

בכח השרירים – ביופיזיקה במערכת השלד

פיתוח וכתבייה: ד"ר איתי ללזר

ייעוץ מדעי ופדגוגי: פרופ' ענת ירדן, ערן קפלן, ד"ר יעל שוורץ

מבוא

המושג STEM הפך בשנים האחרונות להיות מושג מרכזי בתכנון תכניות לימודים (דרסלר וסלע, 2023). ביופיזיקה הוא ענף במדע העוסק בחקר תופעות פיזיקליות ביצורים חיים. מכאן שמדובר בענף מדעי בינתחומי המתאים ליישום מתודולוגיה של STEM בהוראה. ביחידה זו בחרנו להתמקד בעקרונות פיזיקליים של כוחות ותנועה לבחון את האופן בו הם באים לידי ביטוי במערכת השלד.

[באוגדן קודם](#) שפרסמנו התמקדנו בהיבטים כמותיים ופיזיקליים של מערכת ההובלה באדם (ללזר, 2023), באוגדן זה נתמקד בפיזיקה כדיסציפלינה מרכזית וביולוגיה כדיסציפלינה מלווה, בהתאם למודל שפותח (ללזר, 2023). אחד האתגרים בכתובת חומרים חדשים הוא כיצד לשלב אותם עם תכנית הלימוד הקיימת. אנו מציעים לכל מורה לבחור את התכנים שמתאימים לו באופן אישי ולהתאימם לכיתות אותן הוא מלמד. האוגדן שלפניכם נכתב כמדריך למורה, אך תמצאו בו מגוון פעילויות והתנסויות עבור התלמידים.

בפרק הראשון של האוגדן נתאר ונחקור סוגי מנופים שונים ונקשור זאת לפרק אינטראקציה וכוחות, העוסק בחוקי ניוטון בכיתה ח'. בפרק השני נתמקד במערכת שרירי השלד בגוף האדם, ונשאל מהיכן מגיע הכוח של השרירים להניע את השלד. בפרק השלישי, נתבסס על שני הפרקים הראשונים של האוגדן ונחקור ונזהה מנופים בגוף האדם. בנוסף נבצע ניסויים המדגימים את חוק המנוף, ונלמד לחשב את חוק המומנט.

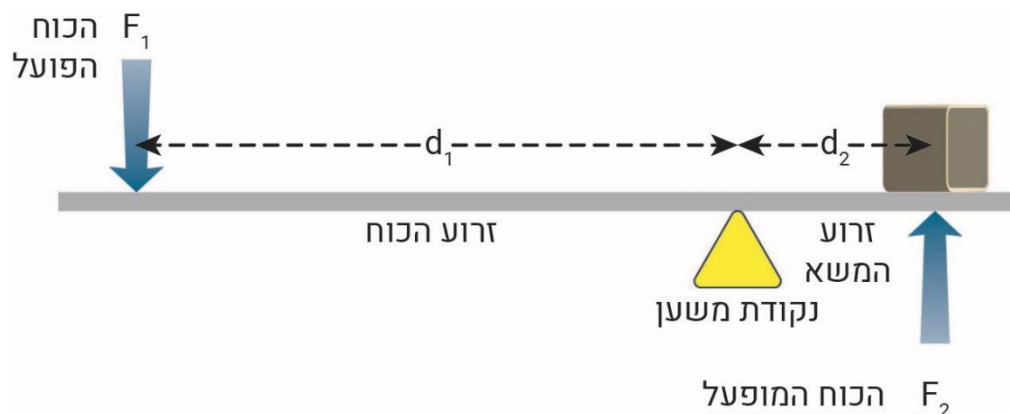
חלקים מהנושאים בהם נעסוק נלמדים בדרך זו או אחרת לאורך חטיבת הביניים. מערכת השלד מוזכרת בקצרה בכיתה ז' ובכיתה ח' לומדים התלמידים על מנופים. בכיתה ט' מקבלת הפיזיקה דגש כמותי יותר, וביולוגיה מתעמקים במבנה התא ומנגנונים תאיים. תכנים אלו יסייעו לנו בדיון שלנו סביב הנושא הרחב "ביופיזיקה".

תוכן

3.....	פרק ראשון – מנופים
4.....	חוק המנוף והמומנט
5.....	שיעור 1: סוגי מנופים
6.....	שיעור 2: חוקרים את חוק המנוף
8.....	פרק שני – מערכת השרירים
9.....	שרירי השלד
10	מאפיינים תפקודיים של שרירי מערכת השלד
10	תהליך כיווץ השריר
11	סוגים של סיבי שרירי שלד
12	שיעור 3: בונים דגם של שריר
13	פרק 3 – מנופים בגוף האדם
13	המפרקים
14	מנופים בגוף האדם
15	שיעור 4 – מנופים בגוף האדם
16	חלק ראשון – מזהים מנופים בגוף האדם
16	חלק שני : בונים דגם של זרוע נעה
17	שיעור 4: פתרונות למורה
18	שיעור 5: בונים דגם של מנוף הזרוע
20	שיעור 5: פתרונות למורה
21	שיעור 6 מהו מומנט? (שיעור אתגר)
23	שיעור 6 פתרונות למורה

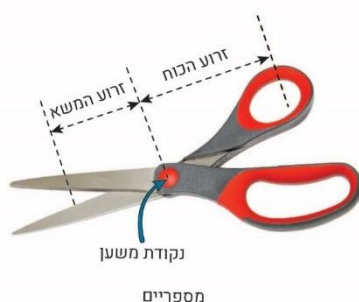
פרק ראשון – מנופים

מנופים הם מכונות פשוטות בהן השתמשו אנשים לביצוע עבודות שונות עוד מימי קדם. מנגנון הפעולה של המנוף הוא פשוט יחסית. אנו מפעילים כוח על מוט הנשען על נקודת משען, והמוט בתגובה מפעיל כוח על מסה אותה אנו רוצים להרים. את הזרוע שעליה פועל הכוח שאנו מפעילים (F_1) מכנים **זרוע הכוח**, ואת הזרוע שעליה מונח הגוף שאותו אנו מעוניינים להרים, כלומר המשא, מכנים בשם **זרוע המשא** (תמונה 1).

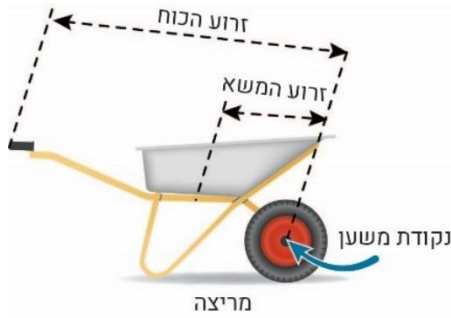


תמונה 1: מערכת מנוף. זרוע הכוח עליה מופעל הכוח F_1 , המרחק מנקודת המשען הוא d_1 . זרוע המשא עליה מופעל כוח F_2 על ידי המוט. המרחק מזרוע המשא אל נקודת המשען הוא d_2 . שימו לב שהכוח F_2 הוא הכוח שמפעיל המוט כלפי מעלה כנגד הגוף אותו אנו רוצים להרים. (מעובד מתוך מטמון חדש הוצאת מכון ויצמן).

אנו מבחינים בשלושה סוגי מנופים בהתאם למיקום של נקודת המשען ביחס למקום המאמץ (הכוח שאנו מפעילים) והעומס (הכוח שצריך להפעיל כנגד הגוף שרוצים להרים). אם מיקום העומס קרוב יותר לנקודת המשען מאשר מיקום המאמץ, אז המאמץ שיידרש לייצור תנועה יהיה קטן מהעומס.



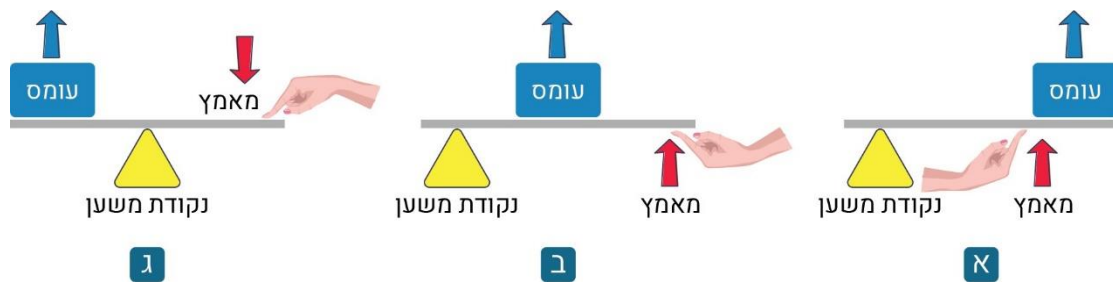
מנוף מסוג ראשון: מנוף שבו נקודת המשען נמצאת בין העומס לבין מקום המאמץ. כמו במספריים, שבהן נקודת המשען ממוקמת בבורג המרכזי, הידיים יוצרות את המאמץ, והעומס נוצר על ידי החפץ שרוצים לגזור.



מנוף מסוג שני: העומס נמצא בין נקודת המאמץ לנקודת המשען. דוגמאות למנוף מסוג זה: מפצח אגוזים, מריצה. מנוף מסוג זה מאפשר הפעלת מירב הכח על ההתנגדות.



מנוף מסוג שלישי: המאמץ נמצא בין נקודת המשען לבין העומס. במנוף מסוג זה זרוע הכח קצרה מזרוע המשא כך שיש להשקיע כח רב יותר מאשר בפעולה ללא מנוף. משתמשים במנוף מסוג זה כדי לקבל פעולה לאורך דרך ארוכה יותר, דוגמה למנוף מסוג זה הוא מלקטת.



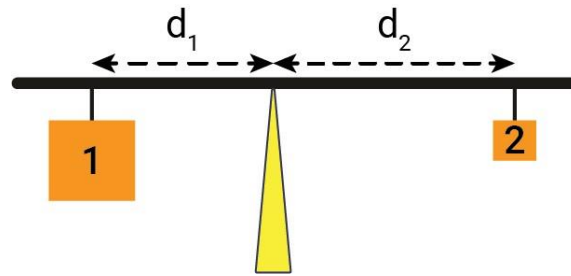
תמונה 2: סוגי מנופים. שימו לב למיקום של נקודת הפעלת הכוח בכל אחד מהמנופים. א) מנוף סוג שלישי – נקודת הפעלת הכוח (המאמץ) נמצאת בין נקודת המשען לבין העומס. ב) מנוף סוג שני – העומס נמצא בין נקודת המשען לבין נקודת הפעלת הכוח. ג) מנוף סוג ראשון – נקודת המשען נמצאת בין העומס לבין נקודת הפעלת הכוח.

להמשך קריאה והרחבה ראו הפניה לפרק העוסק במנופים בספר "[אינטראקציה כוחות ותנועה](#)", סדרת מטמו"ן חדש.

חוק המנוף והמומנט¹

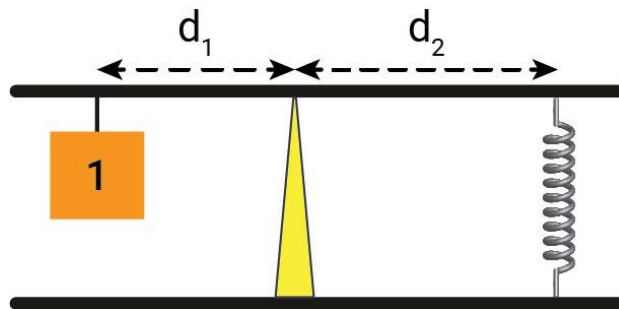
ארכימדס מתאר מערכת קשיחה שנשענת על "נקודת משען", שיש בה שני גופים שתלויים משני הצדדים של נקודת המשען (במרחקים אופקיים d_1 ו- d_2 מנקודת המשען, בהתאמה). ארכימדס מראה כי כדי שיתקיים שיווי משקל, יחס המרחקים (d) אמור להיות הפוך ליחס המשקלים (m) של שני הגופים, כאשר נתון כי מסה 1 כפולה ממסה 2 (תמונה 3). מכאן כדי שיתקיים מצב של שיווי משקל, מכפלת הכוח במרחק האופקי מן הציר, בשני הצדדים, אמורה להיות שווה:

$M_2 d_2 = M_1 d_1$ (הכול בערכים מוחלטים).



תמונה 3. מערכת מנוף המקיימת את הכלל: $M_2 d_2 = M_1 d_1$

במקום לדבר על משקל, אפשר לדבר על כוח באופן כללי. במערכת שבתמונה שיווי משקל יתקיים אם $F_2 d_2 = F_1 d_1$. כלומר איזון המערכת מתקבל כאשר המכפלות Fd שוות. בהמשך היחידה נפרט על כך ועל חוק המומנט.



תמונה 4. מערכת מנוף מאוזנת בהתאם לחוק המומנט.

¹מעובד באישור משה"ח מתוך "כוח, אנרגיה ומכונה". פיתוח הפעילות : זאב קרקובר, המכון למצוינות בהוראה, המרכז הישראלי למצוינות בחינוך.

שיעור 1: סוגי מנופים

1. צפו [בסרטון](#) ותארו את המבנה הכללי של מנוף, והסבירו במילים שלכם מהו המנגנון מאחורי פעולתו.
2. לפניכם מגש עם מספר מכשירים (מספריים, מפצח אגוזים, מלקטת, קוצץ ציפורניים, מריצה, פותחן בקבוקים). מיינו את המכשירים לקבוצות על פי סוג המנוף אליו הם משתייכים. עבור כל מכשיר אפיינו את חלקי המנוף השונים.
3. הוסיפו מספר מנופים מחיי היום-יום שאינם מופיעים ברשימה. ארגנו את התוצאות בטבלה.

טבלה 1: חלוקת מכשירים על פי סוג המנוף

מכשיר	סוג המנוף	נקודת משען	זרוע הכוח	זרוע המשא

שיעור 2: חוקרים את חוק המנוף

מעובד באישור משה"ח מתוך "כוח, אנרגיה ומכונה". פיתוח הפעילות : זאב קרקובר, המכון למצוינות בהוראה, המרכז הישראלי למצוינות בחינוך.

מטרת השיעור: התלמיד ינסח את חוקר המנוף (חוק המומנט) ויסביר אותו.

אמצעים דרושים:

- מקל מטאטא באורך של 1 מטר עד 1.5 מטר.
- מדבקות לסימון המקל במרחקים קבועים מומלץ כל 20 ס"מ.
- שני מנקי מקטרות, או חוט לקשירת הבקבוקים למוט.
- שני בקבוקי מים ריקים בנפח של 500 מ"ל או משקולות.



תמונה 5: מערכת ניסוי למנוף המורכבת ממקל מטאטא, כיסא, ושני בקבוקי מים המלאים בנפח שונה.

משימה ראשונה

1. מקמו את המוט כך שמרכז המוט יונח על הכסא. ודאו כי המוט מאוזן.
2. קחו שתי מסות זהות או מלאו כל אחד מהבקבוקים ב 100 מ"ל מים.
3. תלו על המוט בקבוק אחד מכל צד בעזרת מנקה המקטרות.
4. ציינו בטבלה את המרחק משמאל ומימין לנקודת המשען בהם המוט היה מאוזן.
5. חזרו על הפעולה בחמישה מרחקים שונים
6. חשבו את ההפרש בין שני המרחקים.

טבלה 2:

מדידה מספר	מרחק מימין לנקודת המשען (ס"מ)	מרחק משמאל לנקודת המשען (ס"מ)	הפרש בין המרחקים.
1			
2			
3			
4			
5			

משימה שנייה

1. מקמו את המוט כך שמרכז המוט יונח על הכיסא. ודאו כי המוט מאוזן.
2. קחו שתי מסות כך שמסה m_1 תהיה כפולה מהמסה m_2 .
3. תלו על המוט בקבוק אחד מכל צד בעזרת מנקה המקטרות.
4. ציינו בטבלה את המרחק משמאל ומימין לנקודת המשען בהם המוט היה מאוזן.
5. חזרו על הפעולה עם אותן המסות אבל במרחקים שונים.
6. עבור כל מסה חשבו את היחס בין המסות ואת היחס בין המרחקים ממרכז המוט.
7. נסחו כלל המתאר את הקשר שמצאתם.

טבלה 3: הקשר בין המסה והמרחק מנקודת המשען משני צידי המנוף.

m_1 (גרם)	m_2 (גרם)	$(m \cdot o) d_1$	$(m \cdot o) d_2$	m_1/m_2	$m_1 d_1$	$m_2 d_2$
10	20	10				
20	40	10				
10	20	20				
20	40	20				
10	20	30				
20	40	30				

אם פעלתם כהלכה הגעתם למסקנה כי עבור כל שתי מסות מתקיים הכלל הבא:

$$m_1 d_1 = m_2 d_2$$

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{m_1}{m_2}$$

נוסחה 1: שתי דרכים להציג את חוק המנוף. הנוסחאות הללו מאפשרות להבין מה היחס בין הזרועות ומה המסה שצריך לשים כאיזון למסה אותה רוצים להרים, כדי לתכנן מנוף מיטבי להרמתה.

פרק שני – מערכת השרירים.

קשר לתוכנית הלימודים:

מערכת השרירים נלמדת בקצרה בכיתה ז' בפרק הדין בסוגים שונים של תאים. מנופים נלמדים בכיתה ח' בפרק הדין בכוחות ותנועה.

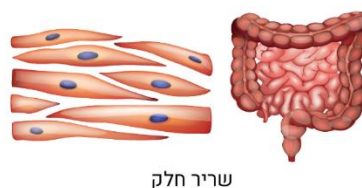
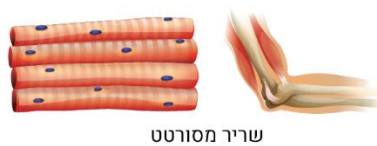
מטרות

1. התלמיד יתאר את המבנה האנטומי של שרירי השלד.
2. התלמיד יסביר כיצד המבנה האנטומי של שרירי השלד מאפשר את תפקודם.

מערכת השרירים

כ – 40-50% ממשקל גופו של אדם בוגר מורכב משרירים. מערכת השרירים אחראית על תנועת השלד על ידי כיווץ והרפיה של תאי רקמת השריר. כמו כן, אחראית המערכת על ייצור חום, הנעת נוזלים בגוף, וייצוב הגוף. לשם ביצוע תפקודים אלה, שרירי השלד ממירים אנרגיה כימית לאנרגיה מכנית, כדי ליצור כוח ולבצע עבודה וליצור תנועה. מבחינים בגוף בשלושה סוגים של שרירים: שרירי השלד, שריר הלב ושרירים חלקים (תמונה 4). קבוצות השרירים שונות אחת מהשנייה ברמה המיקרוסקופית, במיקום שלהן בגוף ובאופן שבו הן נשלטות על ידי מערכת העצבים המרכזית והמערכת האנדוקרינית (מערכת האחראית על הפרשת הורמונים שונים). ביחידה זו נתמקד במערכת שרירי השלד.

סוגי שרירים בגוף האדם



תמונה 6: סוגי שרירים בגוף האדם. (א) שריר השלד בעל מראה מפוספס ולכן נקרא גם שריר מסורט. (ב) שריר הלב, דומה במבנה לשריר השלד אבל בעל מבנה מיוחד. (ג) שרירים חלקים

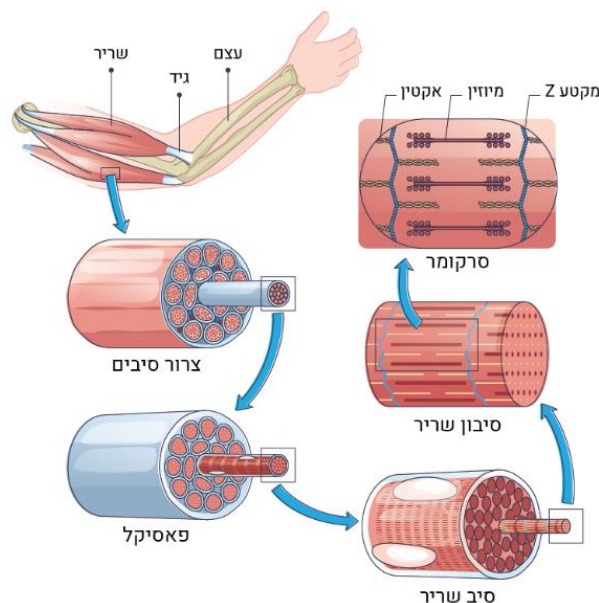
הם חסרים את מראה מפוספס של שרירי השלד. כמו כן, הם בלתי רצוניים והם ומופעלים על ידי מערכת העצבים האוטונומית. שרירים אלה מהווים את המרכיב המרכזי של איברים פנימיים כמו הקיבה, כלי הדם והרחם.

שרירי השלד

תאי השריר מתפתחים בשלב העוברי לאחר איחוי של מספר רב של תאים, כתוצאה מכך לשריר הבוגר יש מספר רב של גרעינים וצורתו גלילית וארוכה. בשל כך, נהוג לכנותם "סיבים". לאחר שהתרחש האיחוי, השריר מאבד מיכולתו להתחלק. מכאן שמספר סיבי שרירי השלד נקבע לפני הלידה. יחד עם זאת, מספר סיבי השריר יכול לגדול על ידי איחוי של תאים מיובלסטים (תאים בלתי ממויינים המהווים את המקור לתאי השריר). כתוצאה מתהליך זה מספר הגרעינים בתא החדש גדל וכך גם גודלו. תהליך האיחוי של מיובלסטים הוא תהליך מורכב מאד ועל כן לא נרחיב על כך.

אם נתבונן בחתך שריר שלד מהצד החיצוני ביותר לכיוון צידו הפנימי נבחין במספר רמות ארגון (תמונה 7). בצד החיצוני ביותר נמצא את מעטפת השריר חיצונית. בתוך המעטפת נמצא צורות של סיבי שריר הנקראים פאסיקלים (fasciculus) ועטופים במעטפת פנימית. כל פאסיקל מורכב מהמון סיבי שריר (muscles fibers) שעטופים אף הם במעטפת. סיב השריר מכיל מספר גדול של גרעינים ומיטוכונדריה העטופים אף הם ברקמת חיבור. כל סיב שריר כזה מורכב מהרבה "סיבוני שריר" (myofibrils) המהווים את היחידה התפקודית של השריר.

מבנה אנטומי של שרירי השלד



תמונה 7: מבנה אנטומי של שרירי השלד. בצד החיצוני ביותר מעטפת השריר (epimysium) עוטפת את צרוור הסיבים. כל 10-100 סיבי שריר עטופים בממברנה הנקראת perimysium

וביחד הם נקראים צרור סיבי שריר (fasciculus). כל סיב שריר מורכב מקורים חלבוניים שנקראים "סיבוי שריר" (myofibril).

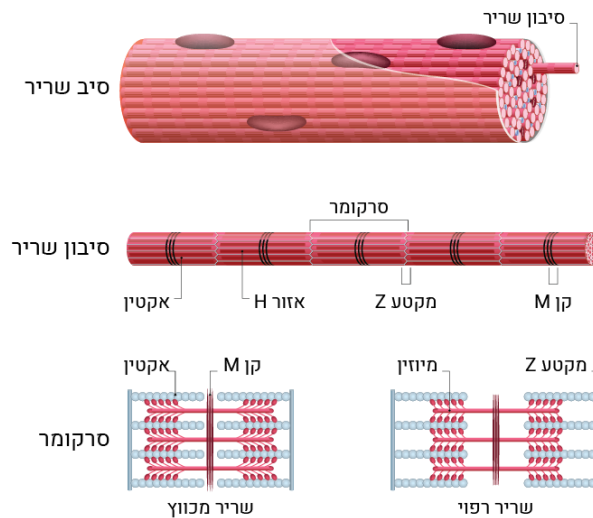
מאפיינים תפקודיים של שריר מערכת השלד

1. עירור חשמלי – שרירי השלד מגיבים לגירוי חשמלי שמקורו במערכת העצבים. הסיגנל החשמלי נוצר על ידי נירוטרנסמיטרים מיוחדים או הורמונים. שריר הלב יוצא דופן במובן זה, שכן הוא יכול לייצר את תנועות הכיווץ וההרפיה באופן עצמי.
2. כיווציות – היכולת של שרירי השלד להתקצר ובזכות כך ליצור כח הדרוש לביצוע פעולות שונות.
3. התארכות – היכולת של שרירי השלד להתארך, למשל התארכות שרירי הזרוע או השוק.
4. אלסטיות – היכולת של שריר השלד לחזור לאורכם וצורתם המקורית לאחר תהליך כיווץ והתארכות.

תהליך כיווץ השריר

יחידת המבנה של סיבוי השריר מסודרת בצינורות מוארכים וכוללת שלושה מרכיבים. סיבים עבים המורכבים מהחלבון מיוזין, סיבים דקים המורכבים בעיקר מהחלבון אקטין, וטבעת חלבונית שנקראת "טבעת Z" מחזיקה את הסיבים החלבוניים במקומם. סיבי השריר מחולקים לאורכם למקטעים קצרים. כל מקטע מתחיל ונגמר בטבעת Z ונקרא סרקומר (תמונה 8). תהליך כיווץ השריר תלוי בחלבונים מתכווצים, חלבוני בקרה וחלבוני מבנה. עירור עצבי של סיבי האקטין גורם להחלקתם משני צידי מקטעי Z "מחליקים" זה לכיוון זה על גבי סיב המיוזין. האנרגיה לתהליך מקורה בהפיכת מולקולת ATP למוליקולת ADP. כדי לאפשר את הקישור בין סיב האקטין למיוזין יש צורך בנוכחות של יוני סידן, המשתחררים למרווח הציטופלסמי של השריר תודות לגירוי העצבי. יחידת התפקוד של השריר היא סיבוי השריר (מיופבריל). אלה מורכבים מחלבוני מיוזין היוצרים סיב עבה וחלבוני אקטין היוצרים סיב דק. תנועת החלקה של סיבי האקטין על גבי המיוזין מאפשרת את כיווץ והרפיית השריר. אם נתבונן מרחוק על סיבי השריר נבחין במבנים שנקראים סרקומרים. סרקומרים הם יחידות חוזרות של סיבי אקטין ומיוזין (תמונה 8).

מבנה סיבוני השריר



תמונה 8: מבנה סיבוני השריר. ההחלקה של חלבוני האקטין תודות לאנרגיה המשתחררת בתהליך הפיכת ATP ל-ADP המאפשרת את כיווץ השריר.

סוגים של סיבי שרירי שלד

למרות שיחידת המבנה של כל שריר השלד היא סיבי השריר, ניתן למצוא שלושה סוגים שונים של סיבי שריר השונים בהרכב ובתפקיד שלהם. סיבי שלד אדומים למשל, מכילים יותר מיוגלובין (חלבון קושר חמצן המיוחד לשרירי השלד), ויותר מיטוכונדריה. לעומתם סיבי שלד לבנים מכילים מעט מיוגלובין ופחות מיטוכונדריה.

סיבי שלד "איטיים" – בעלי הקוטר הקטן ביותר ולכן החלשים ביותר. הם נראים בצבע אדום בגלל נוכחות גבוהה של מיוגלובין. מכילים כמות גדולה של מיטוכונדריה ולכן עיקר הפקת ה-ATP מתבצע בתהליך נשימה תאית אירובית. הם נקראים "איטיים" בגלל שמחזור הכיווץ שלהם יחסית איטי (100-200 מילי שניה). ולוקח להם זמן ארוך יותר להגיע לכיווץ מקסימלי. מצד שני הם מסוגלים להמשיך בפעילות לאורך זמן מכאן שהם מותאמים לריצות מרתון – לשמירה על מנח הגוף ולפעילויות אירוביות.

סיבי שלד "מהירים" – בעלי קוטר בינוני, גם הם מכילים כמות גדולה של מיוגלובין ומייצרים כמויות גדולות של ATP בנשימה תאית אירובית. אולם הם גם יכולים להפיק ATP בצורה אנארובית מאחר וכמות הגליקוגן בהם גבוהה. קצב הכיווץ שלהם מהיר פי 3-5 מקצב הכיווץ של סיבי השלד האיטיים. סיבים אלו יתרמו לפעילויות כמו הליכי או רכיבה על אופניים.

סיבי שלד "מהירים" (גליקוליטיים) – סיבים אלו בעלי הקוטר הגדול ביותר ולכן מכילים את הכמות הרבה ביותר של סיבוני שריר (myofibrils). על כן הם יכולים לייצר את הכוח הרב ביותר. הם מכילים מעט מיוגלובין ומיטוכונדריה ונראים בצבע לבן באופן יחסי. הם מכילים כמות גדולה מאד של גליקוגן ומפיקים את רוב האנרגיה שלהם בתהליך הגליקוליזה. הקוטר

של הסיבים מאפשר להם להתכווץ מהר ובכוח רב ולכן הם מותאמים לתנועות קצרות אך אינטנסיביות כמו הרמת משקולות, אך הם "מתעייפים" מהר (ירידה ביכולת ליצר כח כיווץ). פעילות אינטנסיבית המצריכה הפעלת כח רב לזמן קצר יכולה להוביל להגדלת נפח השריר וכמות הגליקוגן בו ב-50% (היפרטרופיה). רוב שרירי השלד הם תערובת של כל אחד מהשרירים שהזכרנו. יחד עם זאת, פעילות גופנית ותכונות גנטיות ישפיעו על הפיזור שלהם בגוף.

שיעור 3: בונים דגם של שריר

מבנה שרירי השלד הוא מורכב, והבנת המבנה האנטומי של השריר מסייעת להבנת האופן שבו הגוף שלנו פועל. הבנת מנגנון פעולת שרירי השלד נחוצה כדי למנוע פציעות ספורט, פציעות בגלל יציבה לא נכונה, או כתוצאה מתזונה לא נכונה. נושאים אלו מהווים מוקד עניין הולך וגדל אצל בני נוער ככל שהם מתבגרים.

בתום השיעור תדע

- להסביר כיצד בנוי שריר השלד מבחינה אנטומית.
- ידע קודם נדרש: מבנה התא, אברוני התא, רקמות, איברים, מערכות.

מהלך השיעור

1. צפה בסרטון המתאר אפשרות אחת להכנת דגם של שריר שלד.
<https://www.youtube.com/watch?v=JyaMo8o1ESA>
2. צפה בסרטון הבא ופעל לפי ההנחיות.
3. יחידת המבנה של השריר נקראת "סיבון שריר" (Myofibril). בהדגמה זו תשתמש בקשים כדי לבנות דגם של שריר שלד. כל קש שתייה בודד ייצג סיבון שריר אחד (תמונה 9 א').
4. קח 7 קשים ועטוף אותם לאורכם בעזרת איזולירבנד חום (תמונה 9 ב').
5. חזור על שלב מספר 4 והכן שני סיבי שריר נוספים. חבר את שלושתם ביחד בעזרת איזולירבנד בצבע צהוב. המבנה שנוצר נקרא פאסיקל - fasciculus (תמונה 9 ג').
6. חזור על שלב מספר 5 והכן עוד שלושה פאסיקלים. חבר את כולם ביחד בעזרת מסקנטייפ בצבע אדום (תמונה 9 ד'). המבנה שנוצר הוא תא שריר שלם.



תמונה 9 : רמות ארגון של רקמת השריר. **(א) סיבון שריר** - יחידת המבנה התפקודית של תא השריר. כוללת שלושה מרכיבים. סיבים עבים המורכבים מהחלבון מיזין, סיבים דקים המורכבים בעיקר מהחלבון אקטין, וטבעת חלבונית שנקראת "טבעת Z" המחזיקה את הסיבים החלבוניים במקומם. **(ב) סיב שריר** - מורכב מאוסף של סיבונים שריר ועטוף ברקמת חיבור. **(ג) פאסיקל** - מורכב מאוסף של סיבי שריר ועטוף ברקמת חיבור. **(ד) תא שריר** - מורכב ממספר פאסיקלים ועטוף ברקמת חיבור.

פרק 3 – מנופים בגוף האדם

נכתב בשיתוף עם יעקב קיבה

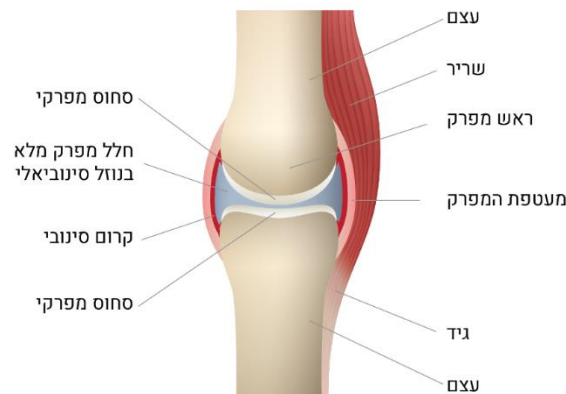
מטרות:

1. התלמיד יקשור בין פעולתם של מפרקי השלד: במרפקים, בברכיים, בצוואר ובלסת לבין ידע פיסיקלי על מנופים.
2. התלמיד יסווג את המנופים בגוף האדם בהתאם לסוג המנוף.

המפרקים

מפרק הוא מקום מפגש של שתי עצמות. בנקודת המפגש יכולה להתקיים תנועה בהתאם לסוג המפרק. מבחינים בשלושה סוגי מפרקים: מפרק סיבי, מפרק סחוס ומפרק סינובי בו אנו נתמקד. במפרק סינובי (synovial arthroses), המרווח בין העצמות הוא גדול יחסית, חלל המפרק מכיל נוזל צהבהב, והמפרק עצמו עטוף סחוס המגן עליו מפני שחיקה (תמונה 5). מפרקים מסוג זה מבצעים תנועות מגוונות, אנו נתמקד בתנועות זוויתיות. בתנועות מסוג זה משתנה הזווית בין עצמות המפרק.

מבנה של מפרק סינוביאלי

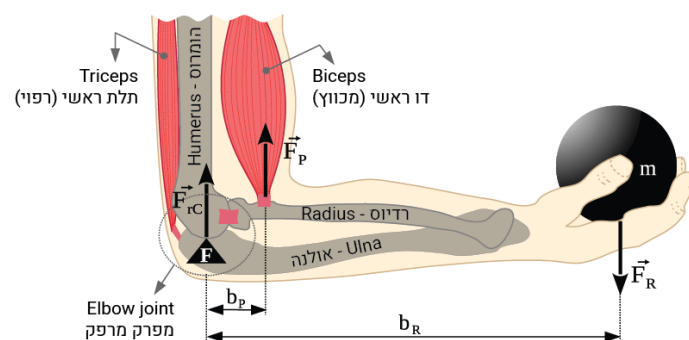


תמונה 10: מבנה של מפרק סינוביאלי. הסחוס עוטף את כל חלק העצם המצוי בתוך המפרק ומגן מפני שחיקה. רקמת חיבור דקה מכילה תאים המפרישים את הנוזל הסינובי אל המפרק.

מנופים בגוף האדם

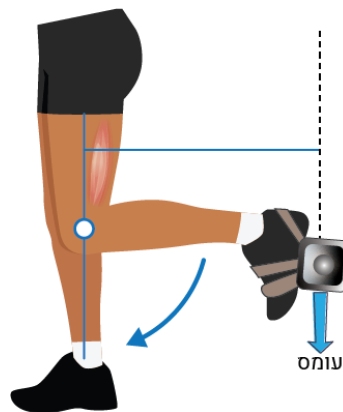
בדרך כלל כשאנחנו חושבים על מנוף, אנחנו מדמיינים מכונה גדולה שתפקידה להרים משאות כבדים. אולם מנופים ניתן למצוא גם בגוף האדם. מערכת שרירי השלד כוללת כ- 700 שרירים המעוצבים על ידי מערכת העצבים הסומטית (חלק ממערכת העצבים ההיקפית ביונקים). שרירי השלד מייצרים תנועה על ידי הפעלת כח על הגידים שמושכים בתורם עצמות אחרות או את העור המחוברים אליהם. בדרך כלל שרירי השלד חוצים לפחות מפרק אחד שם הם מחוברים לעצם נוספת היוצרת את המפרק. כאשר שריר שלד מתכווץ הוא מושך את אחת העצמות כלפי השנייה. ניתן להשתמש במנופים כך שכוח קטן יכול להניע כוח הרבה יותר גדול. זה נקרא יתרון מכני. בגופנו העצמות פועלות כזרועות מנוף, המפרקים פועלים כצירים, והשרירים מספקים את כוחות המאמץ להזיז עומסים. כאשר המאמץ (הכח שיוצר השריר), גדול מהעומס (הכח המתנגד לתנועה) – תתקבל תנועה. (תמונה 13).

תרשים הכוחות הפועלים במפרק המרפק



תמונה 11: תרשים הכוחות הפועלים במפרק המרפק. המשקולת מפעילה כח כלפי מטה (F_r), עומס). גם המסה של היד מפעילה כח כלפי מטה. השריר הדו-ראשי מפעיל כח כלפי מעלה (, F_p מאמץ) המרפק מהווה את נקודת המשען של המנוף (F_c). אם המאמץ יהיה גדול מהכח שמפעילה המשקולת והיד כלפי מטה, תתרחש תנועה והיד המחזיקה את המשקולת תתרומם.

בדוגמאות לעיל, כוחות המאמץ והעומס פעלו בכיווני סיבוב מנוגדים זה לזה. למשל, עבור זרוע היד (תמונה 11), משקל שמונח על היד יגרום ליד לרדת למטה, אולם כיווץ השריר ישאיר את היד מאוזנת. כאשר חוקרים פעילות של מנופים, חשוב להתייחס גם למרחק של הזרוע מהציר. נסו למשל, להחזיק משקולת שמסתה 1 ק"ג במרחקים שונים מהגוף. היכן היה לכם קל יותר? חשבו על הזזה של גלגל ריחיים, מתי יהיה קל יותר להזיז את הגלגל, כאשר המוט המסובב קצר מאד או ארוך? השפעת המרחק מהציר על הכוח הנוצר יוצר אפקט הנקרא **מומנט** (נוסחה 2). ניתן להגדיל את המומנט על ידי הגדלת גודל הכוח או הגדלת המרחק שהכוח פועל מהציר. בתמונה 12, העומס והמשקל של הרגל הכפופה מייצרים מומנט עם כיוון השעון על הברך. אם המומנט של הרגל הכפופה יהיה גדול מהכח שמיצר שריר הירך הרגל תסתובב בכיוון השעון למטה. כאשר שריר הירך בחלק האחורי של הרגל העליונה מתכווץ בכוח חזק, הוא מייצר מומנט נגד כיוון השעון שמחזיק את הרגל למעלה.



תמונה 12: מומנט מופעל על ברך כפופה.

נוסחה 1: חישוב כח המומנט. מומנט = כוח x מרחק מאונך לציר. או באנגלית: Moment
 $M = F \cdot D$, force * distance, כאשר F = כח כך שיחידת המומנט תהיה או ניוטון מטרים (Nm) או ניוטון סנטימטרים (Ncm).

שיעור 4 – מנופים בגוף האדם

לשיעור שני חלקים. בחלק הראשון מזהים התלמידים מנופים הפועלים בגוף האדם. בחלק השני חוקרים התלמידים את מנוף הזרוע.

מטרות:

1. לזהות ולאפיין מנופים שונים בגוף האדם.
2. לבנות דגם של מנוף מסוג שלישי, המדמה את פעולת שרירי הזרוע.
3. לבדוק את השפעת אורך הזרוע על המסה שהיא יכולה להרים.

ידע קודם נדרש: התלמיד למד על חוקי ניוטון, ויודע לצייר תרשימי כוחות.

חלק ראשון – מזהים מנופים בגוף האדם

1. צפו [בסרטון](#) ציינו לפחות שני סוגים של מנופים הפועלים בגוף האדם.
2. סרטון באופן סכמתי את זרוע היד וסמנו את האלמנטים של המנוף (נסו לזהות את נקודת המשען, זרוע הכוח, זרוע המשא, הכוח הפועל והכוח המופעל).

חלק שני : בונים דגם של זרוע נעה

ציוד וחומרים:

- מספרים
- רשת
- שתי פיסות עץ המדמות את הזרוע והאמה.
- שקית פלסטיק
- עץ
- קש
- 4 ווים
- משקולות במסה של 10 גרם, 20 גרם, 30 גרם, 40 גרם.

מהלך השיעור

במגש שלפניכם תמצאו את הפריטים הבאים: רשת ניילון, שקית פלסטיק דק, 3 מקלות עץ, פין מפצל, קשית, דגם כף יד מקרטון, מספרים וסרט דביק, ווים ומשקולות.

צפו [בסרטון](#), והרכיבו את המנוף בהתאם למתואר בהנחיות הבאות:

1. חברו את קצה הקשית לשקית והדביקו אותו בעזרת סרט דביק.
2. הכניסו את השקית לתוך הרשת כאשר הקשית נשארת מחוץ לרשת הדביקו את קצוות הרשת בסרט דביק.
3. חברו את הספוטולות בעזרת פין מפצל כמו באיור.

4. הדביקו בעזרת סרט דביק את דוגמת כף היד לספטולה.
5. חברו את השקית ברשת למבנה (זרוע ואמה) אשר יצרתם.
6. בדקו האם ניתן להפעיל את זרוע-אמת היד אשר בניתם בעזרת ניפוח השקית. במידה ולא נסו לתקן את המודל.



תמונה 13: מערכת הניסוי.

שאלות

1. עבור המודל שבניתם, ציינו היכן ממוקמת נקודת המשען, היכן זרוע הכח והיכן זרוע המשא.
 2. הוסיפו ווים במרחקים קבועים על זרוע המנוף.
 3. עבור כל אחד מהווים נסו להרים תוך כדי ניפוח השקית כל אחת מהמשקולות שלפניכם.
 4. ארגנו בטבלה את התוצאות
- טבלה 4:

מרחק מהציר	מסה	הצלחת הרמה (כן / לא)

שיעור 4: פתרונות למורה

חלק ראשון

תמונה 14 א'

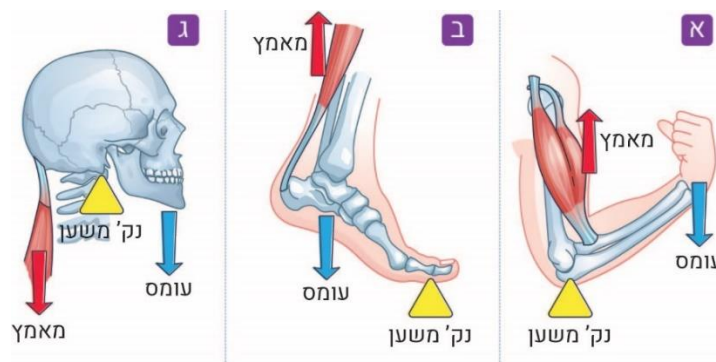
הציר נמצא במרפק והאמה פועלת כזרוע המנוף. השריר הדו-ראשי מספק את המאמץ (הכוח) ומכופף את האמה כנגד משקל האמה וכל משקל שהיד עשויה להחזיק. עבור מנוף מסוג שלישי, העומס רחוק יותר מהציר מאשר המאמץ. למרות שאין יתרון מכני כי המאמץ גדול מהעומס, חסרון זה מפוצה בתנועה גדולה יותר. סוג זה של מערכת מנוף גם נותן לנו את היתרון של מהירות תנועה הרבה יותר גדולה.

תמונה 14 ב'

במנוף מסוג שני העומס הוא בין הציר למאמץ (כמו מריצה). כוח המאמץ הדרוש קטן מכוח העומס, ולכן יש יתרון מכני. עמידה על קצות האצבעות מייצרת מנוף מסוג 2. הציר נמצא במפרקי הבהון והרגליים פועלת כזרוע מנוף. שרירי השוק וגיד אכילס מספקים את המאמץ כאשר שריר השוק מתכווץ. העומס הוא משקל הגוף והוא מורם על ידי המאמץ (התכווצות השרירים).

תמונה 14 ג'

במנוף מסוג ראשון נקודת המשען נמצאת בין המאמץ לעומס. מכאן שהמקום שבו הגולגולת פוגשת את החלק העליון של עמוד השדרה הוא מנוף סוג ראשון. הגולגולת היא זרוע המנוף, שרירי הצוואר בחלק האחורי של הגולגולת מספקים את הכוח (המאמץ) להרים את הראש כנגד משקל הראש (עומס). כאשר שרירי הצוואר נרפים הראש יכול לרכון קדימה.



תמונה 14 – מנופים בגוף האדם. א') מנוף סוג שלישי בזרוע. ב) מנוף סוג שני בכף הרגל. ג) מנוף סוג ראשון בצוואר.

שיעור 5: בונים דגם של מנוף הזרוע

מטרת פעילות זו היא להדגים את פעילות שריר הזרוע באמצעות בנייה של מערכת מנוף. באמצעות מודל זה, תמדדו את הכוח בשריר הדו-ראשי כאשר האמה הנושאת מסה מוחזקת אופקית.

