוך.