



המחלקה להוראת המדעים



מרכז מורים ארצי
למו"ט בחט"ב

מינהלת מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי-טכנולוגי
ע"ש עמוס דה-שליט

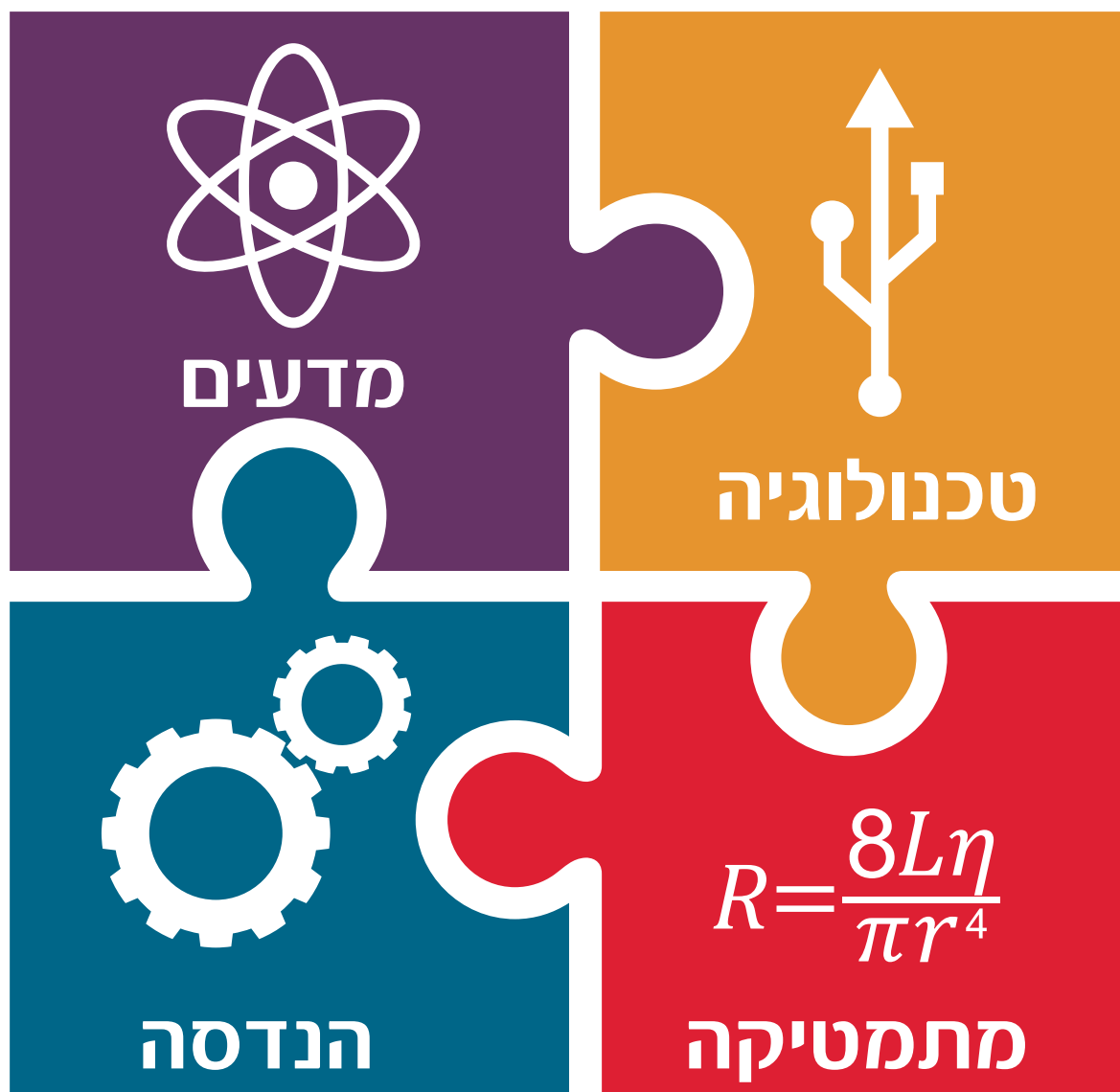


משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף מדעים
הפיקוח על מדע וטכנולוגיה



שילוב STEM בהוראת המדעים

בחטיבת הביניים



STEM

שילוב STEM בהוראת המדעים בחטיבת הביניים אוגדן למורה

פיתוח: ד"ר איתי ללזר

מרכז מורי מו"ט חט"ב, תשפ"ב

עיצוב גרפי: מור מוריה-שיפוני

תודות

ד"ר ערן קפלן, פיזיקאי, לשעבר מנהל המו"פ בחברת מדינול

מרכז המורים מופעל על ידי המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן עבור משרד החינוך במסגרת מכרז מס' 22/11.2020:
הקמה והפעלה של מרכזי המורים ארציים במקצועות הבאים: מדעים, טכנולוגיה ומתמטיקה



המחלקה להוראת המדעים



מרכז מורים ארצי
למו"ט בחט"ב

מינהלת מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי-טכנולוגי
ע"ש עמוס דה-שליט



משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף מדעים
הפיקוח על מדע וטכנולוגיה



4.....	מבוא.....
4.....	מטרות האוגדן.....
5.....	התפתחות הוראה מבוססת STEM.....
6.....	ביולוגיה כדיסציפלינה בינתחומית.....
6.....	ומה לגבי הנדסה?.....
7.....	חשיבה מערכתית (system thinking) ושימוש במודלים בהוראת מדע וטכנולוגיה.....
7.....	כלים לשימוש או בנייה של מודלים ממוחשבים.....
8.....	עקרונות פדגוגים להטמעת הוראת STEM בגישה בין-תחומית בחטיבת הביניים.....
9.....	יחידה 1 - גוף האדם כמודל להוראה בינתחומית.....
10.....	פרק ראשון - מערכת ההובלה - מדריך מעמיק למורה.....
12.....	מחזור הדם הגדול - המחזור הסיסטמי.....
13.....	מחזור הדם הריאתי.....
25.....	משוואת ברנולי.....
26.....	משוואת הרציפות.....
26.....	התקף איסכמי חולף.....
29.....	פרק שני - יחידת לימוד בנושא מערכת ההובלה.....
29.....	שיעור 1 - החברה להנדסת יצורים חדשים (מתוך מטמון חדש לכיתה ז' פרק 6 חוקרים מערכות הובלה עמ' 124).....
29.....	שיעור 2 - מודדים לחץ דם.....
31.....	שיעור 3 - חוקרים את לחץ הדם.....
32.....	שיעור 4 - חוקרים את משוואת הרציפות בעזרת סימולציית PHET.....
35.....	שיעור 5 - חוקרים את משוואת ברנולי בעזרת גאוגברה.....
36.....	שיעור 6 - מהי טרשת עורקים?.....
38.....	יחידה 2 - דיפוזיה אוסמוזה ומה שביניהן.....
40.....	פרק ראשון - שיעורים בנושא הדיפוזיה.....
40.....	שיעור 1 - חוקרים דיפוזיה.....
41.....	שיעור 1 - תוצאות למורה.....
42.....	שיעור 2 - למה תאים קטנים?.....
42.....	שיעור 3 - מעשה בתולעת.....
44.....	תוצאות למורה.....
45.....	רשימת ספרות.....

שיפור הוראת המדעים בבתי הספר סומנה כמטרה חשובה בישראל כמו במדינות רבות אחרות בעולם המערבי ובכלל. בארצות הברית, החלו בשנות ה 90 של המאה הקודמת לפתח תכניות חינוך שהדגישו את הוראת המקצועות Science, Technology, Engineering and Mathematics, וכך נולדו להם ראשי התיבות STEM. המטרה המוצהרת של תכניות אלה הייתה, הכשרת תלמידים וסטודנטים במקצועות אלה, באופן שיקנה להם יתרון תחרותי בעולם התעסוקתי. המונח STEM היה למטבע לשון בקרב אנשי חינוך וגורמים מדינתיים אחרים בעלי אינטרסים במערכות החינוך. אך, נראה שהשימוש במונח STEM נתון לפרשנויות רבות (Martín-Páez et al., 2019).

מטרת אוגדן זה, היא להציג לכם המורים למדעים בחטיבת הביניים, סקירה ספרותית עדכנית של מחקרים העוסקים בהוראת STEM ולבדוק כיצד ניתן ונכון לשלב הוראה המבוססת על STEM בינתחומית בחטיבת הביניים. הכוונה היא לשילוב של שתי דיסציפלינות STEM או יותר בשיעורי המדעים בחטיבת הביניים. אבל כדי שנוכל לקיים דיון כן בנושא זה, עלינו להראות, תוך שימוש בדוגמאות, כיצד כל דיסציפלינה מאלה הנכללות ב-STEM מתייחסת לאותן תופעות.

מטרות האוגדן

1. להסביר את הגישות השונות להוראת STEM.
2. להדגים את התרומה של הוראת STEM ללימודי המדעים.
3. להציג את החסמים יתרונות וחסרונות בהוראה מבוססת STEM אינטגרטיבי.
4. להציע מסגרת פדגוגית להטמעה של STEM אינטגרטיבי בכיתה.
5. להציע יחידות הוראה המבוססות על STEM.

בראשית שנות ה-90 של המאה הקודמת, וביתר שאת בתחילת המאה העשרים ואחת, החלו בארצות הברית, ובמקומות נוספים בעולם, לתת את הדעת לכך, שיש חשיבות בעידוד תלמידים להעמיק בלימודי מקצועות ה-STEM כבר מבית הספר היסודי. זאת מתוך כוונה שבעתיד, תלמידים רבים יותר יבחרו להעמיק בלמידה של מקצועות אלה גם באוניברסיטה. במקביל לכך החלו להתפתח יוזמות חדשות שהדגישו את החשיבות של למידה בין-תחומית של מקצועות ה-STEM. כאן ניתן להתייחס לשתי גישות בולטות: הגישה האינטגרטיבית והגישה הדיסציפלינארית. הגישה האינטגרטיבית תובעת התייחסות לכלל הדיסציפלינות המרכיבות את ה-STEM כיחידה אורגנית אחת (Sanders, 2009; Bybee, 2013). פרוש ה-STEM בגישה זו הוא חינוך לפתרון בעיות, תוך שימוש בעקרונות מתמטיים ומדעיים, ויכולות מתחום ההנדסה והטכנולוגיה (Sanders and Wells, 2006). לצד התפתחות גישת ה-STEM האינטגרטיבית, התפתח המושג "אוריינות STEM" שהיא היכולת לזהות וליישם עקרונות STEM כדי לפתור בעיות שלא יכלו להיפתר בגישה חד-דיסציפלינרית (Group, no date) (קבוצת המחקר בווינגטון, 2011). כדי להצליח בכך על התלמידים להצליח לשלב בין ידע קונספטואלי, לידע פרוצדורלי (Zollman, 2012) ויכולת פתרון בעיות (Barlax, 2017). בהתאם לגישה זו גובשו במשרד החינוך ארבעה עקרונות לשילוב גישת ה-STEM הבינתחומי באופן מיטבי. לפי עקרונות אלו, מומלץ להתמקד בתהליכי חשיבה של חקר ופתרון בעיות הכוללים לפחות ארבע מיומנויות STEM:

1. אוריינות מדעית

2. אוריינות טכנולוגית והנדסית

3. עבודת צוות

4. הכוונה עצמית בלמידה

הגישה האלטרנטיבית, הדיסציפלינרית, מדגישה שכדאי ונחוץ לשמר את החינוך הדיסציפלינרי ולשלב ולהעצים אותו בהוראה על פי עקרונות (Shaughnessy, 2013). על פי גישה זו, STEM תהווה פלטפורמה ליישום הידע הדיסציפלינרי שנלמד בהקשרים המתאימים (Bybee, 2013). בהתאם לכך, מזהה (Bybee, 2013) דרכים שונות להוראת STEM בגישה בין-תחומית. החל משילוב של מדע עם מתמטיקה, שילוב של מדע, מתמטיקה עם טכנולוגיה או הנדסה, ועד שילוב של כלל הדיסציפלינות ביחד. בבדיקה שסקרה מעל 30 עבודות מחקריות בנושא - "שילוב מתמטיקה ומדע" - נמצאו הבדלים בהישגי התלמידים במדעים (ולא במתמטיקה), כאשר המורים בחרו ללמד בשיטה מוגברת (דיסציפלינרית מרכזית אחת, מובילה את הלמידה והדיסציפלינרית השנייה מלווה את השיעורים לאורכם), או בלמידה משולבת לגמרי בין מתמטיקה למדע (Hurley, M. 2001). בהתאם לכך, נטען כי דרוש מידע אמפירי בנוגע לשילוב של מתמטיקה ומדע, יש צורך בפיתוח של חומרים ותוכניות לימוד מתאימות, וצריך להשקיע בהכשרת מורים מתאימה. עוד נטען, כי צריך לבחון האם השילוב תורם להבנה של התלמידים, וכיצד נכון לשלב בין השניים (Hurley, M. 2001). ניתן להניח ששתי שאלות אלו נכונות גם באופן כללי.

ביולוגיה, הוא מדע העוסק בהרכבו של עולם הטבע, דיסציפלינה זו היא בינתחומית מטבעה. שכן הבנת המנגנונים של תופעות ביולוגיות תלויה בהבנה של תחומי דעת נוספים כמו כימיה, פיזיקה ומתמטיקה. אולם, בחטיבת הביניים ביולוגיה בדרך כלל נלמדת במנותק מתחומי דעת אחרים דבר שמציב קושי כאשר רוצים ליצור למידה בינתחומית. במקרים רבים הדבר נכון גם לקורסי הליבה בביולוגיה לסטודנטים לתואר ראשון. קורסים אלה הנדרשים להטמיע בסטודנטים עקרונות חשובים כגון "הדוגמה המרכזית" של התא (DNA-RNA-חלבון), תיאוריית אב קדום משותף, עקרונות "הכלכלה של הטבע" ואחרים מתארים את עקרונות אלה, פעמים רבות, כאוסף של נתונים בדידים ובלתי תלויים. בהתאם לכך, סטודנטים לביולוגיה מתארים ידע ביולוגי כמאגר עובדות המועבר על ידי המרצה ושאותו יש לשנן (Walker et al., 2008; Hall et al., 2011). לטענתם של חלק מהסטודנטים, מודלים ונוסחאות מתמטיות שייכות לדיסציפלינות כמו פיזיקה, כימיה ומתמטיקה ולא לביולוגיה. מן הצד השני, סטודנטים רבים לביולוגיה, הלומדים פיזיקה כקורס מבוא, מחזיקים בדעה, שפיזיקה מבוססת על נוסחאות בדידות, לעומת הבנה של פיזיקה כמכלול אינטגרטיבי של מושגים, שמטרתם הסבר כולל של חוקי הטבע, והצלחתם בקורסים אלה נסמכת אף היא על שינון ולא הבנה. (Hammer, 1994; Redish, 1998; Saul and Steinberg, 1998).

תיאורים ותפיסות אלה מצביעים על שתי בעיות עיקריות הדורשות רפורמה (Handelsman et al., 2004; Allen and Tanner, 2005). ראשית, הגישה האקדמית הרווחת ללימוד הדיסציפלינה הביולוגית היא גישת "הלומד הסביל". גישה זו מעודדת שינון ומדכאת הבנה אפיסטמולוגית מעמיקה והבנה קוגניטיבית. אכן, במקרים בהם תפיסת הסטודנטים את הידע הייתה דינמית וקשורה לחיי היום-יום, לעומת תפיסת ידע בדידה, ההצלחות הלימודיות שלהם היו רבות יותר (Songer and Linn, 1991; Schommer, Crouse and Rhodes, 1992). בדומה, תלמידים שהיו שותפים ביצירת הידע ובהגיון שהוביל ליצירתו, הצליחו בצורה גבוהה יותר בהשוואה לסטודנטים שהסתמכו על הוראה מפורשת על ידי המרצה (May et al., 2005). שנית, הסטודנטים לביולוגיה תופסים את המתמטיקה, הפיזיקה והכימיה כאלמנטים חיצוניים למערכת הידע שלהם. זאת למרות שכלל הידע הביולוגי נשען על ניסוח מודלים מתמטיים, כימיים ופיסיקליים אינטגרטיביים. למעשה, הבנה של מושגים בפיזיקה ומודלים (כלומר נוסחות) מתמטיות חיוניות להבנתם של עקרונות ביולוגיים בסיסיים ולצורך הסבר של תופעות ביולוגיות (chemistry, and physics) (Redish and Cooke, 2013; Watkins and Elby, 2013). Physics has lagged behind math and chemistry in creating new, biologically oriented curricula, although much activity is now taking place, and significant progress is being made. In this essay, we consider a case study: a multiyear conversation between a physicist interested in adapting his physics course for biologists (E.F.R.). ניתן רק להניח שמה שנכון לסטודנטים לביולוגיה יהיה נכון גם עבור תלמידי חטיבת הביניים.

ומה לגבי הנדסה?

בדו"ח של האקדמיה למדעים של ארצות הברית, שיצא לאור בשנת 2009, נטען שמאחר ובעולם האמיתי פתרונות לבעיות מתחום ההנדסה, ידרשו ידע מתחומי מדע אחרים, הרי שגם בבית הספר כדי לשלב בין לימודי ההנדסה לשאר תחומי המדע. באמת, החל מאותה השנה, החלו בארצות הברית, לשלב את הוראת לימודי ההנדסה כחלק אינטגרלי משיעורי

המדעים ולא כמקצוע נפרד. לפי Moore, לימודי הנדסה יכולים לעודד את המעבר ללמידה בין-תחומית, שכן הן יעודדו את הסטודנטים ללמוד את המתמטיקה והעקרונות המדעים מאחורי פיתוחים טכנולוגיים. יחד עם זאת חשוב לזכור, שאחד האתגרים של מורים למדעים הוא כיצד לשלב בין לימודי הנדסה ללימודי מדעים בכלל וביולוגיה בפרט. העדויות לגבי התמורה של לימודי הנדסה בלמידה בין תחומית הן מגוונות. נמצא למשל, שתוכנית לימוד בהנדסה ששילבה הדגמות ספציפיות תרמה לתפיסות התלמידים את הנושאים של מעבר חום, ואנרגיה בצורה משמעותית יותר בהשוואה ללמידה סטנדרטית, וגם בהשוואה ללימודי הנדסה ללא דגש על הדגמות ספציפיות (Schnittka and bell, 2011). לעומת זאת, מחקרים אחרים מראים שתלמידים שעוסקים בתכנון הנדסי לא תמיד לומדים ומבינים מושגים מדעיים (McRobbie et al, 2007; Silk et al, 2000). מכאן ששילוב קוריקולום המבוסס הנדסה בתוכנית הלימוד אינו דבר פשוט.

חשיבה מערכתית (system thinking) ושימוש במודלים בהוראת מדע וטכנולוגיה

אחד מהיעדים המופיעים במסמך דמות הבוגר הוא פיתוח אוריינות מדעית, שאחד ממרכיביו הוא חשיבה מערכתית (de Bono 1976). חשיבה מערכתית היא אחד מכישורי החשיבה מסדר גבוה והיא מאופיינת ביכולת לראות את המערכת השלמה, את מרכיביה, את יחסי הגומלין בין רכיבי המערכת ואת דרך הפעולה הכללית של המערכת. חשיבה מערכתית חשובה כדי להתמודד עם בעיות מורכבות ובמיוחד כאלה המערבות תחומי מדע שונים. אחת הטענות היא, שפיתוח חשיבה מערכתית בהוראת מדע יסייע לפיתוח מיומנויות אחרות של חשיבה מסדר גבוה. בעבודה שבדקה את יכולת החשיבה המערכתית של תלמידי ביולוגיה בתיכון, לאחר שלמדו את היחידה העוסקת בגוף האדם והומאוסטזיס, נמצא שהחשיבה המערכתית של רוב התלמידים הייתה בסיסית ביותר. התלמידים הצליחו להבחין בין מרכיבי המערכת, אבל לא לבצע מיזוג או הכללה בין רכיבי המערכת דבר שהיה מעיד על חשיבה מערכתית ברמה גבוהה יותר (Assraf et al, 2013). כדי לפתח חשיבה מערכתית ניתן להשתמש במתודולוגיה של מערכות מורכבות (complex systems). לפי גישה זו, בוחנים כיצד יחסי הגומלין בין מרכיבי המערכת מובילים להופעתן של תכונות מתהוות (emergent properties), וכיצד המערכת יוצרת קשרים עם הסביבה (Jacobson & Wilensky, 2006). לפי גישה זו, למערכת בכללותה יש מאפיינים שלא ניתנים להבחנה על ידי התבוננות בכל אחד ממרכיבי המערכת בנפרד. פיתוח חשיבה מערכתית ותיאור מערכות בצורה של "מערכות מורכבות", הוא אחד מיעדי מערכת החינוך. וגם אחד מהמושגים "חוצי הדיסציפלינות" המתוארים במסמך ה- NGSS. (Next Generation Science Standards). בחטיבת הביניים נחשפים התלמידים לנושאי לימוד רבים הניתנים לתיאור בדרך של מערכות מורכבות. תהליכי דיפוזיה, מערכות הובלה, מערכות אקולוגיות ושינויי אקלים, הם רק דוגמה קטנה לכך. תיאור ואפיון תהליכים אלה הוא אתגר מורכב קוגניטיבי והבחנה ברמות המורכבות השונות במערכת תאפשר הבנה טובה יותר של נושאים חשובים אלה.

כלים לשימוש או בנייה של מודלים ממוחשבים.

אחת הדרכים לפיתוח חשיבה מערכתית בגישה של מערכות מורכבות היא שימוש במודלים. שימוש במודלים מאפשר לתלמידים לראות את המדע כרצף מתהווה של רעיונות לעומת ידע ודאי וקבוע. מודל יכול להיות פיזי או ממוחשב, ותלמיד יכול להתנסות במודל קיים או לבנות/ לתכנת מודל בעצמו. כך ששימוש במודלים כחלק מרצף ההוראה יכול לתת מענה גם לשונות לומדים.

קיימים כלים רבים המאפשרים עבודה סביב מודלים ממוחשבים. חלקם מאד ספציפיים לנושא מסוים כמו CTSiM המיועד לטומוגרפיה ממוחשבת, EvoBuild סביבה מבוססת בלוקים ליצירת מודלים בנושאי אבולוציה (Wagh and Wilensky, 2018), גאוגברה, סביבה מתמטית המאפשרת תכנון של סימולציות הנדסיות, מתמטיות ופיזיקליות. כלי נוסף הוא SageModeler המאמץ את הגישה הדינמית בה למערכת יש סך אנרגיה מסויים ובעזרת לולאות משוב, משתנה האנרגיה של כל רכיב במערכת. שתי סביבות פיתוח כלליות יותר הן סקראץ' ו-NetLogo (Resnic et al, 2009) (Wilensky, 1999), אלו סביבות פיתוח קוד כלליות המצריכות היכרות בסיסית עם עולם התכנה. באוגדן זה ניישם בנייה ושימוש במודלים פיזיים וממוחשבים.

עקרונות פדגוגים להטמעת הוראת STEM בגישה בין-תחומית בחטיבת הביניים

מעבר ללמידה בין תחומית הוא תהליך לא פשוט. המרכיב המרכזי ברפורמות שהוצגו, לפחות עבור קורסים לתואר ראשון, היה שינוי של תכני הקורסים, מפגשים בין מרצים בתחומי הדיסציפלינות השונים וליווי מחקרי של התהליך. ניתן להניח, שגם בחטיבת הביניים, כדי ששינוי זה יצליח, יש חשיבות בהטמעה הן של הידע והן של גישת ה-STEM בקרב מורים. כמו כן יש לשקול התאמה של תכנית הלימודים שתאפשר הוראה בין תחומית בצורה קלה יותר. מאחר וקיימות דרכים רבות להוראה של STEM בצורה בין תחומית, היה עלינו להתמקד. לכן בחרנו באוגדן להתמקד בשלושה מרכיבים (איור 2).

שילוב של היבטים כמותיים ומתמטיים:

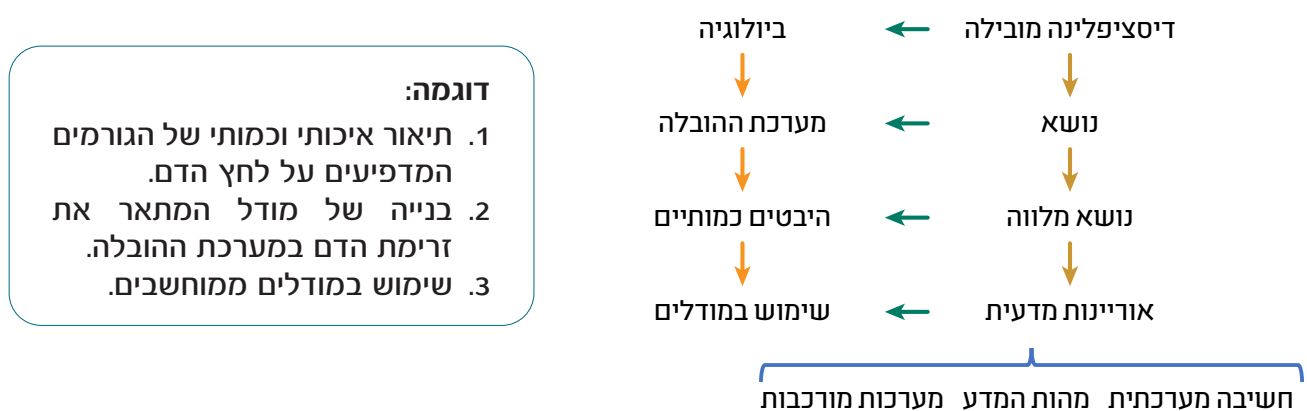
בעידן של מהפכת המידע בו נתוני עתק (Big-Data) נוצרים בקצב מהיר, כאשר העולם צועד לעבר מערכות אוטונומיות מבוססות בינה מלאכותית (AI), ובמיוחד בתקופת הקורונה, בה מושגים כמו מקדם הדבקה ושכיחות מוטציות, קובעים הלכה למעשה את סדר היום, יש חשיבות רבה של שילוב תכנים כמותיים בהוראת הביולוגיה. בכלל, לא תתכן הוראה בין-תחומית ללא בסיס מתמטי טוב, וללא ההבנה שהיבטים כמותיים מתחומי המתמטיקה והפיזיקה הם חלק אינטגרלי ממדעי הטבע. אולם, כשבוחנים את השימוש בחשיבה כמותית בהוראת המדעים בישראל, נראה שהגישה הכמותית מודגשת פחות. מכאן עולה השאלה, כיצד נכון ליישם למידה בין תחומית במדעים תוך שילוב של היבטים כמותיים. שילוב של מושגים מתמטיים ונוסחאות בלימודי המדעים צריך להיעשות בחכמה, כדי למנוע התנגדויות. אחרת התלמידים עלולים להתייחס למושגים המתמטיים כמושגים שיש לשנן, והשימוש בהם עלול להיות טכני באופן הדומה להצבה בנוסחה ופתרון בלבד. יש לתת את הדעת להתפתחות הקוגניטיבית של תלמידים בגילאים הצעירים. שילוב של מתמטיקה בצורה אינטנסיבית מדי, עלול להרתיע ולהוביל לתסכול. עבור חלק מהם, ההבנה המתמטית עלולה להתפתח דווקא בשלבים מאוחרים יותר, לכן חשוב לבחור בקפידה את ההיבטים המתמטיים המתאימים לגילאים הצעירים. לדעתנו מושגים בסיסיים כמו, ממוצע, חציון, סטיית תקן, ערך R2 ושונות בתיווך מתאים, הם בהחלט בטווח ההבנה של תלמידים בגילאי חטיבה. חשוב גם לבחור בקפידה את הנושאים הביולוגיים בהם נרצה לשלב היבטים כמותיים. במחקר שבדק שאלה זו בקרב סטודנטים נמצא שלנושאי הלימוד, מורכבות המתמטיקה, או המטלה הספציפית, יש השפעה על מידת הרתיעה של סטודנטים לביולוגיה משילוב של עקרונות מתמטיים ופיזיקליים בלימודי הביולוגיה. מכאן, שחשוב לבחור בצורה נכונה את הנושאים הביולוגיים בהם נרצה לשלב מתמטיקה או פיזיקה להוראתם (Watkins and Elby, 2013).

העוגן הלימודי סביבו נפתח את הלמידה יהיה מתחום המדעים (כימיה, ביולוגיה, פיזיקה) ואפילו נרצה להדגיש את הביולוגיה האורגניזמית (לימוד מבנה, תפקוד ועוד ברמת האורגניזם השלם). נרצה להדגיש מושגים כמו מגוון מינים, שירותי מערכת אקולוגית, שינויי אקלים ועוד, כחלק אינטרגלי ממערכת השיקולים של התלמידים לסוגיות משמעותיות שבהכרח יעסיקו אותם בחייהם הבוגרים.

פיתוח החשיבה המערכתית:

תוך שימוש במתודולוגיה של מרכות מורכבות בעזרת שימוש במודלים. בחלק הזה נציע לתלמידים היכן נוכל לבנות או להשתמש במודל קיים לצד שימוש בסימולציות או מודלים ממוחשבים שהוכנו בסביבת סקראץ', Sagemodeler או netlogo או גאוגברה.

מודל לשיעור STEM בחטיבת הביניים



תרשים 2: הצעה לתכנון שיעור מבוסס STEM בינתחומי בחטיבת הביניים.

יחידה 1 - גוף האדם כמודל להוראה בינתחומית

גוף האדם מורכב מאוסף של מערכות המקיימות באופן רציף יחסי גומלין אחת עם השנייה (Raved and Yarden 2014). לכן הבנה של מערכות הגוף באופן נפרד אינה מספיקה להבנת גוף האדם כמכלול, אלא יש צורך להבין את האינטראקציות בין מערכות הגוף השונות. הבנה זו דורשת פיתוח חשיבה מסדר גבוה וכישורים קוגניטיביים (Raved and Yarden 2014), באמת נמצא שתלמידים בכיתה ו' התקשו להבין את מערכת הנשימה בגלל קושי בהבנה של תהליכים ברמות ארגון שונות (Hmelo et al. 2009). מערכת ההובלה, אף היא מערכת מורכבת ותלמידים, בהתאם לגילם, נדרשים להבין מושגים רבים כגון: לחץ דם, התנגדות היקפית לזרימת דם, עקרון פרנק-סטרלניג, חוק אוהם לתנועת נוזלים ועוד. מחקרים מראים שהבנת מערכת ההובלה היא מאתגרת הן לתלמידים צעירים והן לסטודנטים לרפואה. קושי זה מתבטא בשכיחות גבוהה של תפיסות שגויות (Bordes et al. 2021; Carrol 2001; Michael et al. 2021; Özgür 2013; Yip 1998).

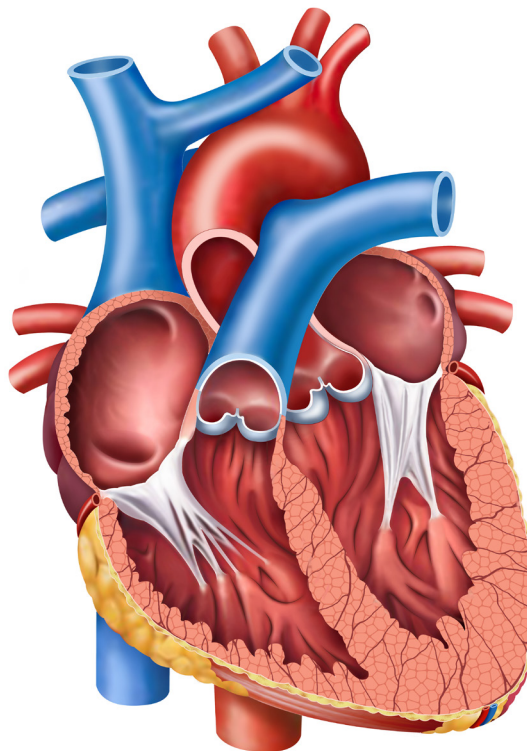
בישראל, תלמידים בחטיבת הביניים לומדים על מספר מצומצם של מערכות גוף האדם, אלה כוללות את: מערכת ההובלה (כיתה ז'), מערכת הרבייה (כיתה ח') ומערכת העיכול (כיתה ט'). לצד זאת מזכירים בקצרה בכיתה ז' גם את מערכת העצבים העור ומערכות נוספות. עבור תלמידים רבים, הכרת הביולוגיה של גוף האדם תיפסק בחטיבת

הביניים אם הם לא יבחרו ללמוד מקצועות ביולוגיים בחטיבה העליונה או בחייהם הבוגרים. בעידן בו משתוללת מגפה עולמית מזה כשנתיים, יש חשיבות גדולה בהוראת נושאים אלה. יתרה מכך, אנחנו חושבים, שהוראה של מערכות גוף האדם, מזמנת קרקע פורייה לשילוב של מושגים חוצי דיסציפלינות עם הוראה בינתחומית בהתאם לצורך.

פרק ראשון - מערכת ההובלה - מדריך מעמיק למורה

מטרת פרק זה היא להוות רקע ללימוד עצמי למורה על מערכת ההובלה בדגש הנדסי ומתמטי. בפרק משולבות הערות פדגוגיות. הפרק השני מכיל הצעה ליחידת לימוד בנושא מערכת ההובלה. אחת ממטרות האוגדן היא לשלב הוראה של היבטים כמותיים לצד הוראת נושאי הלימוד במדעים. בפרק זה נתמקד במערכת ההובלה ונתאר את הגורמים המשפיעים על קצב זרימת הדם, נפח זרימת הדם, ולחץ הדם ונבחן את הערך המוסף בשילוב מתמטיקה בהסבר תופעות אלו. כמו כן נתייחס גם להיבטים בריאותיים הקשורים למערכת ההובלה כמו טרשת עורקים ויתר לחץ דם. הפרק מחולק ל-12 סעיפים הכתובים עבור המורה. בסופו של כל סעיף תמצאו תיבת טקסט המפרטת מה לדעתנו חשוב שהתלמיד ידע ועל מה כדאי לוותר במידה והחלקים הכמותיים הם מורכבים מידי. כמו כן, חלקי המבוא בנושא מבנה הלב, מחזורי הלב, וכלי הדם בלב הם ידע הכרחי אותו יצטרך התלמיד לדעת לפני המעבר לנושא לחץ הדם.

א. מבנה מערכת ההובלה



איור 1: מבנה הלב. ניתן לראות את שתי העליות, שני החדרים, מסתמי המפרשים המפרידים בין העליות לבין החדרים ואת שני מסתמי הכיסים המפרידים בין אבי העורקים ועורק הריאה לבין החדרים.

התפקיד של מערכת ההובלה הוא לספק את הצרכים האנרגטיים של הגוף. מערכת ההובלה אחראית על אספקת חמצן, נוטריינטים והורמונים, לתאי הגוף השונים, והסעת חומרי פסולת ופחמן דו-חמצני מהרקמות. תפקיד נוסף וחשוב של מערכת

ההובלה הוא הסעה של עודפי חום מהגוף. במרכז מערכת ההובלה נמצא הלב (איור 1), אצל עופות ויונקים, הלב מחולק לארבע מדורים, שני חדרים ושתי עליות. באמצעו מחולק הלב על ידי מחיצה. מחיצה זו מונעת ערבוב של דם עשיר בחמצן עם דם עני בחמצן. מאחר והלב מתפקד כשתי משאבות נפרדות הפועלות בסנכרון, להפרדה זו חשיבות אבולוציונית אדירה. היא אפשרה ניצול אנרגטי טוב יותר של החמצן שנקלט בנשימה והיא זו שנתנה את היתרון האנרגטי להתפתחות התעופה אצל העופות והתפתחות היכולת לשמור על טמפרטורת גוף קבועה ביצורים הומיאותרמיים.

לצד הלב, אנו מוצאים מערכת ענפה של כלי דם שתפקידם להסיע את הדם מהלב אל האיברים ומהאיברים בחזרה אל הלב. שלושה סוגים של כלי דם נמצאים במערכת: עורקים, ורידים ונימים (איור 2). העורקים והוורידים היו מוכרים לרופאים בעת העתיקה, ואילו הנימים התגלו רק לאחר אמצע המאה ה-17 בעקבות המצאת המיקרוסקופ.

עורקים

העורקים הם כלי דם האחראים על העברת דם מהלב אל האיברים. ככל שמתרחקים מהלב העורקים קטנים בקוטרם ובמידת האלסטיות שלהם. העורקים הקרובים אל הלב כדוגמת אבי העורקים הם אלסטיים, תכונה זו מאפשרת להם להתרחב מאד בעת מעבר הדם בעת כיווץ הלב, ולחזור בתנועת החזר (recoil) בעת הרפיית הלב. בעת חזרת כלי הדם למצבו המקורי, מומרת האנרגיה האלסטית לאנרגיה קינטית, כך שהדם ממשיך בתנועה גם כאשר החדרים רפויים. ככל שמתרחקים מהאזורים המרכזיים בגוף, קוטר העורקים קטן ויש שינוי במבנה של דופן העורק. החלק היחסי של הסיבים האלסטיים יורד ובהתאמה עולה החלק היחסי של שכבת השריר החלק. תפקיד עורקים שרירים אלו הוא הובלה של דם לדוגמא לגפיים.

עורקים

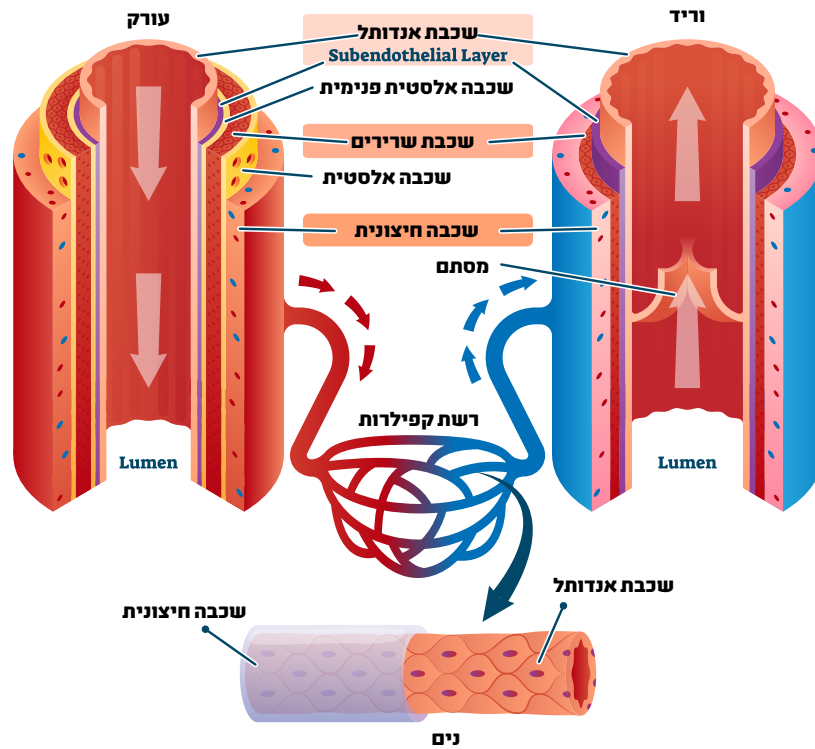
העורקים הם החלק האחרון והמסועף ביותר של המערכת העורקית. מדובר על עורקים קטנים שמתווכים את מעבר הדם לנימים. בערך 400 מיליון עורקים נמצאים בגוף והקוטר שלהם נע בין 15-300 מיקרומטר (μm). לעורקים שכבה שרירית חזקה המאפשרת להם להתכווץ עד כדי חסימה מוחלטת או להתרחב עד פי ארבעה מקוטרם המקורי (Guyton, A and Hall JE, 1996). מכאן שביכולתם לווסת את כניסת הדם לנימים בהתאם לצרכי הרקמה.

הנימים

(capillus - little hair). כלי הדם הקטנים ביותר בעלי קוטר של $5-10\mu\text{m}$. קיימים בגוף בערך 20 מיליארד נימי דם. התפקיד המרכזי של הנימים הוא להחליף חומרים בין הדם לנוזל הבין תאי. כמעט ליד כל תא נמצא נימ, אך איברים בעלי דרישת חמצן גבוהה מכילים נימים רבים יותר מאיברים אחרים. לנימים אין שכבה שרירית והם בעלי דופן דקה של תאי אנדותל. מבנה כזה מאפשר דיפוזיה מהירה של חומרים דרך דופן הנימ. זרימת הדם אל הנימים מבוקרת על ידי כיווץ או הרפייה של השוער המצוי בחלק הסופי של העורק.

ורידים וורידים

הורידים אוספים דם מרשת הנימים ומעבירים אותו בחזרה אל הלב. קוטרם 10-50 מיקרון, וככל שהם מתרחקים מרשת הנימים הם מתרחבים ומתאחדים לורידים גדולים יותר עד שהם מתכנסים לשני ורידים מרכזיים הוריד הנבוב התחתון והעליון המנקזים דם ישירות על עליה ימין של הלב.



איור 2: מבנה כלי הדם. כלי הדם השונים נבדלים בנוכחות או העדר שכבות מסוימות ובעוביין היחסי. כמו כן, ניתן למצוא הבדלים נוספים בין כלי הדם מאותו הסוג בהתאם למרחק מהלב או למיקום בגוף. כך שמדובר בתיאור כללי בלבד.

למורה:

על פי תוכנית הלימודים התלמיד צריך להכיר את מבנה הלב, ואת ההבדלים בין כלי הדם השונים. לא חייבים להדגיש את הבדלי הקוטר אבל חשוב להגדיר מהו עורק ומהו וריד בצורה המדגישה את הדומה והשונה, והקשר בין מבנה לתפקיד. חשוב לפרט מהם תפקידי מערכת ההובלה, כולל תפקידה בוויסות חום הגוף. ניתן לבצע מעבדה של ניתוח לב תרנגול הודו (או לב פרה או חזיר) ולהדגים את מבנה הלב. לאור רגישות הנושא אצל חלק מהתלמידים ניתן לקיים את מעבדת הניתוח כמעבדת רשות.

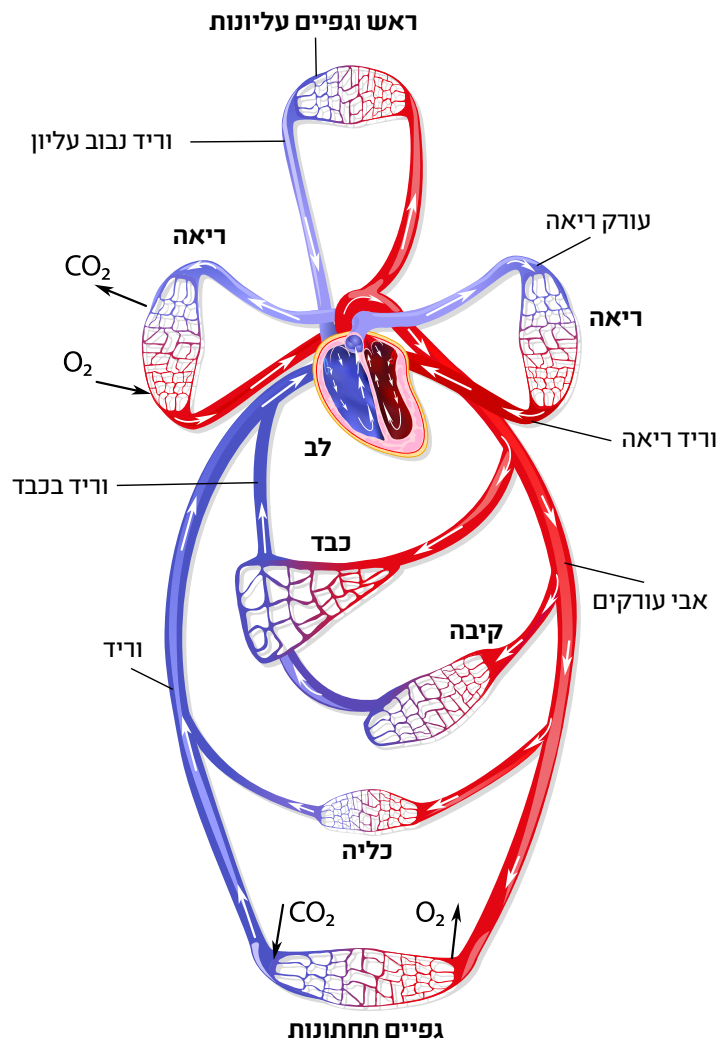
ב. מסלול זרימת הדם

מקובל לחלק את מסלול זרימת הדם לשני מסלולים. האחד מתאר את מעבר הדם מהלב אל האיברים ובחזרה אל הלב והוא נקרא "מחזור דם גדול". והשני מתאר את מחזור הדם מהלב אל הריאות ובחזרה אל הלב והוא נקרא גם "מחזור הדם הקטן".

מחזור הדם הגדול - המחזור הסיסטמי

כאשר החדר השמאלי של הלב מתכווץ, דם עשיר בחמצן נדחף בלחץ גבוה אל אבי העורקים. אבי העורקים הולך מתפצל לעורקים שקוטרם הולך וקטן ככל שמתרחקים מהלב. העורקים הקטנים ביותר נקראים עורקיקים. מן העורקיקים עובר הדם אל תוך רשת של נימים, הפרושה סביב התאים בכל איבר בגוף. בנימים מתרחש חילוף חומרים בין תאי הגוף לבין הדם. חומרים שונים כמו: חמצן וחומרי מזון עוברים מן הדם לאיברים וחומרי פסולת כמו: פחמן דו חמצני עוברים מן האיברים אל הדם. מן הנימים הדם מתנקז אל ורידונים שמתאחדים לוורידים גדולים יותר ויותר, עד שכל הדם החוזר מן הגוף מתנקז אל שני הוורידים הנבובים. אלה מחזירים את הדם אל עליה ימין של הלב. מסלול זרימה זה של הדם נקרא מחזור הדם "הגדול" או מחזור הדם הסיסטמי.

הדם שהגיע דרך שני הורידים הנבובים מן הגוף לעליה ימין של הלב הוא דם עני בחמצן ועשיר בפחמן דו חמצני. הדם עובר אל החדר הימני של הלב ובעת כיווץ הלב מוזרם אל עורק הריאה. מעורק הריאה הדם זורם אל הסתעפויות הולכות וקטנות של עורקים ושל עורקיקים, שנמצאים בריאות. מן העורקיקים הדם זורם אל רשת של נימים, הפרושה על-פני נאדיות הריאה. שם מתבצע חילוף חומרים נוסף: פחמן דו חמצני עובר מן הדם אל נאדיות הריאה וחמצן עובר מנאדיות הריאה אל הדם. מהנאדיות הדם חוזר דרך ורידי הריאה, אל צד עליה שמאל של הלב. בעת כיווץ העליות דם עובר לחדר שמאל ומשם דרך אבי העורקים לכל הגוף, ומחזור הדם הגדול מתחיל שוב.



איור 3: מסלול זרימת הדם. דם יוצא מהחדר השמאלי דרך אבי העורקים ומתפצל לעורקים, עורקיקים ונימים. בנימים מתרחש חילוף הגזים והמומסים עם הרקמות. דם חוזר אל הלב דרך הנימים, ורידונים, ורידים ונאסף אל הוריד הנבוב התחתון והעליון.

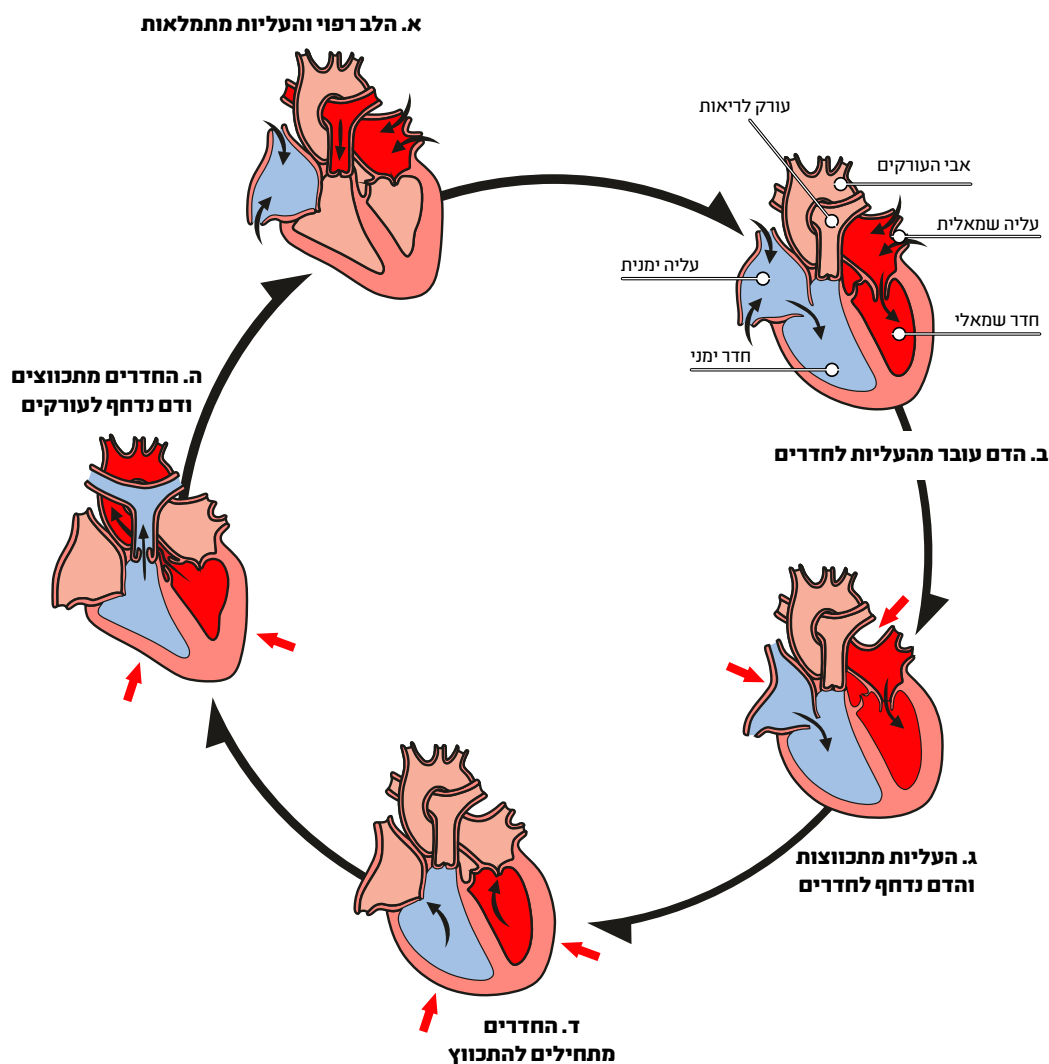
ג. מחזור פעימת לב ותפוקת הלב

למורה:

האיור ישמש את התלמיד ל:

- לזהות את מסלול הזרימה של הדם בשני מחזורי הדם.
- לתיאור התפקיד של כל אחד ממחזורי הדם.
- להסבר כי למעשה מדובר במחזור אחד המתרחש בו זמנית.

- האירועים המתרחשים במהלך פעימת לב אחת נקראים מחזור פעימת הלב. במהלך מחזור הפעימה, מדורי הלב עוברים בין שני מצבים: הרפיה (דיאסטולה) להתכווצות (סיסטולה). אנחנו יכולים לתאר את מחזור זרימת הדם באופן הבא:
1. העליות הרפיויות מתמלאות בדם. דם זורם לחדרים הרפויים.
 2. עליות מתכווצות ודוחסות את שארית הדם אל החדרים הרפויים.
 3. החדרים מתכווצים ולחץ הדם פותח את המסתמים שנמצאים באבי-העורקים ובעורק הריאה. דם יוצא מהחדרים.
 4. לאחר שהחדרים התרוקנו הם נרפים והעליות שבות ומתמלאות.



איור 4: מחזור פעימת הלב. א. הלב נמצא בהרפיה מלאה (דיאסטולה) והעליות מתמלאות בדם. ב. הדם עובר ישירות אל החדרים. ג. כיווץ העליות (סיסטולה) מאפשר להוציא את שארית הדם מהעליות אל החדרים (מסתמי המפרשים נפתחים). ד. החדרים מתחילים להתכווץ (סיסטולה). מסתמי המפרש נסגרים. ה. כיווץ החדרים מוביל את הדם אל העורקים ומשם אל הגוף והריאות. (מסתמי הכיסים נפתחים). לאחר מכן הלב מתרפה.

מדד פיזיולוגי חשוב המתאר את פעילות הלב נקראה תפוקת הלב. תפוקת הלב מוגדרת כמכפלת נפח פעימת הלב - כלומר נפח הדם המוזרם מהחדר השמאלי בכל פעימת לב כפול מספר פעימות הלב בדקה. אצל אדם בוגר הנמצא במנוחה, בכל פעימת לב כ-70 מ"ל של דם מוזרמים מהחדר השמאלי של הלב אל אבי העורקים. ומספר פעימות הלב נע בין 60-80 פעימות לדקה. נפח הדם באדם בוגר הוא בממוצע שבעה ליטרים של דם. אם נכפיל את נפח פעימת הלב בקצב הלב נראה שבכל דקה כמעט כל נפח הדם עובר דרך הלב. נתון זה מרשים ביותר והוא עולה משמעותית כאשר הלב נמצא במאמץ.

ד. לחץ הדם

לחץ מוגדר ככח ליחידת שטח, אם כך, לחץ דם הוא הכח שמפעיל הדם על דופן כלי הדם ומקורו בפעילות הלב המזרים את הדם באופן תדיר לאבי העורקים. הלחץ הנוצר בעת כיווץ הלב נקרא לחץ דם סיסטולי והלחץ הנוצר בעת הרפיית הלב נקרא לחץ דם דיאסטולי. לחץ דם נמדד ביחידות שנקראות מ"מ כספית (mmHg). מוזמנים לצפות בסרטונים הבאים המסבירים כיצד הומצא הברומטר הראשון:

- [המצאת הברומטר - סרטון TEDed](#)
- [הסבר על לחץ וברומטר](#)

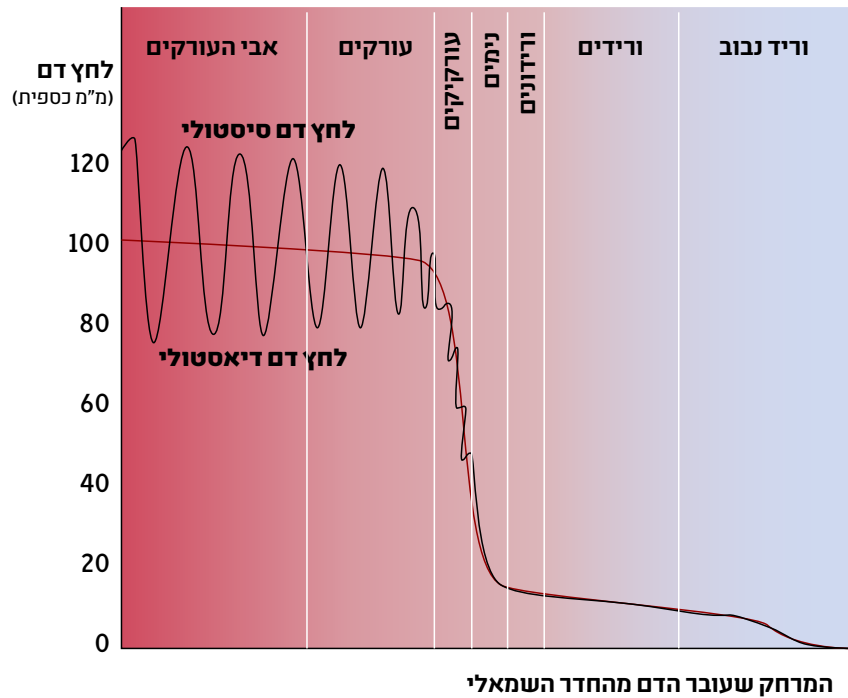
טבלה 1: מדדי לחץ הדם באדם בוגר במנוחה.

מצב רפואי	סיסטולי	דיאסטולי
לחץ דם רצוי	110-120	70-80
גבוה	130-139	85-89
יתר לחץ דם	140<	90<

מערכת ההובלה בבני אדם (כמו גם בשאר החולייתנים) היא מערכת דם סגורה. כמו כן, נוזלים כמו דם אינם ניתנים לדחיסה, שני מאפיינים אלו אחראים על יצירת לחץ הדם במערכת ועל תנועת הדם מהלב אל האיברים ובחזרה אל הלב. המשמעות של נוזל שאינו דחיס היא, שתנועה בקצה אחד של הצינור מניעה את כל הנוזל הנמצא בכלל המערכת בתנועה אחידה קדימה. אך כדי שתתרחש תנועה בצינור חייב להתקיים הפרש לחצים בין שני קצותיו. נוזלים אם כן זורמים מהאזור בעל הלחץ הגבוה למקום בו הלחץ נמוך. במערכת ההובלה לחץ הדם הגבוה ביותר נמדד באבי העורקים והנמוך ביותר נמדד בווריד הנבוב המחזיר דם אל הלב. ככל שהפרש הלחצים גדול יותר כך נפח זרימת הדם (נפח הדם שעובר דרך שטח החתך ליחידת זמן) וקצב זרימת הדם יהיה גדול יותר ומי שאחראי לכך הוא כמובן הלב. אם נתבונן בשינויים החלים בלחץ הדם ככל שהדם מתרחק מהלב נראה כי ככל שהדם מתרחק מהלב לחץ הדם הולך וקטן. (איור 5).

למורה:

- התלמיד יגדיר את המושג לחץ.
- התלמיד יסביר מהו לחץ סיסטולי ומהו לחץ דיאסטולי.
- התלמיד יסביר מדוע על הלחץ הסיסטולי להיות גבוה מהלחץ הדיאסטולי ולמה הכוונה בהפרש לחצים.



איור 5: לחץ הדם כתלות במרחק מהלב. ניתן לראות את לחץ הדם הסיסטולי והדיאסטולי בכל שמתרחקים מהלב. התנודות הגדולות באבי העורקים והעורקים מקורן בהתכווציות הלב. הקו האדום החלקי, מתאר את ממוצע לחץ הדם בכלי הדם השונים.

לחץ הדם נמדד ביחידות של מ"מ כספית. לחץ דם סיסטולי תקין בעת כיווץ הלב יהיה בסביבות 120 מ"מ כ" (מילימטר כספית) ואילו לחץ דם דיאסטולי תקין יהיה נמוך מ 80 מ"מ כ. בתמונה ניתן לראות תנודות מאד גדולות בלחץ הדם שמקורן הן בכיווץ ובהרפיית הלב והן ביכולת של העורקים הקרובים אל הלב להתרחב ולחזור בתנועת החזר (recoil) מהירה שמניעה את הדם קדימה. עוד רואים כי ככל שמתרחקים מהלב לחץ הדם הולך וקטן. הקו האדום החלקי באמצע הגרף מתאר את ממוצע לחץ הדם.

למורה:

- התלמיד יגדיר את המושג לחץ.
- התלמיד יסביר מהו לחץ סיסטולי ומהו לחץ דיאסטולי.
- התלמיד יסביר מדוע על הלחץ הסיסטולי להיות גבוה מהלחץ הדיאסטולי ולמה הכוונה בהפרש לחצים.

ה. הגורמים המשפיעים על לחץ הדם

הערה על חשיבה מערכתית:

חשוב לציין שהפרש הלחצים עליו דברנו מתייחס להפרש הכללי בלחץ הדם בין אבי העורקים לבין הווריד הנבוב. ההתנגדות לזרימת הדם מתייחסת להתנגדות הכללית לזרימת הדם. נקודה זו חשובה שכן אחת ממטרות האוגדן היא ללמד חשיבה מערכתית, ואכן יש הבדל בין התנגדות צינור בודד לבין התנגדות כוללת של המערכת. נחזור ונדגיש נקודה זו לאורך כל היחידה.

כלי הדם מתנגדים לתנועת הנוזל הזורם דרכם. ככל שהדופן שרירית יותר הא מציבה התנגדות גדולה יותר לזרימת הדם. לחץ הדם, שנוצר כאמור על ידי התכווצות הלב, מאפשר לדם לזרום למרות ההתנגדות. ההתנגדות לזרימת הדם משפיעה על נפח זרימת הדם כך שכל שהיא גדולה יותר נפח זרימת הדם יהיה קטן יותר. את התיאור המילולי הזה ניתן להציג גם בצורה מתמטית (משוואה 1).

הפרש לחצים
בין שתי נקודות
בצינור

נפח
זרימה

$$Q = \frac{(p_1 - p_2)}{R}$$

התנגדות
לזרימת הדם

משוואה 1: נפח זרימה Q תלוי בהפרש הלחצים בצינור Δp , חלקי ההתנגדות לזרימה. ככל שההתנגדות לזרימה גדולה יותר נפח זרימת הדם הזורם בכלי הדם שלנו ביחידת זמן (blood volume flow rate) הוא קטן יותר.

משוואה 1 דומה מאד למשוואה אחרת אותה אנו מכירים מלימודי חשמל בכיתה ח'. הכוונה כמובן לחוק אוהם (משוואה 2). השימוש באנלוגיה לחוק אוהם יכול לסייע לתלמידים שכן מאד ברור מדוע כאשר מעלים את המתח (סוללה חזקה יותר) ושומרים על התנגדות קבועה גם עצמת הזרם עולה.

$$R = \frac{\Delta p}{Q} \longrightarrow R = \frac{V}{I}$$

משוואה 2: אנלוגיה בין התנגדות לזרימה לבין חוק אוהם. הפרש המתחים במעגל חשמלי אנלוגי להפרש לחצי הדם; הזרם במעגל החשמלי אנלוגי לנפח זרימת הדם; ובהתאם ניתן לחשב את R .

למורה:

- כדי לפתח עם התלמידים את הנוסחה נתחיל בכתיבת התיאור המילולי שלה. לאחר מכן נתאר כל מרכיב בצורה מתמטית. למשל, אנחנו יודעים שנפח הזרימה תלוי בהפרש הלחצים ובהתנגדות לזרימת הדם ולכן הוא יופיע בצד שמאל של המשוואה. קיים יחס ישר בין הפרש הלחצים לבין נפח הזרימה ולכן ערכים אלו יופיעו במונה. לעומת זאת נפח הזרימה נמצא ביחס הפוך להתנגדות ולכן ערך זה יופיע במכנה.
- התלמיד יסביר את האנלוגיה בין חוק אוהם למשוואת הזרימה של הדם.
- התלמיד יסביר מדוע חייב להתקיים הפרש לחצים כדי שתתקיים זרימה של דם.
- ניתן לקשר לתופעות אחרות כמו דיפוזיה, גם שם מתקיימת תנועה בעקבות הפרש לחצים.

1. התנגדות לזרימת הדם

מהי אותה התנגדות לזרימת הדם אותה הזכרנו, וכיצד היא נוצרת? כלי הדם השונים בגוף, שונים בתכונותיהם וקוטרם, ולכן בכל נקודה במחזור הדם נמצא התנגדות שונה לזרימת הדם. שימו לב שבאיור 5 חולק הגרף בעזרת קווים אנכיים המתארים את התנהגות לחץ הדם בכלי דם בעלי אותו תפקיד פונקציונלי (עורקים, ורידים, נימים). כדי לעזור לנו למדוד את השפעת כלי הדם השונים על זרימת הדם, הוגדר ערך "התנגדות היקפית" המסומן באות R (שימו לב ש-R במקרה הזה מתייחס להתנגדות היקפית ולא להתנגדות כפי שהזכרנו בחוק אוהם). הקוטר של העורקים והורידים הוא גדול לכן ההתנגדות שלהם לזרימה היא קטנה יחסית, בגלל שרוב הדם לא בא במגע עם דופן כלי הדם. עורקים, ורידונים ונימים הם בעלי הקוטר הקטן ביותר ולכן ההתנגדות לזרימת הדם שלהם היא הגדולה ביותר. באמת, אחד התפקידים החשובים של העורקים הוא לווסת את לחץ הדם ההיקפי על ידי שינוי קוטרם. מספיק כיווץ או הרפייה קטנים של כלי הדם אלה, כדי לגרום לשינוי משמעותי בלחץ הדם. המרכז המתווך זאת נמצא בגזע המוח. ההתנגדות ההיקפית תלויה בשלושה גורמים: קוטר כלי הדם, אורך כלי הדם, וצמיגות הדם והיא ניתנת לתיאור בעזרת משוואה 3.

$$R = \frac{8L\eta}{\pi r^4}$$

Labels with arrows:
- "התנגדות לזרימה" points to R
- "אורך הצינור" points to L
- "צמיגות הנוזל" points to η
- "רדיוס הצינור" points to r

משוואה 3: הגורמים המשפיעים על ההתנגדות לזרימת הדם. L - אורך הצינור, η - צמיגות הדם, r - רדיוס הצינור. ההתנגדות לזרימה R, נמצאת ביחס ישר לאורך הצינור ולצמיגות הנוזל, אך ביחס הפוך לרדיוס הצינור.

הרדיוס של כלי הדם:

רדיוס כלי הדם הוא הגורם המשמעותי המשפיע על ההתנגדות לזרימת הדם. שכן, אורך הצינורות בגוף שלנו, וגם, צמיגות הדם, לא משתנים בצורה דרמטית במהלך היום. לעומת זאת, רדיוס כלי הדם נתון לבקרה מתמדת ויכול להשתנות בצורה משמעותית בהתאם לצרכי הגוף. לפי משוואה 3, ניתן לראות שרדיוס הצינור מועלה בחזקה רביעית, כך ששינוי קטן ברדיוס יוביל לשינוי משמעותי בהתנגדות לזרימה.

צמיגות הדם:

צמיגות היא תכונה של גז או נוזל המבטאת את התנגדותו לזרימה. הדם הוא נוזל המורכב ממים, תאי דם אדומים, תאי דם לבנים וחומרים אחרים. כתוצאה מכך צמיגותו גדולה פי 3.5 מזו של מים. צמיגות הדם תלויה ביחס שבין מספר כדוריות הדם לנוזל דם, ככל שצמיגות הדם עולה כך ההתנגדות לזרימה גדולה יותר. גם קוטר הצינור משפיע על צמיגות הדם, ככל שהקוטר קטן צמיגות הדם קטנה. צמיגות נמדדת ביחידות של poise. צמיגות של מים למשל היא 10 mpoise ושל הדם היא 35 mpoise.

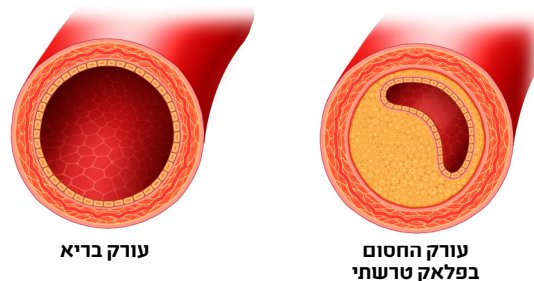
הגורם השלישי הוא האורך הכולל של כלי הדם. ככל שאורך כלי הדם גדול יותר ההתנגדות לזרימה גם כן גדולה יותר. אנשים שמנים מאד, סובלים פעמים רבות מלחץ דם גבוה בגלל כמות גדולה של כלי דם ברקמת השומן. מעריכים שתוספת של ק"ג אחד במשקל מובילה לעליה של כ-800 ק"מ נוספים באורכם של כלי דם (JG, Betts et al. 2013)

למורה:

- מאחר והנוסחה של התנגדות עלולה להיות מעט מאיימת, ניתן להציג לתלמיד נוסחה פשוטה יותר: $R=1/r^4$. המקדמים של הנוסחה הם קבועים, ומאחר ואורך כלי הדם וצפיפות הדם אינם משתנים בצורה דרמטית לאורך היום, בקירוב טוב נוכל להשתמש בנוסחה הזו כדי להדגיש את העובדה ששינוי קטן ברדיוס הצינור מעלה בצורה דרמטית את ההתנגדות לזרימת הדם.
- ניתן להציג לתלמידים נוזלים שונים כמו מים, אתנול שמן ודבש כדי להדגים את הבדלי הצמיגות. חשוב לציין שצפיפות היא גודל פיזיקלי שאינו תלוי בצמיגות. למשל שמן צף על מים אל הוא צמיג יותר. אתנול שוקע במים אך הוא צמיג פחות מהם.
- כדאי לפתור עם התלמידים דוגמה מספרית כפי שהצגנו בהמשך.

דוגמה מספרית:

1. אדם מגיע לבית החולים לבדיקה שגרתית בגלל תחושה של לחץ בחזה. בבדיקה מתגלים עורקים החסומים בצורה משמעותית ברובד טרשתי (מהי טרשת עורקים נסביר בהמשך). הקוטר האופייני של עורק כלילי הוא כ-3 מ"מ, בכמה תעלה ההתנגדות לזרימה אם בגלל הטרשת קוטרו של העורק כעת הוא כ-2 מ"מ בלבד? (איור 6).



איור 6: עורק בריא ועורק חסום ב-50% מקוטרו בגלל טרשת עורקים.

פתרון: כאשר קוטר העורק 3 מ"מ, הרדיוס הוא 1.5 מ"מ. בהתאם לכך ולפי נוסחת ההתנגדות ($R=1/r^4$), ההתנגדות היא 0.2. כאשר קוטר העורק הוא 2 מ"מ, רדיוס העורק הוא 1 מ"מ וערך ההתנגדות הוא 1. מכאן שההתנגדות גדלה פי 5 למרות שהעורק הוצר רק ב-0.33%.

2. חשבו מה תהיה ההשפעה של הקטנת הרדיוס של כלי הדם פי שניים על התנגדות לזרימת הדם - R. הציגו את דרך החישוב.

פתרון: נניח כי רדיוס העורק במצב התקין הוא 1 (ניתן לבחור ביחידות שרירותיות). במצב הזה ההתנגדות תהיה שווה ל-1. אם נקטין את הרדיוס פי 2 ערך ההתנגדות עולה בצורה דרמטית ל-16!.

חשוב לציין, חסימה מקומית בכלי דם, מעלה את ההתנגדות באותו כלי דם בלבד, היצרות מערכתית בכלי הדם ניתן לראות כאשר הגוף מפריש הורמונים שונים לכיוון העורקים בעת נפילה דרסטית בלחץ הדם, או הרחבה קיצונית של כלי הדם למשל בהלם אנפילקטי. שוב אנו מבחינים בין ההתנהגות של הצינור הבודד לבין התנהגות המערכת.

ז. הקשר בין לחץ דם, התנגדות לזרימה ונפח זרימת הדם.

נשלב כעת בין משוואה 1, לבין משוואה 3 ונקבל משוואה חדשה המתארת את הקשר בין לחץ הדם, ההתנגדות לזרימה לבין נפח הזרימה של הדם (משוואה 4). משוואה זו מוכרת כמשוואת האגן-פואזי (Hagen-Poiseuille).

$$Q = \frac{(p_1 - p_2)}{R} \quad R = \frac{8L\eta}{\pi r^4}$$

↓

נפח זרימה	הפרש לחצים	רדיוס הצינור
↑	↑	↑

$$Q = \frac{(p_1 - p_2)\pi r^4}{8L\eta}$$

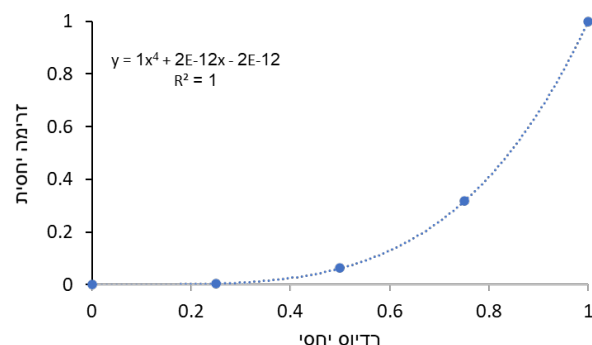
↓

אורך הצינור

צמיגות
הנוזל

משוואה 4: משוואת האגן פואזי. נפח זרימת הדם Q נמצא ביחס ישר להפרש הלחצים בצינור ולרדיוס הצינור ברביעית. וביחס הפוך לאורך הצינור L ולצמיגות הנוזל η.

אם נניח שהפרש הלחצים הוא קבוע, ושארור הצינור וצמיגות הדם קבועים, נוכל לקבל משוואה פשוטה יותר לפיה נפח זרימת הדם נמצא ביחס ישר לרדיוס הצינור כך ש: (איור 7).



איור 7: הקשר בין הרדיוס לבין זרימה יחסית של דם כאשר הפרש הלחצים אורך הצינור וצמיגות הדם קבועים.

למורה:

זאת הפעם הראשונה שהצגנו את סימן הפרופורציה. מאחר מהערכים של המשוואה אינם קבועים לא ניתן להציג אותה כשיווין מוחלט. הדבר נכון לכל המשוואות שתיארנו, אך לא רצינו להעמיס על הקורא עד כה. חשוב להסביר לתלמידים את משמעות הסימן וההבדל בינו לבין סימן השוויון.

נניח ודרישת הדם של האיברים בגוף בעת מאמץ גופני עולה פי 5. כדי לעמוד בדרישת הגוף לפנינו שתי אפשרויות: הראשונה להגדיל את לחץ הדם פי 5 משימה שיכולה להיות מאד מסוכנת ואף בלתי אפשרית. לחלופין ניתן להגדיל את הרדיוס של כלי הדם ב-50% ולקבל את אותה ההשפעה:

$$5Q = \frac{5\Delta p * \pi r^4}{8L\eta} \quad 5Q = \frac{\Delta p * \pi (1.5r)^4}{8L\eta}$$

שתי דרכים להעלאת נפח זרימת הדם. אפשרות אחת, הגדלת הפרש הלחצים פי 5. אפשרות אחרת היא הגדל הרדיוס ב-50% בלבד.

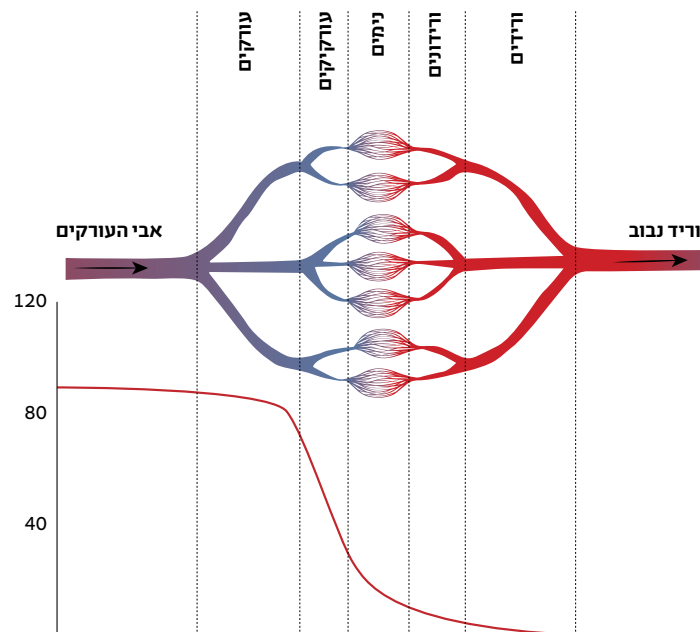
חשוב לציין שכאשר השריר עובד קשה וזקוק לחמצן, אז הפתרון של להעלות לכל הגוף את לחץ הדם לא סביר ולא רצוי, ולכן דרוש פתרון מקומי, כמו התרחבות העורקיים.

דוגמה נוספת:

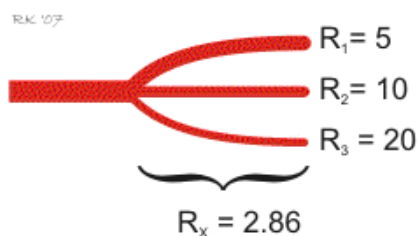
חשבו מה תהיה ההשפעה של הקטנת הרדיוס של כלי הדם פי שניים על נפח הזרימה Q?
פתרון: נעזר שוב בנוסחה הפשוטה שלנו. אם הרדיוס קטן פי 2 הרי שנפח זרימת הדם יקטן פי 16. מכאן שכדי לשמור על אותו קצב זרימה של דם במצב זה נצטרך להעלות את לחץ הדם באותו היחס אך מאחר ולא נוכל להעלותו פי 16 ניתן להניח שקצב הזרימה הכולל ירד.

פרדוקס ההתנגדות

עד כה אמרנו שהגדלת ההתנגדות לזרימת הדם, למשל על ידי הקטנת רדיוס כלי הדם תגרום בהכרח להגדלת לחץ הדם. אולם בעורקיים שהם כלי הדם בעלי ההתנגדות הגדולה ביותר, אנחנו רואים דווקא את הירידה הגדולה ביותר בלחץ הדם (איור 8). גם כאן, כדי להסביר סתירה זו עלינו להבחין בין התנגדות הצינור הבודד להתנהגות המערכת. במערכת כלי הדם ניתן להתייחס לעורקיים המתפצלים מהעורקים וכמוהם גם לנימים כאילו הם מחוברים בצורה מקבילה אחד לשני. במערכת כזו ההתנגדות הכוללת של כלי הדם המחברים במקביל תהיה קטנה מזו של כלי הדם בעל ההתנגדות הקטנה ביותר (איור 9, משוואה 5). המשמעות הביולוגית לכך היא דרמטית. החיבור של כלי הדם באופן מקבילי מקטין בצורה משמעותית את ההתנגדות של כלי הדם לזרימה. וזה מסביר מדוע, הנימים שהם בעלי הקוטר הצר ביותר ולכאורה היינו מצפים להתנגדות הגדולה ביותר משפיעים מעט על לחץ הדם. באותו האופן, אם נשנה את הקוטר של מעט כלי דם המחברים במקביל, ההשפעה על לחץ הדם במקטע תהיה קטנה.



איור 8: לחץ הדם כתלות במרחק מהלב.



$$R_x = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

איור 9: ההתנגדות הכוללת קטנה מזו של כלי הדם בעל ההתנגדות הקטנה ביותר.

$$R_x = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

↓

 התנגדות של כל אחד מכלי
 הדם המחוברים במקביל

התנגדות כוללת

משוואה 5: ההתנגדות הכוללת של כלי הדם המחוברים במקביל קטנה מזו של כלי הדם בעל ההתנגדות הקטנה ביותר.

למורה:

משוואת פואזי היא משוואה חשובה, יחד עם זאת היא יכולה להרתיע תלמידים מסוימים. אנחנו מציעים להתחיל את הצגת הנוסחה בהצגה של הגורמים בצורה מילולית ולאחר מכן לכתוב אותה בצורה מתמטית על הלוח. אם לדעתך הנוסחה מסובכת לתלמידים הרי שאפשר להציג רק את המשוואות הפשוטות שפיתחנו. בכל מקרה חשוב לדעתנו להציג בדוגמה מספרית את הקשר בין ההתנגדות או נפח הזרימה לרדיוס.

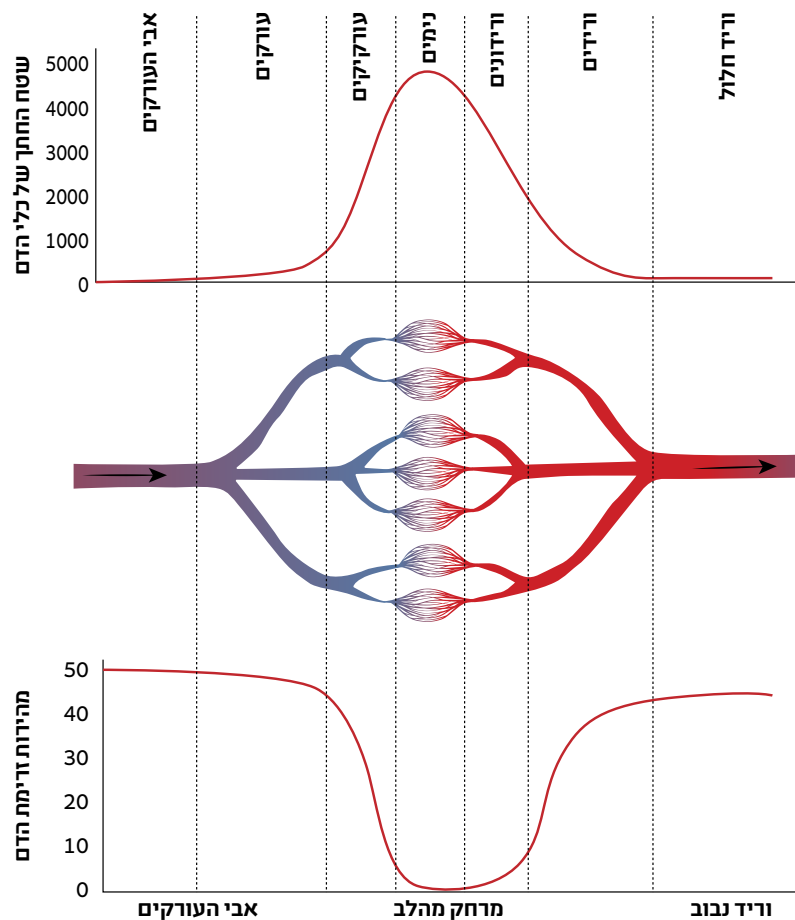
- התלמיד יתאר את הקשר בין נפח זרימת הדם לבין ההתנגדות לזרימת הדם.
- התלמיד יסביר מדוע ההתנגדות הכוללת בעורקים או בנימים קטנה ממה מהמצופה מכלי דם בעל קוטר קטן.

ח. מהירות זרימת הדם

לחץ ומהירות זרימה של נוזל הם שני גדלים מצומדים, ולכן לא ניתן לדון בלחץ דם בלי לדון בגורמים המשפיעים על מהירות זרימת הדם. בכל פעימה של הלב מוזרמת כמות גדולה של דם העוברת דרך אבי העורקים אל כל הגוף. הדם היוצא מאבי העורקים עובר דרך העורקים, העורקים והנימים לפני שהוא חוזר בחזרה אל הלב. מכאן שבאבי העורקים בכל מחזור עוברת כמות הדם המוזרמת לכל הגוף בפעימה אחת. ואילו בכל נים זורם דם בכמות שהיא פחות מאחד חלקי מיליארד של אותה כמות. הזרימה האיטית בנימים היא בעלת חשיבות פונקציונלית מאחר ושם מתרחש תהליך חילוף החומרים בין הנים לבין הרקמה. אם נתבונן במהירות זרימת הדם בכלי הדם השונים כתלות במרחק מהלב נראה שמהירות זרימת הדם הגדולה ביותר היא באבי העורקים, וככל שמתרחקים מהלב מהירות הזרימה קטנה (איור 10, טבלה 2).

לאחר היציאה ממצע הנימים נאסף הדם בחזרה אל הלב. כאן ניתן לראות שככל שמתקדמים לכיוון הלב, מהירות זרימת הדם עולה שוב. שלושה גורמים אחראים לכך שמהירות זרימת הדם עולה:

1. מסתמים בוורידים הרגליים שמונעים מדם לחזור אחורה בעקבות השפעת כח המשיכה.
2. שרירי שלג שלוחצים כנגד הוורידים ועוזרים לדחוף את הדם לכיוון הלב.
3. תת לחץ שנוצר בעלייה הימנית של הלב שגורם לכך שהדם "נשאב" לתוך העליה וממנה ישירות לחדר הימני.



איור 10: מהירות זרימת הדם כתלות במרחק מהלב ובהשוואה לשטח החתך הכולל של כלי הדם.

טבלה 2: השוואה בין סכום שטחי החתך של כלי הדם, ומהירות הזרימה הממוצעת.

סוג כלי הדם	סכום שטח חתך הרוחב הכללי (סמ"ר)	מהירות זרימה ממוצעת (ס"מ לשנייה)
אבי העורקים	2.5	40
עורקים	20	25
עורקיקים	40	5
נימים	2500	0.1
ורידונים	250	1.5
ורידים	80	3
וריד נבוב	8	15

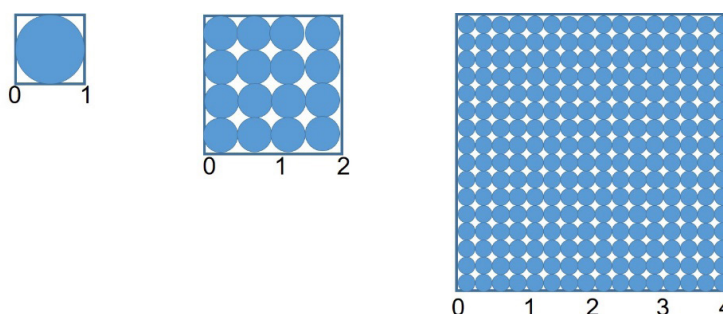
מהירות זרימת הדם נמדדת בס"מ לשנייה, והיא נמצאת ביחס הפוך לסכום שטחי החתך הכולל של כל כלי הדם מאותו הסוג (משוואה 6). (שטח החתך של צינור מוגדר כשטח העיגול המתקבל כאשר חותכים את הצינור לרוחבו). (טבלה 2).

$$\bar{v} = \frac{Q}{\pi r^2}$$

נפח הזרימה
מהירות זרימה ממוצעת.

שטח חתך של צינור

משוואה 6: המהירות הממוצעת של זרימת הדם היא היחס בין קצב הזרימה לשטח החתך של צינור מאותו הסוג (עורק או וריד למשל). באיור 11 ניתן לראות זאת בצורה מוחשית יותר. הזמן שייקח לצינורית בקוטר שרירותי של 1 ס"מ לרוקן נפח קבוע של מים, יהיה זהה לזמן שייקח ל-16 צינוריות שהקוטר של כל אחת מהן הוא 0.5 ס"מ או ל-256 צינוריות שהקוטר של כל אחת מהן הוא 0.25 ס"מ.



איור 11: נפח הזרימה בצינורית הגדולה שווה לנפח של 16 צינוריות שקוטרן מחצית מקוטר ול-256 צינוריות שקוטרן הוא רבע מקוטר. זה נכון מאחר והסברנו שנפח הזרימה פרופורציוני לרדיוס בחזקה הרביעית. לפיכך [סרטון](#) שמדגים נקודה זו בצורה יפה מאד.

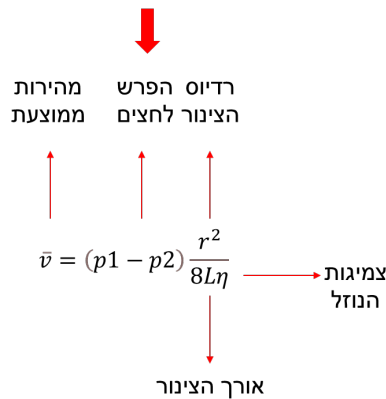
למורה:

- התלמיד יסביר בצורה איכותית מדוע מהירות זרימת הדם קטנה ככל שמתרחקים מהלב.
- התלמיד יסביר מהם הגורמים שתורמים להחזרת הדם אל הלב.
- התלמיד יסביר את החשיבות התפקודית בקצב זרימת דם איטי בנימים.
- התלמיד יסביר את המושג שטח חתך של צינור וסכום שטחי חתך.
- את נוסחת המהירות אנחנו פוגשים בדרך כלל בכיתה ט' כאשר מלמדים פיזיקה בכיתה ט'. המורה יחליט האם שימוש בנוסחה יעזור לתלמידיו להבין טוב יותר את ההשפעה של שטח החתך על המהירות, או שישאיר זאת לדיון מאוחר יותר בכיתה ט'.

ט. הקשר בין מהירות הזרימה הדם לנפח הדם שעובר בעורק או בוריד

כדי הבין מהי מהירות הזרימה של נוזל בצינור לספיקה, אנחנו יכולים להציב במשוואה 6 את ה-Q שקבלנו במשוואה 4 כך שנקבל משוואה חדשה (משוואה 7) המתארת את הקשר בין מהירות הזרימה להפרש הלחצים בצינור.

$$\bar{v} = \frac{Q}{\pi r^2} \quad Q = \frac{(p_1 - p_2)\pi r^4}{8L\eta}$$



משוואה 7: מהירות הזרימה נמצאת ביחס ישר להפרש הלחצים בצינור, לרדיוס הצינור וביחס הפוך לאורכו של הצינור ולצמיגות הנוזל.

י. משוואת ברנולי ומשוואת הרציפות

אחד הקשיים בדיון על לחץ דם ותנועה של נוזלים הוא ההבדל בין התנהגות הנוזלים בצינור בודד לבין התנהגותם במערכת כמו מערכת ההובלה. כדי להמחיש את הבדלים אלו, נדון במשוואת ברנולי ומשוואת הרציפות.

משוואת ברנולי

דניאל ברנולי היה מדען ומתמטיקאי שווייצרי שחי במאה ה-18 והוא היה הראשון שתיאר את הקשר המתמטי בין ולחץ ומהירות של זורמים (גזים או נוזלים). לפי ברנולי: "במערכת עם חומר זורם שאין בה הוספה או גריעה של אנרגיה, סכום האנרגיות השונות של החומר קבוע. כתוצאה מכך כאשר מהירות החומר גדלה - הלחץ שלו קטן, ולהיפך" (משוואה 8, איור 12). למרות המראה המאיים של המשוואה, בחלק לתלמיד נציג דרכים לשילוב הנושא לתלמידים ברמות שונות.

אנרגיה קינטית לחץ בנקודה 1

ב

$$P_1 + \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

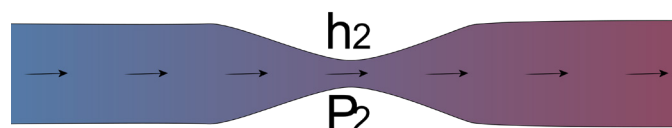
אנרגיה קינטית אנרגיה פוטנציאלית לחץ בנקודה 1

א

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho g v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho g v_2^2$$

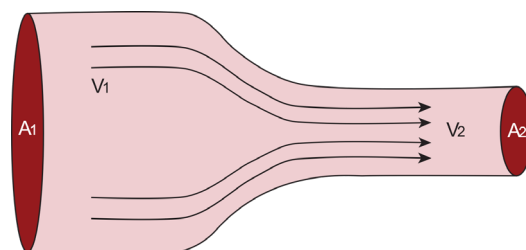
$\downarrow$ $\downarrow$
 mgh $1/2 m v^2$

משוואה 8. (א) משוואת ברנולי. P - לחץ הנוזל; ρ - צמיגות הנוזל; g - כח המשיכה; y - גובה; V - מהירות. (ב) בהנחה וגובה הצינור וצמיגות הנוזל אחידים ניתן להגיע למשוואה פשוטה יותר בה הלחץ והמהירות בצד אחד של הצינור שווים ללחץ ולמהירות בצידו השני.



איור 12: עקרון ברנולי. בנקודה בה מתרחשת היצרות בצינור, מהירות הזרימה עולה אך הלחץ קטן.

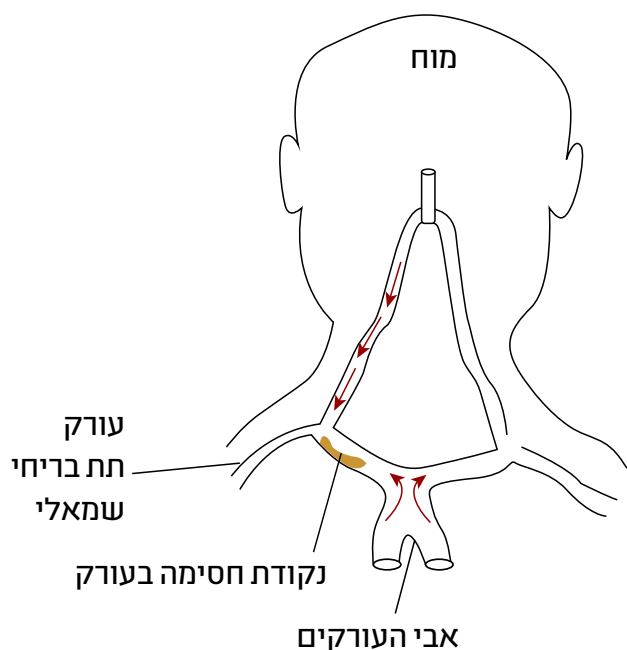
כלל נוסף החל על תנועה של נוזל בצינור בא לידי ביטוי במשוואת הרציפות. לפי כלל זה, מכפלת שטח הפנים במהירות הזרימה צריכה להיות שווה בין שני חלקיו של הצינור כך שמתקבלת הנוסחה: $A_1 V_1 = A_2 V_2$.



איור 13: כאשר נוזל זורם בצינור שנעשה צר, מהירות הזרימה עולה כך שהמהירות בנקודה v2 גדולה יותר ממהירות הזרימה בנקודה V1. בהתאם לכך מתקיים השוויון $A_1 V_1 = A_2 V_2$.

התקף איסכמי חולף

כדי להמחיש את עקרון ברנולי נעזר בדוגמה הבאה. באיור 14 מתואר פלג גופו העליון של אדם בוגר. באיור רואים את כלי הדם המזרימים דם מהלב אל הראש. נניח שבנקודה המסומנת בחץ כחול, כלי הדם הוצר בגלל פלאק טרשתי. לפי משוואת הרציפות, שטח החתך של כלי הדם קטן ועל כן מהירות הזרימה צריכה לעלות. כעת לפי משוואת ברנולי אנחנו כבר יודעים שאם מהירות הזרימה עולה הרי שהלחץ קטן. בהתאם לעקרונות זרימת הדם לפיהם דם זורם תמיד מהמקום בו לחץ הדם גבוה לכיוון המקום בו לחץ הדם נמוך יותר, כעת דם יזרום מהחלק העליון (מסומן באדום) של העורק השמאלי לכיוון האזור בו קיימת היצרות בכלי הדם. כתוצאה מכך יחווה האדם התקף איסכמי - אי הגעה של דם וחמצן אל המוח. התסמינים של אירוע מוחי איסכמי חולף נמשכים זמן קצר ממספר דקות עד ל-24 שעות וחולפים בלי להותיר נזק תמידי. אירוע מוחי איסכמי זמני עלול להצביע על סיכון מוגבר להופעה עתידית של אירוע מוחי.



איור 14: מערכת העורקים המובילה דם מהלב אל המוח, וחסימה מקומית בצד השמאלי של המערכת.

- משוואת ברנולי יכולה להיות מרתיעה, אבל משוואת הרציפות פשוטה הרבה יותר. מכאן שבהתאם לגיל התלמידים ניתן לבחור במה להתמקד. כמו כן, את הדיון במשוואת ברנולי ניתן לדחות לכיתה ט' ולקשרו לשיעורי פיזיקה לפרק הדין בחוקי המכניקה של ניוטון.
- ניתן להדגים את עקרון ברנולי תוך שימוש בצינור ונטורי. (ניתן להזמין דרך הספקים המוכרים של ציוד מעבדות).
- שימוש בסימולציות PHET וסימולציות Gogebra ממחישות בצורה טובה את הנושא (יודגמו בחלק הבא של האוגדן).

יא. דפי נוסחאות למורה ולתלמיד

טבלה 2: נוסחאות מערכת ההובלה - למורה

מספר משוואה	תיאור	נוסחה
1	התנגדות לזרימה של נוזל	$R=8L\eta/(\pi r^4)$
2	נפח זרימה	$Q=(p_1-p_2)/R$
3	נפח זרימה - משוואת היגן-פואזיי	$Q=(p_1-p_2)\pi r^4/8L\eta$
4	מהירות זרימה ממוצעת	$v=Q/\pi r^2$
5	מהירות זרימה ממוצעת	$v=(p_1-p_2)\pi r^4/8L\eta$

טבלה 3: נוסחאות מערכת ההובלה - לתלמיד

מספר משוואה	תיאור	נוסחה
1	התנגדות לזרימה של נוזל	$R=1/r^4$
2	נפח זרימה	$Q=(p_1-p_2)/R$
3	מהירות זרימה ממוצעת	$v=Q/\pi r^2$
4	משוואת הרציפות	$A_1 V_1 = A_2 V_2$

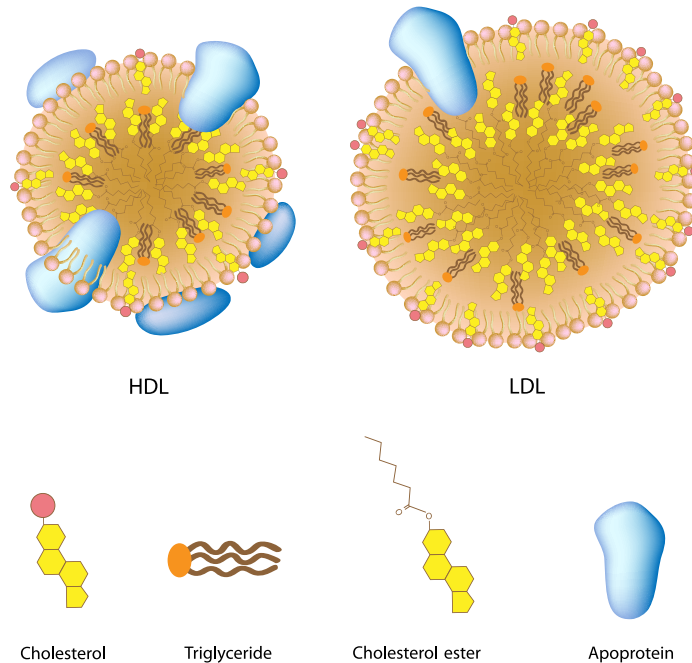
י.ב. טרשת עורקים

קצת על ליפופרוטאינים:

ליפופרוטאינים מורכבים מטריגליצרידים וליפידים נוספים שמסביבים חלבונים, פוספוליפידים, וכולסטרול. כולסטרול אינו מסיס במים ולכן כדי להעביר אותו בדם צריך להפוך אותו לכזה. דבר זה נעשה בעזרת שני ליפופרוטאינים HDL ו LDL. HDL משנעים כולסטרול מהכבד לתאים לבנית רקמות התא, וליצירת הורמונים סטרואידים ומלחי מרה. כמות גבוהה של LDL מעודד יצירת פלאקים טרשתיים ולכן נחשב לכולסטרול רע. HDL לעומת זאת משנע עודפי כולסטרול מהגוף לכבד ולכן נחשב לכולסטרול טוב.

התעבות דופן העורקים ואבוד הגמישות שלהם הוא המאפיין המרכזי של קבוצת מחלות שנקראות טרשת עורקים. המחלה מאופיינת ביצירת פלאקים טרשתיים כתוצאה מהצטברות של ליפופרוטאינים (מולקולות בהן יש חלק ליפידים ומרכיב חלבוני - ראו מסגרת), על דופנות העורקים. חלבוני ה-LDL ששקעו על העורקים, מתחמצנים וקושרים מולקולות סוכר. העורקים, מגיבים לכך כאילו היו מותקפים על ידי גורם זר ומתחילה תגובה דלקתית. כתוצאה מהתהליך הדלקתי, כלי הדם מתרחבים ועולה חדירותם למקרופאג'ים¹. רקמת האנדותרל ורקמת השריר של העורק מפרישה חומרים שמגייסים מקרופאג'ים

שבולעים את ה-LDL המחומצן. גם תאי T מגויסים למקום הדלקת, שם הם מפרישים חומרים שמגבירים את עצמת התהליך הדלקתי. המקרופאג'ים שבלעו LDL - מחומצן נראים במקרוסקופ כשכבת קצף (foam cells). למעשה, הפלאק הטרשתי הראשוני מורכב ממקרופאג'ים, מתאי קצף ומתאי T. לכשעצמו, הפלאק הטרשתי אינו חוסם את כלי הדם בהכרח, משום שהגדילה שלו היא לתוך דופן כלי הדם. אבל הרובד הטרשתי מהווה אתר ליצירת קריש דם שיכול להצר את כלי דם. גורמי הסיכון לטרשת עורקים כוללים: עישון, לחץ דם גבוה, כולסטרול גבוה, גנטיקה, גיל זווּיג (זכר או נקבה).



איור 15: מבנה של ליפופרוטאינים. יחידות חלבוניות מסיסות במים הקושרות מולקולות של חומצות שומן שאינן מסיסות במים.

למורה:

- התלמיד יסביר מהם הגורמים לטרשת עורקים, מהם דרכי המניעה ומה הסכנות בהתפתחות טרשת עורקים.

1. פאגוציטים הם תאי דם לבנים שיכולים לבלוע גופים זרים שחדרו לגוף כמו חיידקים וגופים. במערכת החיסון של הגוף מוכרים שלושה סוגים של תאים בעלי יכולת פאגוציטוזה: נוטרופילים, מאקרופאג'ים ומונוציטים.

כדי להשיג את מטרות היחידה והאוגדן בחרנו להשתמש בשני כלים פדגוגיים הנותנים מענה לשונות לומדים. שימוש בלוחות בחירה בשילוב של אסטרטגיית (אתי, לידי במרחב). נתחיל בפירוט על כל אחד מהשיעורים ולבסוף נציג כיצד ניתן להשתמש באסטרטגיית של לוחות בחירה להוראת היחידה.

שיעור 1 - החברה להנדסת יצורים חדשים (מתוך מטמון חדש לכיתה ז' פרק 6 חוקרים מערכות הובלה עמ' 124).

אתם מהנדסים בשירות חברה דמיונית להנדסת יצורים חדשים. קיבלתם משימה: לתכנן מערכת הובלה של יצור פרי דמיונכם. מערכת הובלה היא זו המשנעת (מעבירה) חומרים, גופים, אנרגיה או מידע ממקום למקום. לצורך ביצוע המשימה ענו על הסעיפים הבאים:

- לפני שאתם ניגשים לתכנון מערכת ההובלה תארו בקצרה את היצור הדמיוני. בתיאורכם התייחסו לסעיפים הבאים:
 - א. כיצד הוא נראה? הסבירו במילים והוסיפו ציור.
 - ב. באיזו סביבה הוא חי?
 - ג. תארו את אורח חייו (מה הוא עושה במהלך היום והלילה).
- שלב מקדים לתכנון ובנייה של כל מערכת הוא הגדרת תפקיד המערכת. הגדירו את תפקיד המערכת לפי הסעיפים הבאים:
 - א. מדוע יש צורך במערכת ההובלה?
 - ב. אילו חומרים המערכת מובילה? הביאו בחשבון חומרים חיוניים ופסולת.
 - ג. מדוע החומרים החיוניים דרושים ליצור שתכננתם?
 - ד. מדוע חומרי הפסולת צריכים להיות מסולקים?
- השלב הבא הוא תכנון המערכת: רכיבים, תהליכים והקשר ביניהם. לצורך התכנון היעזרו בסעיפים הבאים:
 - א. אילו רכיבים בונים את המערכת שלכם?
 - ב. אילו תהליכים מתרחשים במערכת?
 - ג. הקשר בין הרכיבים הבונים את המערכת ובין התהליכים המתרחשים במערכת.
- הציגו בפני הכיתה את היצור הדמיוני ואת מערכת ההובלה שתכננתם (התייחסו לסעיפים 1-3).

שיעור 2 - מודדים לחץ דם

אוכלוסיית יעד:

תלמידים בכיתה ז'-ט' לאחר שלמדו על מבנה מערכת ההובלה וכלי הדם.

בתום השיעור התלמיד:

- יסביר מהו לחץ
- יתאר כיצד ממודדים לחץ דם.
- ידע מהו ההבדל בין לחץ הדם סיסטולי לבין לחץ דם דיאסטולי
- ידע מהם הערכים ללחץ דם תקין
- מהלך השיעור

חלק ראשון - מהו לחץ?

לחץ הוא מונח המתאר כח ליחידת שטח. אנחנו פוגשים את המונח לחץ ביום יום בהקשרים רבים, לחץ אוויר, לחץ צמיגים, לחץ דם, לחץ נפשי ועוד.

בתחנות שלפניכם הוכנו הדגמות שונות הממחישות את מושג הלחץ. עברו בתחנות השונות, בצעו את ההתנסויות וענו על השאלות בתום ההתנסות:

א. **תחנה ראשונה:** לפניכם משאבת אוויר וכדור ריק מאוויר. נפחו את הכדור, תארו את מאמץ הניפוח כתלות בנפח הכדור.

ב. בקשו מאחד מחברי הקבוצה לעמוד מול הקיר וללחוץ כנגד הקיר עם אחת הידיים. עמדו מאחורי התלמיד הראשון ולחצו על גבו בעדינות. על התלמיד הראשון לתאר את תחושותיו בהתאם לכמות התלמידים שלחצה על גבו.

ג. חממו פחית שתיה סגורה והכניסו אותה לקערת מים קרים. תארו את המתרחש.

ד. **ניסוי בהדגמה:** לפניכם ארלנמיייר וביצה קשה ללא הקליפה. לתוך הארלנמיייר נכניס חתיכת נייר ונדליק אותה. מייד עם הדלקת הנייר הניחו את הביצה על פיית הארלנמיייר. צפו במתרחש. כדי להוציא את הביצה, ננשוף לתוך הכלי, ומיד נתן לביצה לסתום את הפיה. הביצה צפויה לעלות החוצה.

שאלות סיכום

מה משותף לכל ההתנסויות שבצעתם? האם תוכלו למצוא הסבר מדעי אחד המתאר את התוצאות שקבלתם בכל אחת מההתנסויות?

חלק שני

- לפניכם מד לחץ דם דיגיטלי. קראו את הכתבה הבאה המתארת את מנגנון הפעולה של מכשירים למדידת לחץ דם.
- מדדו בעת מנוחה את לחץ הדם והדופק של כל אחד מחברי הקבוצה.
- חזרו על הפעולה לאחר פעילות גופנית קצרה (קפיצה במקום 20 פעמים למשל).
- הזינו את התוצאות שקבלתם בקובץ השיתופי הייעודי שהכין המורה. אין צורך לציין את שמכם בקובץ, מספיק לציין את מספר התלמיד שקבלתם מהמורה. הנה דוגמה לקובץ שניתן להכין לתלמידים.

תלמיד מספר	לחץ דם סיסטולי	לחץ דם דיאסטולי	דופק	זכר/נקבה	מצב פעילות
1					מנוחה
2					מנוחה
3					מנוחה
4					מנוחה
1					לאחר פעילות
2					לאחר פעילות
3					לאחר פעילות
4					לאחר פעילות

5. דונו במליאה בדרכים שונות לניתוח התוצאות שהתקבלו.
6. הציגו בעזרת תרשים את ממוצע לחץ הדם הסיסטולי (של בנים ובנות בנפרד) בעת מנוחה ובעת פעילות גופנית. האם מצאתם הבדל?
7. חשבו על דרך להציג את הקשר בין הדופק בעת מנוחה או לאחר פעילות גופנית לבין לחץ הדם הסיסטולי שנמדד.

סיכום השיעור:

1. הגישו מסמך לסיכום ההתנסות לפי המבנה הבא:
 - א. מטרת ההתנסות
 - ב. מהלך ההתנסות
 - ג. תוצאות ההתנסות: התרשימים שקבלתם כולל תיאור מילולי של התוצאות.
 - ד. כתבו את המסקנה שלכם מההתנסות.
2. מדוע נהוג להבחין בין תוצאות של בנים ובנות?
3. מדוע נהוג להבחין בין לחץ דם במאמץ לבין לחץ דם במנוחה.

שיעור 3 - חוקרים את לחץ הדם

מטרת השיעור:

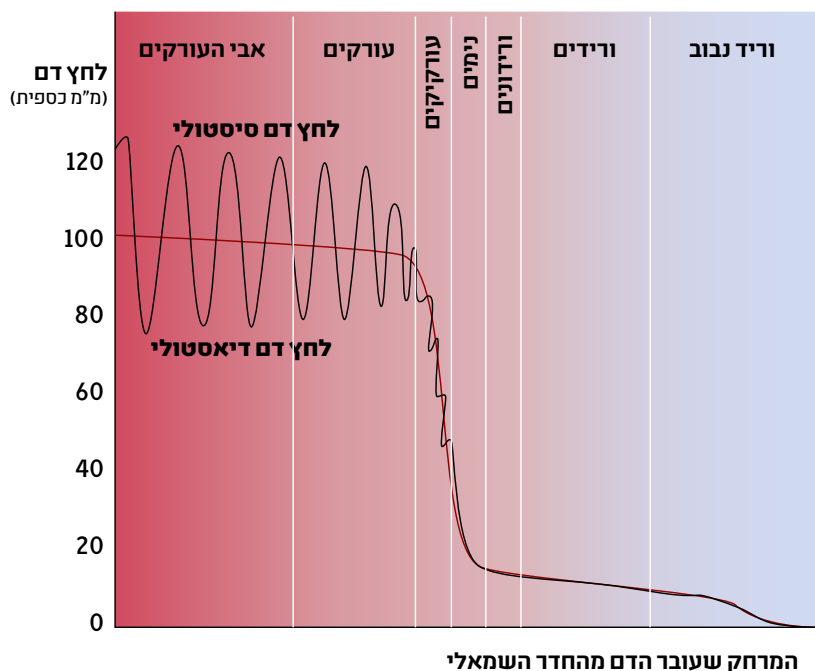
לתאר את השינוי בלחץ הדם כתלות במרחק מהלב.

בתום השיעור התלמיד:

1. יסביר מה ההבדל בין לחץ דם סיסטולי לבין לחץ דם דיאסטולי.
2. יתאר את השינויים בלחץ הדם כתלות במרחק מהלב.
3. יסביר את החשיבות התפקודית של הלחץ הדם הנמוך בנימים.

מהלך השיעור:

התבוננו בגרף המתאר את לחץ הדם בכלי הדם השונים וענו על השאלות הבאות:



1. תארו את השינוי בלחץ הדם כתלות במרחק מהלב.
2. ממה לפי דעתכם נגרמים השינויים בלחץ הדם?
3. מהו לחץ דם סיסטולי ומהו לחץ דם דיאסטולי?
4. היכן מתרחשת הירידה הגדולה ביותר בלחץ הדם? מדוע?
5. מהי לדעתכם החשיבות בשינוי בלחץ הדם בכלי הדם השונים?

שיעור 4 - חוקרים את משוואת הרציפות בעזרת סימולציית PHET

מטרת השיעור:

לחקור בעזרת סימולציית PHET את המאפיינים של משוואת הרציפות וחוק ברנולי.

בתום השיעור התלמיד:

1. יתאר כיצד שינוי רדיוס הצינור ישפיע על מהירות זרימת הדם בנקודת היצרות.
2. יסביר את תוצאות ההתנסות תוך שימוש במשוואת הרציפות $A_1 V_1 = A_2 V_2$.

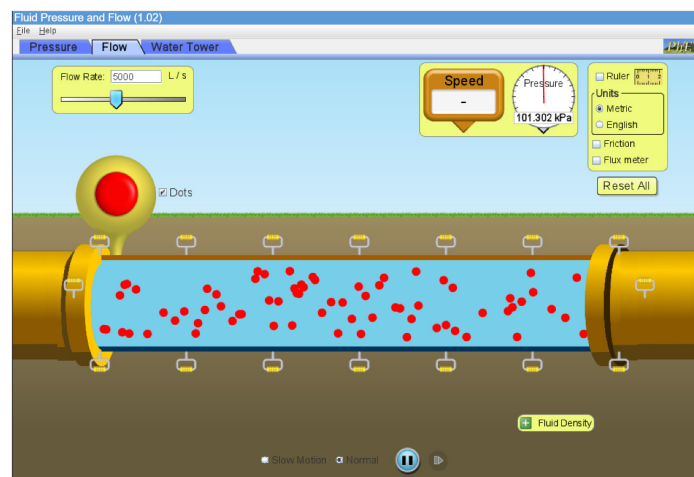
ידע קודם:

- התלמיד למד על מבנה מערכת ההובלה ועל לחץ הדם.
- אפשר להשתמש בסימולציה לפני הוראת הנושא הכמותי בכיתה.

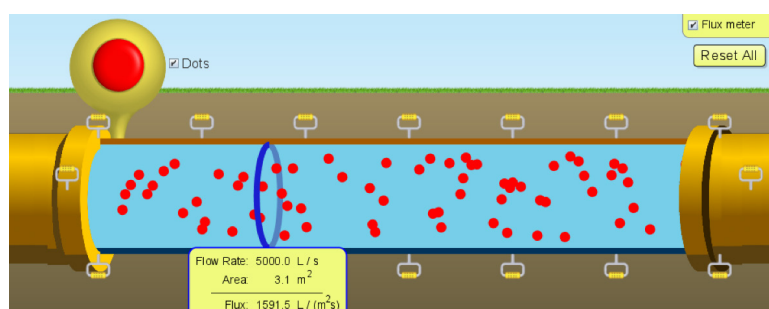
חלק ראשון - סימולציית PHET

פתחו את היישומון [בקישור](#):

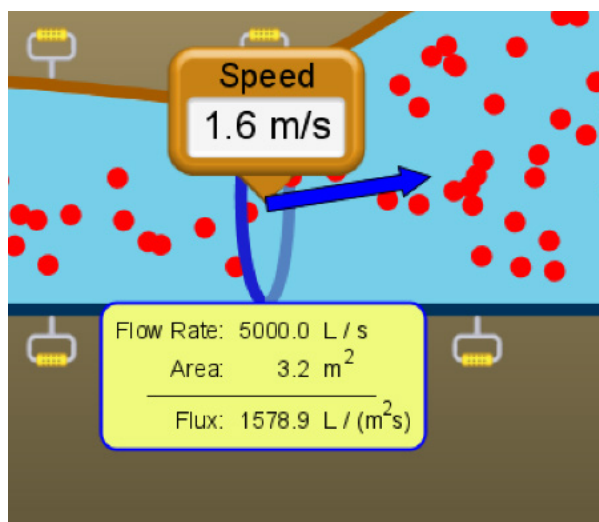
1. לחצו על לשונית FLOW וודאו כי קבלתם את המסך הבא:



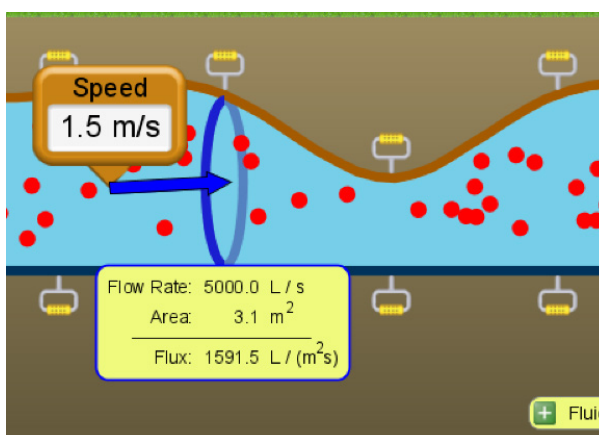
2. לחצו על תיבת הבחירה flux meter (מד שטף) והזיזו את העיגול המתקבל לצד השמאלי של הצינור. העתיקו למחברת או לגיליון אלקטרוני את הנתונים המוצגים בישומון: מהירות הזרימה, שטח החתך, שטף.



3. הוסיפו את חיישן מהירות הזרימה, הקפידו שהחץ החום של החיישן יהיה בתוך העיגול, העתיקו את המהירות המוצגת:

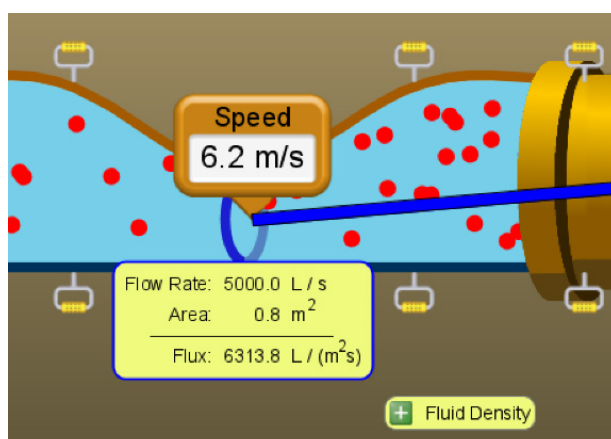


4. הצרו את הצינור באחת הנקודות ותארו את המתרחש



5. העבירו את מד השטף לנקודת ההיצרות וכתבו במחברת את נתוני הדגימה חדשים. הקפידו שהחץ החום של חיישן

הזרימה נמצא במרכז העיגול.



6. חזרו על הפעולה לפחות 3 פעמים ובכל פעם העתיקו את הנתונים למחברת. בצעו ממוצע של שלוש המדידות

לפני ולאחר ההיצרות ונסו למצוא חוקיות מתמטית המתארת התוצאות שקבלתם.

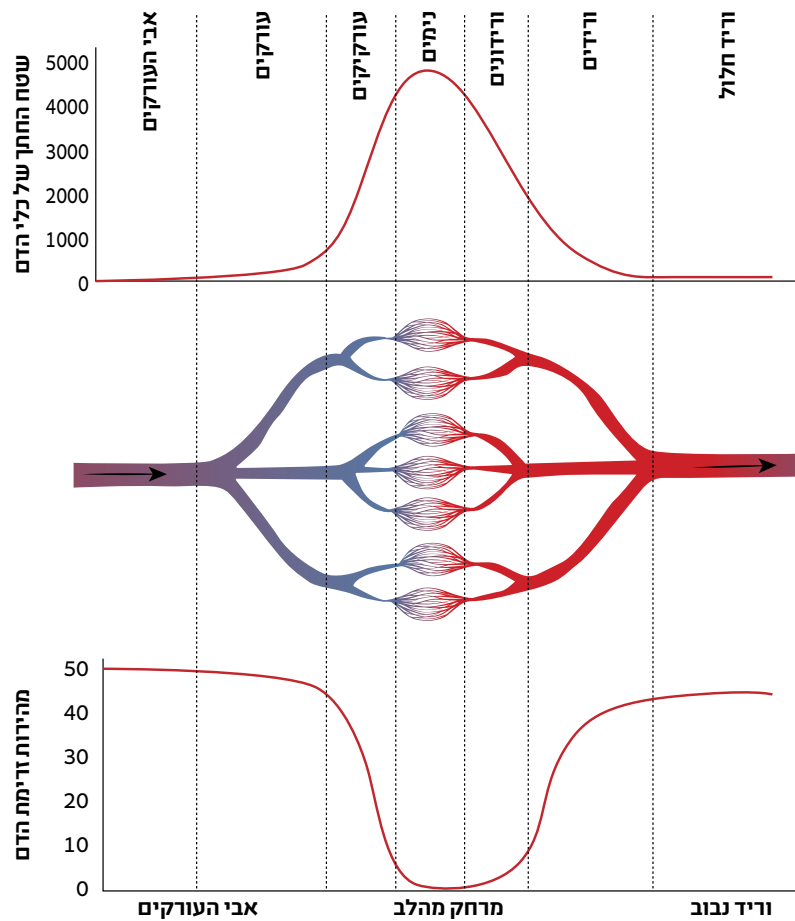
חזרה מספר	V_1	A_1	$A_1 * V_1$	A_2	V_2	$A_2 * V_2$
1	1.6	3.2	5.12	6.4	0.8	5.12
2	0.7	6.9	4.83	1.5	3.3	4.95
3	0.5	10.5	5.25	1	4.9	4.9
ממוצע	0.9333	6.8667	5.0667	2.9667	3	4.99

סיכום חלק ראשון

ראינו כי קיים יחס ישר בין מכפלת שטח חתך הצינור ומהירות הזרימה בין שי נקודות בצינור. את הקשר המתמטי ניתן לתאר באופן הבא: $A_1 V_1 = A_2 V_2$.

חלק שני - קישור למערכת ההובלה

כאשר בוחנים את מהירות זרימת הדם בכלי הדם השונים אנחנו רואים כי בנימים שהם כלי הדם הצרים ביותר מהירות זרימת הדם היא האיטית ביותר. אולם ביישומון ראינו שדווקא כאשר מצרים את הצינור מהירות הזרימה עולה. 1. תארו את התרשים המופיע בתמונה.



איור 16: מהירות זרימת הדם כתלות במרחק מהלב ובהשוואה לשטח החתך הכולל של כלי

2. כיצד ניתן להסביר את הסתירה בין הצפי לפי משוואת הרציפות לבין מהירות זרימת הדם בפועל?
3. מהו היתרון הפיזיולוגי בכך שמהירות זרימת הדם בנימים היא האיטית ביותר?
4. מה גורם לעליה במהירות זרימת הדם בוורידים?

שיעור 5 - חוקרים את משוואת ברנולי בעזרת גאוגברה

מטרת השיעור:

לחקור בעזרת סימולציית גאוגברה את חוק ברנולי. משוואת ברנולי מתארת את הקשר בין לחץ נוזל ומהירות זרימת הנוזל.

בתום השיעור התלמיד:

1. ידע להסביר מה מתארת משוואת ברנולי.

2. יתאר כיצד שינוי רדיוס הצינור ישפיע על מהירות זרימת הדם בנקודת היצרות.

יסביר את תוצאות ההתנסות תוך שימוש במשוואת הרציפות $A_1 V_1 = A_2 V_2$.

ידע קודם:

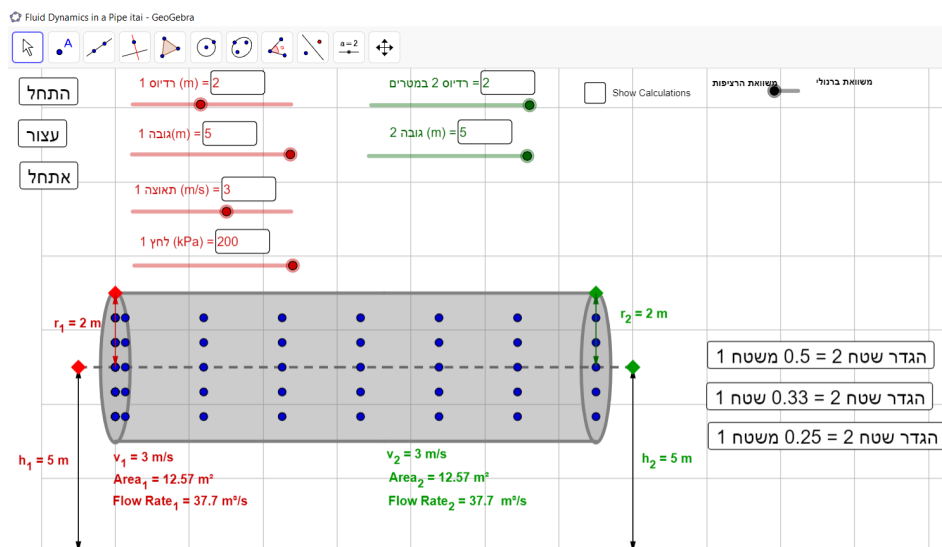
- התלמיד למד על מבנה מערכת ההובלה ועל לחץ הדם.
- התלמיד למד מהי אנרגיה פוטנציאלית ואנרגיה קינטית ומכיר את המשוואות המתמטיות המתארות אותן.

אוכלוסיית יעד

- תלמידי כיתה ט' לאחר שלמדו את הפרק הרלוונטי בפיזיקה.
- ניתן להשתמש כמשימת רשות לתלמידים מצטיינים וסקרנים בכיתה ח' או בכיתה ט'.
- המורה יכול לבחור להציג במליאה את ההדמיה כדי להדגים את התנהגות הנוזל בלי להיכנס לנוסחאות המתמטיות.

מהלך השיעור

1. פתח את היישומון:



2. ודאו כי היישומון נפתח בהתאם להגדרות המופיעות בצילום המסך. חשוב שגובה הצינור והרדיוס ההתחלתי יהיה

אחיד. כמו כן, ודאו כי כתפוז "הראה חשובים" אינו מסומן. וכי בחרתם בהצגה של משוואת הרציפות.

3. לחצו על כפתור "התחל" והתבוננו במתרחש. שימו לב, הנתונים המתייחסים לצד השמאלי מופיעים בצבע אדום.

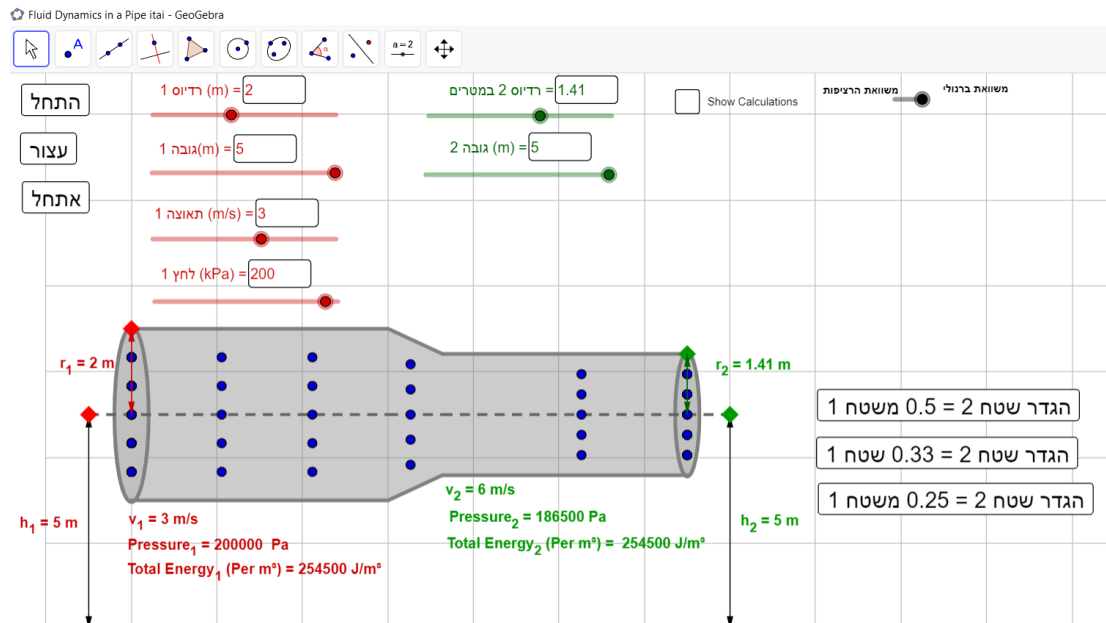
והנתונים עבור הצד השני של הצינור בירוק.

4. לחצו על כפתור וכתבו את נתוני המהירות, הלחץ והאנרגיה עבור שני צידי הצינור.

5. לחצו על כפתור "הגדר שטח". הנמצאים בצד הימני של המסך. כיצד משתנה מהירות הנוזל ככל שטח הצינור

קטן?

6. לחצו על הסליידר השמאלי והעבירו את היישומון להציג את משוואת ברנולי.



7. לחצו על כפתורי "הגדר שטח" ותארו את השינוי שמתחרש במהירות זרימת הנוזל ובלחץ של הצינור בצד 2.

שאלות סיכום

1. הסבירו במילים שלכם את הקשר בין מהירות הזרימה, שטח הצינור, ולחץ הנוזל בשתי נקודות שונות לאורך הצינור.
2. קראו על התקף איסכמי חולף, ונסו להסביר את המנגנון הפיזיולוגיה תוך שימוש בעקרון ברנולי.
3. היכן במערכת ההובלה אנו מוצאים (לכאורה) סתירה בין חוקי ברנולי לבין זרימת הדם בפועל בכלי הדם השונים?
4. מהם הגורמים המשפיעים על לחץ הדם?

שיעור 6 - מהי טרשת עורקים?

אוכלוסיית יעד:

תלמידים בכיתה ט'. למרות שניתן להתאים את רמת השיעור גם לתלמידים בכיתה ז'-ח'.

ידע מוקדם:

- התלמידים חייבים להכיר את מבנה מערכת ההובלה ואת ההבדלים בין עורק לווריד.
- התלמידים צריכים לדעת את הקשר בין היצרות עורקים או איבוד גמישות העורקים לבין עליה בלחץ דם.

מטרות השיעור:

בתום השיעור התלמיד ידע:

- א. להסביר מהי טרשת עורקים
- ב. לתאר את הגורמים להיווצרות טרשת עורקים
- ג. להסביר כיצד טרשת עורקים עלולה להוביל למחלות לב.

מבוא:

טרשת עורקים היא מחלה הפוגעת בכלי הדם. היא נוצרת בהליך ממושך במהלכו שוקעים שומנים על דופנות כלי הדם, דבר שמוביל להיצרות כלי הדם ועלול להביל ליצירת קרישי דם וחסמה מלאה שלהם. כאשר המחלה פוגעת בכלי הדם הכליליים המזינים את הלב, היא עלולה לגרום למחלות לב איסכמיות, כלומר לחוסר אספקת חמצן לשריר הלב. פגיעה מתמשכת בגמישות העורקים וחסמתם עלולה להוביל בהדרגה ולאורך שנים לעליה בלחץ הדם. עליה

זו בלחץ הדם אינה מורגשת בדרך כלל עד שהגיע לממדים מאד גבוהים ומסכני חיים. בשל כך, לחץ דם גבוה נקרא גם בשם "הרוצח השקט".

מבנה השיעור:

- צפיה בסרטון אנימציה המסביר מהי טרשת עורקים
- הסבר בעזרת מצגת מלווה

שאלות סיכום:

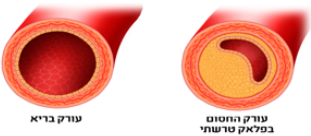
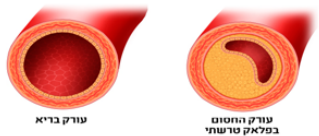
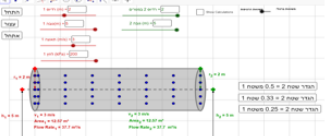
1. מהי טרשת עורקים?
2. הסבירו את השלבים להתפתחות טרשת עורקים?
3. מהם גורמים הסיכון להתפתחות טרשת עורקים?
4. מהם ליפידים וליפופרוטאינים?
5. מה ההבדל בין HDL לבין LDL?
6. אילו מחלות עלולות להיגרם כתוצאה מטרשת עורקים?

לוחות בחירה

תלמידים יקרים,

יוצא לנו לא פעם לשמוע מושגים כמו "לחץ דם - הרוצח השקט", "מגיפת ההשמנה", ועוד מושגים הקשורים לבריאות מערכת ההובלה שלנו. ביחידה זו, נרצה ללמוד מקרוב על מערכת ההובלה וכיצד אנחנו יכולים להתנהג כדי לשמור על בריאותינו לטווח ארוך. לפניכם 6 כרטיסיות. כל כרטיסיה מייצגת אותה נבצע במהלך שיעור או יותר (בהתאם לצורך). עליכם לבחור את המשימות לביצוע באופן הבא:

1. התחילו במשימות 1-2 - משימות חובה.
2. בחרו אחת מהמשימות 3 או 4.
3. בחרו אחת מהמשימות 5-6.

3  סימולציית PHET של מערכת ההובלה	2  מודדים לחץ דם	1  מתכננים מערכת הובלה
6  טרשת עורקים - הרצאה	5  טרשת עורקים - לימוד עצמי	4  עקרון ברנולי - גאוגברה

למורה:

- אולי תרצו להוסיף משימות נוספות, אולי משימת סיכום. את זה נשאיר לשיקולכם.

רקע:

עדויות לדיפוזיה אנו מוצאים בכל תחומי החיים. ריח עוגה הנאפית בתנור, ריח של בושם, פיזור חלקיקי תרכיז במים, מעבר של גזים בנאדיות הריאה, מעבר מומסים בין הדם לנוזל הבין-תאי וכמובן פרומונים המשמשים לאפיק תקשורת חשוב בכל עולם החי. באמת, ריח משחק תפקיד מאד חשוב בעולם החי, ואחת מתופעות הלוואי ארוכות הטווח של נגיף הקורונה היא תתרנות - חוסר היכולת להריח. שוו בנפשכם עולם שבו אתם פתאום לא יכולים להריח! מכאן שאם נתייחס לדיפוזיה בתחומי הלימוד השונים, הרי שלפנינו למידה בין-תחומית.

בדרך כלל, הוראת דיפוזיה מתבצעת בצורה איכותית על ידי הדגמות, למשל פיזור בושם ברחבי הכיתה ובדיקה מי מהתלמידים מריח אותו ראשון, או הדגמת תהליכי פלסמוליזה ודפלוזמוליזה בתאי בצל. הדגמות אלה הן חשובות מאד, אך ביחידה זו, נרצה להציע דרך לעסוק בנושאים אלו בצורה בין-תחומית. באופן ספציפי, נשאף לקשר בין היבטים המתמטיים של תהליך הדיפוזיה לבין היבטים ביולוגיים שונים.

דיפוזיה היא תופעה פיזיקלית המתארת פיזור של מולקולות בכיוון מפל הריכוזים שלהן, מהריכוז הגבוה לריכוז הנמוך. דיפוזיה מתרחשת בצורה ברורה בנוזלים ובגזים, אולם דיפוזיה איטית מתרחשת גם במוצקים. תהליך הדיפוזיה מתבסס על התנועה הבראוונית של החלקיקים. את התנועה הבראוונית גילה הבוטנאי רוברט בראון בשנת 1827. בראון הבין בעת שהתבונן על תנועת אבקנים בנוזל, שהתנועה האקראית שלהם תלויה בתנועה האקראית של מולקולות המים הגדולות מהן בהרבה. מכאן, שחלקיקים בתווך מסוים יטו להתפזר באופן שווה בכלי. אבל אם באזור מסוים בכלי, ריכוז החלקיקים גדול פי 10 מאזור אחר בכלי, הרי שההסתברות שחלקיק יעבור מהאזור הצפוף ביותר לאזור הפחות צפוף גדולה גם כן פי 10.

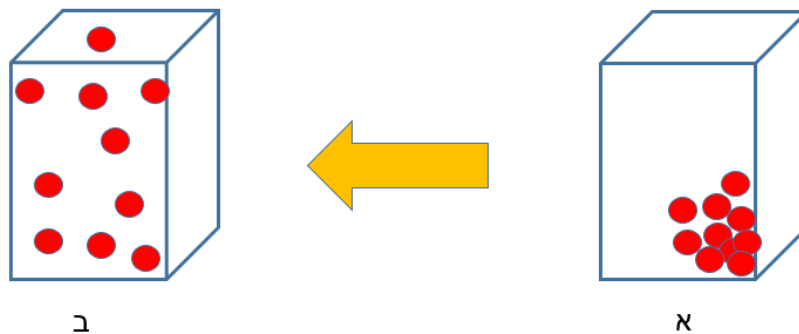
חוק הדיפוזיה על שם פיק

חוקי הדיפוזיה הידועים כ-Fick's laws, הם משוואת מתמטיות המתארות כיצד חלקיקים הנמצאים בתנועה אקראית נוטים להתפזר בכיוון מפל הריכוזים, מהמקום בו הריכוז שלהם גבוה למקום בו הריכוז שלהם נמוך יותר. החוקים מתארים גם את הקשר בין קצב הדיפוזיה לשלושת הגורמים המשפיעים עליה. לחוק שימושים רבים בתעשייה, ברפואה, ביולוגיה, והנדסה.

$$J = -D \frac{\Delta C}{\Delta x}$$

משוואה 10: חוק פיק הראשון. J הוא מדד השטף של החלקיקים. D מקדם דיפוזיה, ΔC הפרש הריכוזים, Δx = מרחק הדיפוזיה. הסימן השלילי מבטא את זה שהדיפוזיה נוטה להקטין את הריכוז הגבוה ולהגדיל את הריכוז הנמוך.

חשוב לזכור שתהליך הדיפוזיה הוא תהליך אקראי, המולקולות אינן "שואפות" לנוע ממקום אחד למקום אחר, אלא הן נמצאות בתנועה מתמדת ואקראית. מכאן ניתן להבין מדוע למפל הריכוזים יש השפעה על קצב הדיפוזיה (תרשים 3). נתבונן בכלי המתואר תרשים 3. בתחילת הניסוי מרוכזות כל המולקולות בצד אחד של הכלי. מכיוון שהתנועה של המולקולות היא אקראית וספונטית, ההסתברות של המולקולות להישאר באותה הנקודה היא אפסית. כמו כן, בגלל שבצד הנגדי של הקופסה אין חלקיקים כלל, הרי שקיימת הסתברות גדולה יותר של תנועה לכיוון החלל הריק, מאשר אל האזור המלא בחלקיקים.



איור 17: דיפוזיה של חומר X. א) המצב ההתחלתי - כל המולקולות של חומר X נמצאות בפינה אחת של הכלי. ב) המצב הסופי - המולקולות מפוזרות בחלל בצורה שווה.

למה תאים קטנים?

חוקי הדיפוזיה שזה עתה הזכרנו עוזרים לנו להבין את מגבלת גודל התא של יצורים חיים, ואפילו את מגבלת גודלם הסופי של יצורים שונים.

תאים הם היחידה התפקודית הבסיסית המקיימת את מאפייני החיים. כדי שיוכלו להתקיים חיים, חשוב לשמור על סביבה מבוקרת בה מתקיימים התהליכים הביולוגיים. דבר זה מושג בכל עולם החי בעזרת תאים המוקפים בממברנה (קרום תא) שמפרידה בין תוך התא לבין התנאים השוררים מחוץ לתא. ממברנת התא מאפשרת רק לחומרים מסוימים לעבור אל תוך התא או מחוצה לו. חומרים אלה נכנסים ויוצאים מהתא בתהליך הדיפוזיה. ניתן היה להניח אם כך, שככל שנגדיל את התא, כך יגדל שטח הפנים ואתו קצב הדיפוזיה. אבל חשוב לבחון מה קורה לנפח של תא כאשר שטח הפנים שלו גדל. נתייחס אל תאים כאל מבנים כדוריים, ונבחן כיצד הגדלת קוטר התא משפיעה על היחס בין שטח הפנים לנפחו (טבלה 4).

ניתן לראות בטבלה 4, שככל שהרדיוס גדל היחס בין שטח הפנים לבין הנפח של היצור הולך וקטן. לכן יצורים מיקרוסקופיים כמו חד תאיים להם יחס שטח פנים לנפח גדול יכולים להסתפק בדיפוזיה לסיפוק הדרישות המטבוליות שלהם. לשם המחשה הזמן שהיה צפוי למולקולת חמצן לעבור מרחק של $1\mu\text{m}$, שהוא האורך של חיידק ממוצע, הוא בערך 238 מיקרו שניה. לעומת זאת מרחק של 1 ס"מ הייתה עוברת המולקולה במעל 6 שעות!

טבלה 4: השפעת רדיוס הכדור על היחס בין שטח הפנים לבין נפחו.

R=3	R=2	R=1	נוסחה	
36π	16π	4π	$4\pi R^2$	שטח פנים של כדור
$\frac{36\pi}{3}$	$\frac{32\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{4\pi R^3}{3}$	נפח של כדור
1	1.5	3	$\frac{3}{R}$	יחס בין שטח הפנים לבין הנפח

עם התפתחותם של יצורים רב תאיים, היחס בין שטח הפנים לנפח קטן ומרחק הדיפוזיה גדל מכאן שהיה על בעלי החיים הגדולים והפעילים, לפתח פתרונות נשימתיים מורכבים יותר. אלה כללו התפתחותן של מערכות הובלה ואברי נשימה כמו ריאות (איור 18).



איור 18: התפתחות מערכות נשימה בחולייתנים. בעוד שדיפוזיה הספיקה לחסרי חוליות קטנים. חיים ביבשה חייבו התפתחות מגנוני נשימה מורכבים יותר בדרך כלל בצורה כלשהי של ריאות.

פרק ראשון - שיעורים בנושא הדיפוזיה

שיעור 1 - חוקרים דיפוזיה

בתום השיעור התלמיד:

- ידע לקשר בין תופעות יום-יומיות לבין תופעת הדיפוזיה
- ידע להסביר את הקשר בין מפל הריכוזים להשפעתו על קצב הדיפוזיה.

חלק ראשון - פתיחה בהדגמות

- פזר בושם בכיתה ובקש מהתלמידים להרים יד בהתאם לסדר שבו הם מריחים את הבושם. הוסף מים חמים וקרים לכוס עם תיון תה ובקש מהתלמידים לתאר את המתרחש.
- הצג לתלמידים דוגמאות כמו: נמלים נעות בשביל, ריח עוגה הנאפית בתנור, ועוד, ושאל אותם מה לדעתם משותף לתהליכים.
- פזר חלקיקי אבקה, בכוס מים, בקש מהתלמידים לתאר את המתרחש. שאל אותם מה לדעתם מזיז את החלקיקים? מדוע הם זזים באופן שבו הם זזים.

חלק שני - מדגימים תנועה בראונית

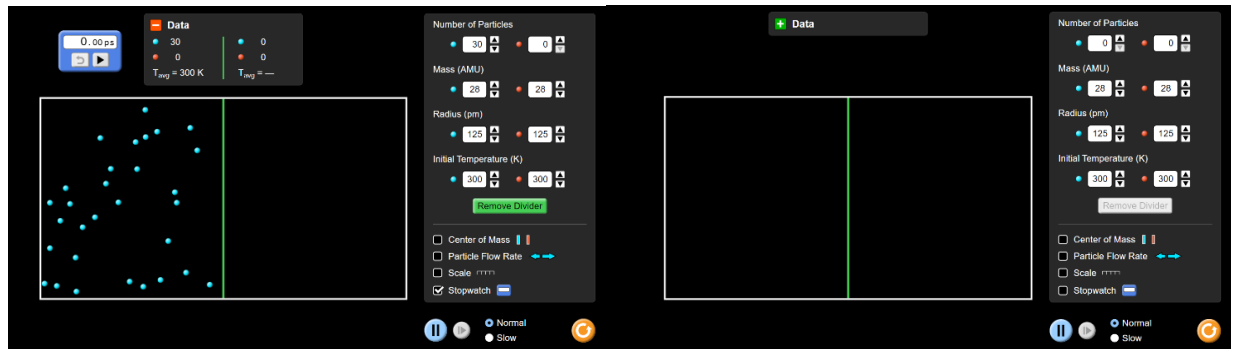
- הנח על ראשי התלמידים בלון אחד מנופח מהסוג הגדול ביותר שתמצא. בקש מקבוצה של תלמידים לצלם ולתעד את המתרחש.
- חזור על התהליך עם כמה בלונים גדולים.

סיכום והסבר לתלמידים

תנועה בראונית מתארת תנועה של חלקיקים קטנים הצפים על פני נוזל או שוקעים בתוכו. לצורך העניין גם גזים וגם נוזלים (liquids) מוגדרים כנוזלים (fluids). תנועתם וכיוון תנועתם של החלקיקים הקטנים תלוי בהתנגשויות שהם חווים מהחלקיקים הגדולים בתווך בו הם נמצאים. אנחנו יכולים להגיד שתנועה בראונית מתארת בצורה מיקרוסקופית את מה שקורה בצורה מקרוסקופית בתהליך הדיפוזיה, למשל דיפוזיה של מזהמים באטמוספירה. בהדגמה שלנו, ראשי התלמידים היוו את "הנוזל" והבלונים דימו את החלקיקים. על ידי תנועת ראשי התלמידים ניתן היה להבחין בתנועה האקראית של הבלונים.

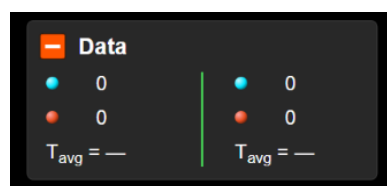
חלק שלישי - חוקרים דיפוזיה בעזרת סימולציה

1. הפעילות את הסימולציה הבאה מאתר PHET.



א. שנו את מספר החלקיקים הכחולים על ידי לחיצה על החץ הכחול ליד החלקיק המתאים. לחצו על לשונית

Data כך שיפתח המסך הבא



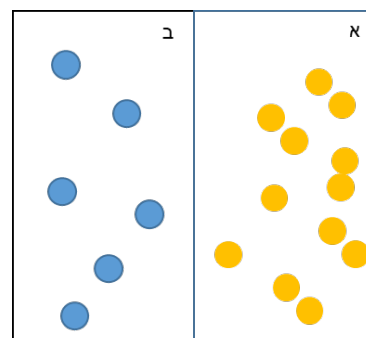
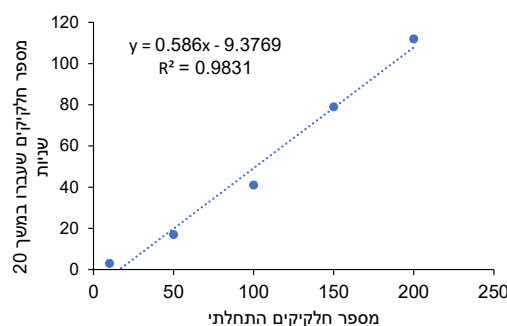
ב. הפעילו את הסימולציה, ואת שעון העצר, הסירו את המחסום המחלק את שני התאים.

ג. בכל הפעלה שנו את מספר החלקיקים ההתחלתי וספרו את מספר החלקיקים הכחולים שהגיעו לתא השני לאחר זמן קבוע של 20 שניות.

ד. אספו את נתוני כל הקבוצות והציגו את הקשר בין הכמות ההתחלתית של החלקיקים לבין מספר החלקיקים שהגיעו לתא השני לאחר 20 שניות.

שיעור 1 - תוצאות למורה

במשימה זו רצינו לבדוק למה הכוונה במושג "מפל ריכוזים". ראינו שככל שההפרש בין כמות החלקיקים הכחולים שנמצאה בכל תא היה גדול יותר, מספר החלקיקים שעבר בפרק זמן נתון היה גבוה יותר (איור 19 א'). הסיבה לכך היא הסתברותית. כלל שיש יותר חלקיקים בצד אחד, הסיכוי שמי מהם יעבור לצד אחר הוא גדול יותר. נתבונן באיור 19 ב'. מספר החלקיקים בתא א' גדול פי-2 מזה שבצד ב'. מכאן שלחלקיקים הכתומים יש סיכוי כפול פי שניים לעבור לתא ב' בו נמצאים החלקיקים הכחולים.



איור 19 א', ב' (א) השפעת מספר החלקיקים ההתחלתי על קצב הדיפוזיה. (ב') ההסתברות שחלקיקים יעברו מתא א' לתא ב' כפולה מאחר ויש כמות כפולה שלהם.

שיעור 2 - למה תאים קטנים?

העקרונות שלמדנו על חוקי הדיפוזיה רלוונטיים מאד לשאלה מדוע התאים קטנים. היצורים החד-תאים הראשונים שהתפתחו בסביבה המימית היו תלוי לגמרי בתהליכים דיפוזיים כדי לספק את צרכיהם האנרגטיים.

בתום השיעור התלמיד:

- ידע לחשב את שטח הפנים והנפח של כדור.
 - ידע לחשב את היחס בין שטח הפנים לבין הנפח של כדור.
 - יסביר את הקשר בין קצב דיפוזיה לבין הגדלת היחס בין שטח הפנים לבין הנפח.
- ידע קודם נדרש: אין.

חלק ראשון

1. פתחו את [היישומון](#):

2. שנו את ערכי הרדיוס של הכדור וארגנו בטבלה את הנתונים המתקבלים עבור כל אחד מהרדיוסים שבחרתם.

א. הגדירו את עמודות הטבלה

ב. תנו כותרת לטבלה.

חלק שני

3. צרו תרשים המתאר את הקשר בין רדיוס הכדור לבין היחס בין שטח הפנים לבין הנפח שלו.

4. תארו את התרשים והסבירו תוך שימוש בתרשים, מדוע גודלם של התאים הוא מאד קטן.

חלק שלישי

עקרון הגדלת היחס בין שטח הפנים לבין הנפח בא לידי ביטוי במערכות ביולוגיות רבות: במערכת העיכול, מערכת הנשימה, מבנה העלים של צמחים שונים ועוד. בחרו בדוגמה אחת מתוך רשימה זו או הציעו דוגמה משלכם והסבירו כיצד בא לידי ביטוי העקרון של הגדלת היחס בין שטח הפנים לבין הנפח ומה היתרון התפקודי בכך. אם ניתן, הציגו נתונים מספריים.

שיעור 3 - מעשה בתולעת

בתום השיעור תדע:

1. לבטא את הקשר בין שטח פנים של התולעת לקצב הדיפוזיה של החמצן דרכה בצורה מתמטית.

2. לבטא את הקשר בין נפח התולעת לבין קצב צריכת החמצן של התולעת בצורה מתמטית.

3. לנסח כלל מתמטי המגדיר באילו תנאים תוכל התולעת לשרוד.

חלק ראשון

תולעים (earthworms), הן חסרי חוליות השייכות למחלקת הרכיכות. תולעים נמצאות ביבשה, במים מתוקים ואף באוקיינוסים. חלק מהמינים טפילים ומזיקים לאדם או לבעלי חיים ואחרים חשובים לאזורור הקרקע ומהווים מרכיב חשוב בשרשרת המזון. צריכת החמצן של תולעת היבשה (*Lumbricus terrestris*) נעשית דרך העור. מערכת הובלה פנימית הכוללת מספר לבבות מובילה את החמצן לתאים. יחד עם זאת, התאים שקולטים את החמצן נמצאים קרוב לעור, בעוד ששאר התאים ממלאים את גוף התולעת. מכאן, שעל מולקולות החמצן לעבור מרחק דיפוזיה גדול כדי

להגיע לכל אחד מתאי הגוף. אחד הגורמים שישפיע על קצב קליטת החמצן על ידי התולעת הוא היחס בין שטח הפנים של התולעת לבין הנפח שלה. לתולעת יבשה ממוצעת יש את הממדים הבאים:

מסה	אורך	רוחב	שטף כניסת חלקיקים דרך עור התולעת	קצב צריכת חמצן לגרם תולעת לשעה
3.7 גרם	12 ס"מ	0.64 ס"מ	$A= 2.4 \text{ nmole O}_2/\text{mm}^2$	$B= 0.98 \text{ }\mu\text{mole O}_2/\text{g}$

1. פתחו את היישומן:
2. שנו את ערכי הרדיוס בהתאם לטבלה והשלימו את התוצאות המתקבלות.
3. הציגו בעזרת תרשים את כמות החמצן הנקלטת דרך עור התולעת, ואת סך החמצן שצורכת התולעת כתלות ברדיוס שלה.
4. האם שני הגרפים מצטלבים?
5. הסבירו מה משמעות ההצטלבות ומה ההשלכות שלה.

טבלה 1:

אורך (H)	רדיוס (r)	יחס בין שטח הפנים לבין הנפח	צריכת חמצן לתולעת	כניסת חמצן לתולעת
12	0.1	20	0.35	18.10
12	0.5			
12	1			
12	1.5			
12	2			
12	2.5			
12	3			
12	3.5			
12	4			
12	4.5			
12	5.5			
12	6.5			

חלק שני

חישובו על דרך מתמטית באמצעותה תוכלו להגדיר מהו התנאי שעבורו התולעת תוכל לשרוד. לשם כך העזרו בנתונים הבאים:

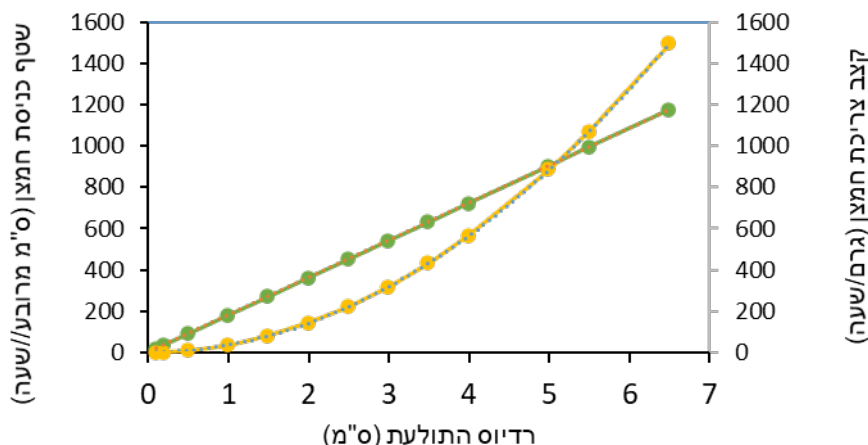
1. שטח הפנים של יצור גלילי בעל רדיוס R ואורך h הוא $2\pi Rh=S$
2. הנפח של יצור כזה יהיה $\pi R^2h=v$
3. המסה של יצור כזה תהיה: $m=\pi R^2hd$, כאשר d היא הצפיפות שלו.
4. שטף הכניסה של החמצן דרך העור מחושב על ידי הכפלת שטף הכניסה (A) בשטח הפנים של התולעת.
5. קצב צריכת החמצן של התולעת מחושב על ידי הכפלת קצב הצריכה (B), במסה של התולעת.

טבלה זו מפרטת את הנתונים בעזרתם פתחנו את האפליקציה. ניתן כמובן לבצע את המשימה בעזרת גליון אקסל. כמו כן, ניתן לחשוב מה תהיה ההשפעה של שינוי בשטף כניסת החמצן או קצב כניסתו על התולעת.

טבלה 1: השפעת רדיוס התולעת על קצב כניסת חמצן בתולעת יבשה.

אורך H	רדיוס r	צפיפות d	π 3.14	שטח פנים $2\pi rh$	נפח $\pi r^2 h$	מסה $\pi r^2 h d$	יחס שטח / פנים נפח	צריכת חמצן לתולעת קצב צריכה * מסה	שטף לתולעת שטף כניסה * שטח פנים	$2A/Bd$
12	0.1	0.96	3.14	7.54	0.38	0.36	20.00	0.35	1.81	44.29
12	0.5	0.96	3.14	37.70	9.42	9.05	4.00	8.87	9.05	8.86
12	1	0.96	3.14	75.40	37.70	36.19	2.00	35.47	18.10	4.43
12	1.5	0.96	3.14	113.10	84.82	81.43	1.33	79.80	27.14	2.95
12	2	0.96	3.14	150.80	150.80	144.76	1.00	141.87	36.19	2.21
12	2.5	0.96	3.14	188.50	235.62	226.19	0.80	221.67	45.24	1.77
12	3	0.96	3.14	226.19	339.29	325.72	0.67	319.21	54.29	1.48
12	3.5	0.96	3.14	263.89	461.81	443.34	0.57	434.47	63.33	1.27
12	4	0.96	3.14	301.59	603.19	579.06	0.50	567.48	72.38	1.11
12	4.5	0.96	3.14	339.29	763.41	732.87	0.44	718.21	81.43	0.98
12	5.5	0.96	3.14	414.69	1140.40	1094.78	0.36	1072.89	99.53	0.81
12	6.5	0.96	3.14	490.09	1592.79	1529.08	0.31	1498.49	117.62	0.68

- מהתוצאות עולה כי העלייה ברדיוס התולעת מתבטאת בעלייה לינארית בשטף כניסת החמצן. לעומת זאת, קצב צריכת החמצן עולה בצורה מעריכית ככל שגדל רדיוס התולעת. בנוסף, ניתן לראות כי כל עוד רדיוס התולעת קטן מ 5.5 ס"מ שטף כניסת החמצן גדול מקצב צריכתו. מעבר נקודה זו המגמה מתהפכת (איור 20).



איור 20: השפעת רדיוס התולעת על קצב צריכת החמצן (כתום) ושטף כניסת החמצן (ירוק).

- כדי שהתולעת תשרוד על שטף כניסת החמצן A להיות גדול מקצב צריכת החמצן B. שטף החמצן תלוי בשטח הפנים וקצב הצריכה של החמצן תלוי במסה של התולעת.
 - מכאן שצריך להתקיים: $A(2\pi rh) > B(\pi r^2 hd)$
 - נצמצם את $R \geq \pi h$ ונקבל: $2A > B(Rd)$
 - כלומר כל עוד רדיוס התולעת יהיה קטן מ: $R < 2A/Bd$ התולעת תוכל לשרוד.

1. Allen, D. and Tanner, K. (2005) 'Infusing active learning into the large-enrollment biology class: seven strategies, from the simple to complex', *Cell biology education. American Society for Cell Biology*, 4(4), pp. 262–268. doi: 10.1187/cbe.05-08-0113.
2. Assaraf, O.BZ., Dodick, J. & Tripto, J. High School Students' Understanding of the Human Body System. *Research in Science Education* 43, 33–56 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11165-011-9245-2>
3. Bybee, R. W. (2013) *The case for STEM education: Challenges and opportunities*. NSTA press.
4. Group, W. study (no date) *What is STEM literacy?, What is STEM literacy*.
5. Guyton Arthur, C. J. E. H., & Hall Jhon, E. (1996). *Textbook of medical physiology*.
6. Hall, K. L. et al' (2011) .Examining the Impact of Student Expectations on Undergraduate Biology Education Reform .Available at :<http://arxiv.org/abs.1105.6349/>
7. Hammer, D' (1994) .Epistemological Beliefs in Introductory Physics , 'Cognition and Instruction. Routledge, 12(2), pp. 151–183. doi: 10.1207/s1532690xci1202_4.
8. Handelsman, J. et al. (2004) 'Scientific Teaching', *Science*, 304(5670), pp. 521–522. doi: 10.1126/science.1096022.
9. Martín-Páez, T. et al. (2019) 'What are we talking about when we talk about STEM education? A review of literature', *Science Education*, 103(4), pp. 799–822. doi: 10.1002/sce.21522.
10. May, D. B. et al. (2005) 'College physics students ' epistemological self-reflection and its relationship to conceptual learning College physics students ' epistemological self-reflection and its relationship to conceptual learning', 1249(2002). doi: 10.1119/1.1503377.
11. Redish, E. F. and Cooke, T. J. (2013) 'Learning each other's ropes: Negotiating interdisciplinary authenticity', *CBE Life Sciences Education*, 12(2), pp. 175–186. doi: 10.1187/cbe.12-09-0147.
12. Redish, E. F. and Hammer, D. (2009) 'Reinventing college physics for biologists: Explicating an epistemological curriculum', *American Journal of Physics*, 77(7), pp. 629–642. doi: 10.1119/1.3119150.
13. Redish, E. F., Saul, J. M. and Steinberg, R. N. (1998) 'Student expectations in introductory physics', *American Journal of Physics*, 66(3), pp. 212–224. doi: 10.1119/1.18847.
14. Sanders, M. (2009) 'STEM, STEM education, STEMmania', *The Technology Teacher*, December/January.
15. Schommer, M., Crouse, A. and Rhodes, N. (1992) 'Epistemological beliefs and mathematical text comprehension: Believing it is simple does not make it so.', *Journal of Educational Psychology. US: American Psychological Association*, 84(4), pp. 435–443. doi: 10.1037/0022-0663.84.4.435.
16. Shaughnessy, J. M. (2013) 'Mathematics in a STEM Context', *Mathematics Teaching in the Middle School. National Council of Teachers of Mathematics*, 18(6), p. 324. doi: 10.5951/mathteachmidscho.18.6.0324.
17. Songer, N. B. and Linn, M. C. (1991) 'How do students' views of science influence knowledge integration?', *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), pp. 761–784. doi: 10.1002/tea.3660280905.
18. Walker, J. D. et al. (2008) 'A delicate balance: integrating active learning into a large lecture course', *CBE life sciences education. American Society for Cell Biology*, 7(4), pp. 361–367. doi: 10.1187/cbe.08-02-0004.
19. Watkins, J. and Elby, A. (2013) 'Context dependence of students' views about the role of equations in understanding biology', *CBE Life Sciences Education*, 12(2), pp. 274–286. doi: 10.1187/cbe.12-11-0185.
20. Zollman, A. (2012) 'Learning for STEM Literacy: STEM Literacy for Learning', *School Science and Mathematics. John Wiley & Sons, Ltd*, 112(1), pp. 12–19. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.2012.00101.x>.