ציוד וחומרים

- מחזיק מבחנות
- לוח עץ באורך 35 ס"מ וברוחב 3 ס"מ.
- לוח עץ באורך 25 ס"מ וברוחב 3 ס"מ. יעוגן בצורה אנכית.
- ציר.

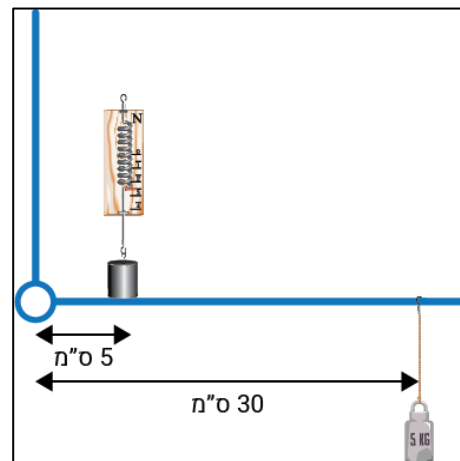
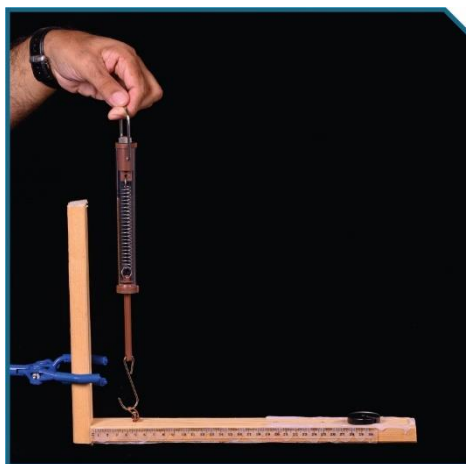
- מד כוח 10, 20, 100 ניוטון. חשוב להתאים את מד הכוח למסה אותה מודדים. משקולות קטנות במסה של 50 גרם (כ – 3 ניוטון) כדאי למדוד עם מד כח של 10 ניוטון.
- משקולת במסה של 50 גרם.
- משקולות שונות, קופסאות שימורים וכיוצא בזה.
- מיתר.

חלק ראשון

לפניכם משקולות במסות שונות. נסו להחזיק אותן כאשר האמה מקבילה לקרקע, כאשר היד ישרה, כאשר היד כפופה. מתי היה לכם קל יותר להחזיק את המשקולות השונות? הציעו הסבר לכך.

חלק שני

בנו את מערכת המנוף כפי שמתואר באיור. הקפידו לשים לב למרחקים בהם כל רכיב מחובר לכל אחת מפיסות העץ. עגנו את המערכת על גבי כן מבחנות.



תמונה 15: מבנה מערכת המנוף: שני לוחות עץ המחוברים בציר, מד כוח ומשקולת.

1. הניחו משקולת במסה של 50 גרם במרחק של 30 ס"מ מהציר.
2. משכו כלפי מעלה מד כח שמחובר במרחק 5 ס"מ מהציר. רשמו במחברת את המספר שהראה מד הכוח.
3. חזרו על המדידה במרחקים של 15, 20, 25 ו- 10 ס"מ מציר הסיבוב.
4. ארגנו את הנתונים בטבלה.
5. הציגו את הנתונים בגרף מתאים ותארו את התוצאות.

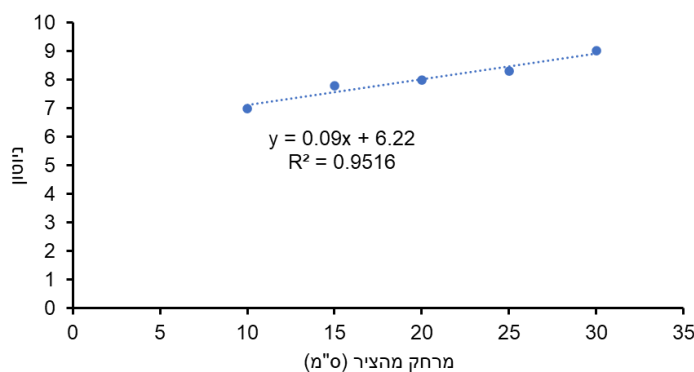
6. היכן היה לכם קשה יותר לאזן את הזרוע? כאשר המשקולות היתה בקצה הרחוק מהציר או מאד קרובה אליו?
7. הסבירו את תוצאותיכם תוך התייחסות לחוק המנוף. איזה סוג מנוף מהווה זרוע המפרק?

שיעור 5: פתרונות למורה

הדרך בה השריר הדו-ראשי פועל על האמה כדי להזיז אותה לזרוע המנוף בדרגה 3. הציר נמצא במפרק והאמה פועלת כזרוע המנוף. השריר הדו-ראשי מספק את המאמץ (הכוח) ומכופף את האמה כנגד משקל האמה ומשקל כל מסה שהיד עשויה להחזיק. כיוון קטן של השריר הדו-ראשי מייצר תנועה גדולה של האמה (כוח קטן, מרחק גדול).

טבלה 5: השפעת המרחק מציר הסיבוב על הכוח הנדרש לאיזון המנוף.

מסת המשקולת (גרם)	מרחק מציר הסיבוב (ס"מ)	כח שנמדד בעזרת מד כח (ניוטון)
50	10	9
50	15	8.3
50	20	8
50	25	7.8
50	30	7



תמונה 16 : השפעת מרחק המשקולת מציר הסיבוב על עצמת הכח הדרושה לאיזון הזרוע הנעה של המנוף.

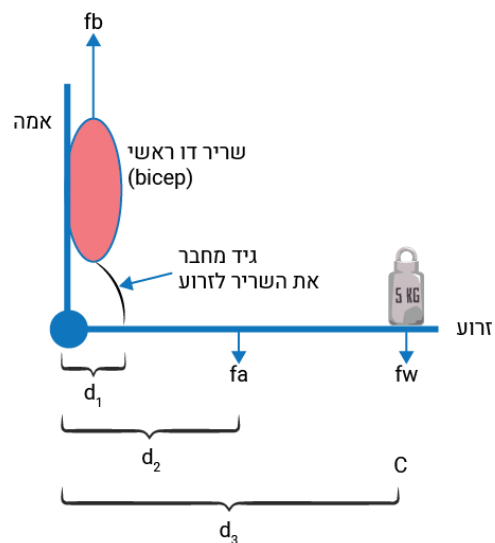
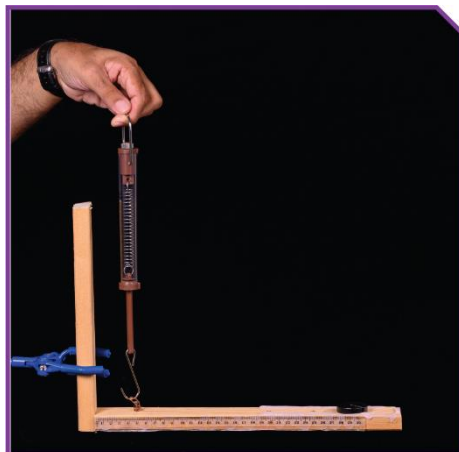
שיעור 6 מהו מומנט? (שיעור אתגר).

בשיעור מספר 6 מדדתם בעזרת מד כח את הכח הדרוש לאיזון זרוע של מנוף, והגעתם למסקנה שמדובר במנוף מסוג 3. בשיעור זה נלמד לחשב את הכוחות הפועלים על הזרוע ונשווה בין החישוב המתמטי לבין המדידה.

בתום השיעור תדע: לחשב את סך הכוחות הפועלים על הזרוע תוך שימוש בשקול המומנטים.

נתונה הבעיה הבאה:

על זרוע באורך 35 ס"מ מונחת משקולת שמסתה 50 גרם. חשבו את הכוח שעל שריר היד להפעיל כדי שהזרוע לא תזוז. נתון כי המשקולת ממוקמת 30 ס"מ מציר הסיבוב, נקודת המגע בין השריר לזרוע היא 5 ס"מ מציר הסיבוב. כמו כן, המסה העצמית של הזרוע היא 150 גרם (תמונה 17).



תמונה 17: (א) תרשים סכמטי של זרוע המחזיקה משקולת. (ב) מערכת הניסוי.

שלבים לפתרון הבעיה:

שלב 1 – ארגון נתונים והמרת יחידות מידה

אורך הזרוע = 35 ס"מ = 0.35 מטר.

מסת הזרוע = 150 גרם = 0.15 ק"ג

מסת המשקולת = 50 גרם = 0.05 ק"ג.

מרחקים:

$$d1=5\text{cm}=0.05\text{m}$$

$$d2=17.5\text{cm}=0.175\text{m}$$

$$d3=30\text{cm}=0.3\text{m}$$

שימו לב: המרחקים $d1$, ו- $d2$, הם קבועים ואינם משתנים. רק המרחק של המשקולת מציר הסיבוב $d3$ משתנה בהתאם למיקומה.

$$g=10\text{m/sec}^2$$

שלב 2 זיהוי הכוחות במערכת :

א. F_b = הכח שמפעיל מד הכוח (שמייצג את השריר של האמה)

זה הנעלם ? F_b .

זה בדיוק הכח שמדדתם בעזרת מד הכוח בשיעור מספר 6.

ב. F_a = הכוח שמפעילה הזרוע כלפי מטה בגלל המשקל העצמי שלה

$$F_a=0.15*10=1.5\text{N}$$

ג. F_w = הכוח שמפעילה המשקולת כלפי מטה.

$$F_w=0.05*10=0.5\text{N}$$

שלב 3 זיהוי המומנטים:

- המושג מומנט מתאר את מכפלת הכוח (למשל F_b) במרחק מציר הסיבוב (למשל $d1$).
- בשיעור מספר 6 שמתם לב שכלל שהמשקולת הייתה רחוקה יותר מציר הסיבוב כך היה עליכם להפעיל כח רב יותר כדי לאזן את הזרוע. זהו בדיוק המומנט.
- נתאר את המומנטים הפועלים על כל אחד ממרכיבי המערכת. נסמן אותן באות טאו τ .

א. המומנט של שריר היד יהיה : $\tau_{\text{Bicep}} = F_b * d1$

ב. המומנט של הזרוע יהיה $\tau_{\text{Arm}} = F_a * d2$

ג. המומנט של המשקולת יהיה: $\tau_{\text{Weight}} = F_w * d3$

שלב 4 חישוב המומנטים ופתרון

כדי שהזרוע תהיה מאוזנת, (כלומר אין תנועה) סכום המומנטים במערכת צריך להיות שווה ל 0.

א. נתאר את המשוואה: $\sum \tau = \tau_{\text{Bicep}} + (-\tau_{\text{Arm}}) + (-\tau_{\text{Weight}}) = 0$

ב. נכתוב את המשוואה מחדש בעזרת המשתנים:

$$fb * d1 + (-fa * d2) + (-fw * d3) = 0$$

- שימו לב שכתבנו את הכוח שמפעילה הזרוע והמשקולת עם סימן שלילי כדי לתאר את פעולתן כלפי מטה.

ג. נארגן את המשוואה מחדש ונחלץ את Fb שזה הנעלם אותו אנחנו מחפשים.

$$fb = \frac{fa * d2 + fw * d3}{d1}$$

ד. נציב ונפתור

$$fb = \frac{1.5N * 0.175 + 0.5N * 0.3}{0.05} = 8.25N$$

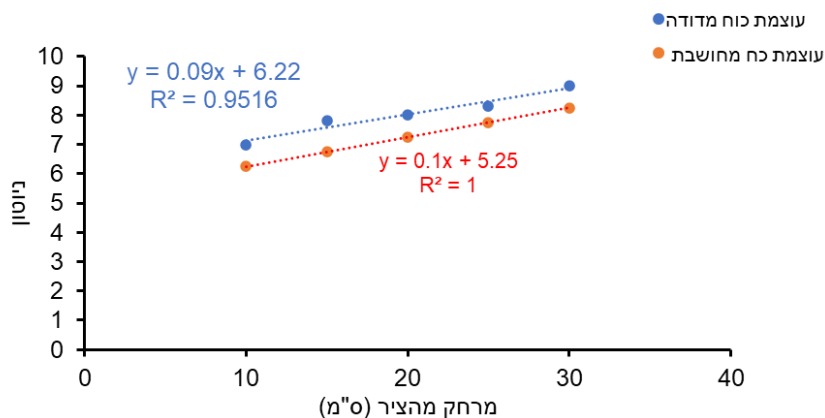
שאלות

- חשבו את הכח שיפעיל השריר כאשר המשקולת תהיה במרחקים של 10 ס"מ, 15 ס"מ, 20 ס"מ ו 25 ס"מ מהציר.
- ארגנו בעזרת תרשים את הקשר בין המרחק מציר הסיבוב לבין הכח שחישבתם.
- השוו את תוצאות החישוב עם תוצאות המדידה משיעור מספר 6. האם הן זהות?

שיעור 6 פתרונות למורה

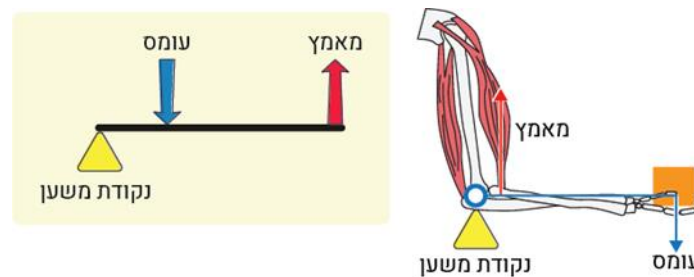
טבלה 6: השפעת המרחק מציר הסיבוב על הכוח הדרוש לאזן את המנוף.

מסת המשקולת (גרם)	מרחק מציר הסיבוב (ס"מ)	כח שנמדד בעזרת מד כח (ניוטון)	כוח שחושב בעזרת חוק המומנט.
50	10	9	8.25
50	15	8.3	7.75
50	20	8	7.25
50	25	7.8	6.75
50	30	7	6.25



תמונה 18: השפעת המרחק של המשקולת מציר הסיבוב על הכח המופעל על הזרוע. בכחול ניתן לראות את תוצאות המדידה בעזרת מד הכח. באדום ניתן לראות את תוצאות החישוב לפי חוק המומנט.

- בשני המקרים נמצא יחס ישר בין מרחק המשקולת לבין הכח הדרוש לאיזון הזרוע. ככל שהמשקולת היתה רחוקה יותר מציר הסיבוב, נדרש כוח רב יותר כדי לאזן את הזרוע.
- שימו לב! המשקל הכולל של הזרוע ושל המשקולת הם בערך 2 ניוטון. אבל השריר של היד מפעיל כח של 8.25N הגדול פי 4 כדי להרים את המשקל הזה. כלומר, למרות שהשריר חזק, כושר ההרמה שלו חלש. כי כדי להשיג טווח תנועה ומהירות השתמשו במנוף מהסוג השלישי.



תמונה 19: השוואה בין מבנה המרפק לבין מנוף סוג שלישי.

רשימת ספרות

1. חוקרים חומר ואנרגיה ב', מטמון חדש, מכון ויצמן למדע, רחובות.
2. כוח, אנרגיה ומכונה. זאב קרקובר, המכון למצוינות בהוראה, המרכז הישראלי למצוינות בחינוך.