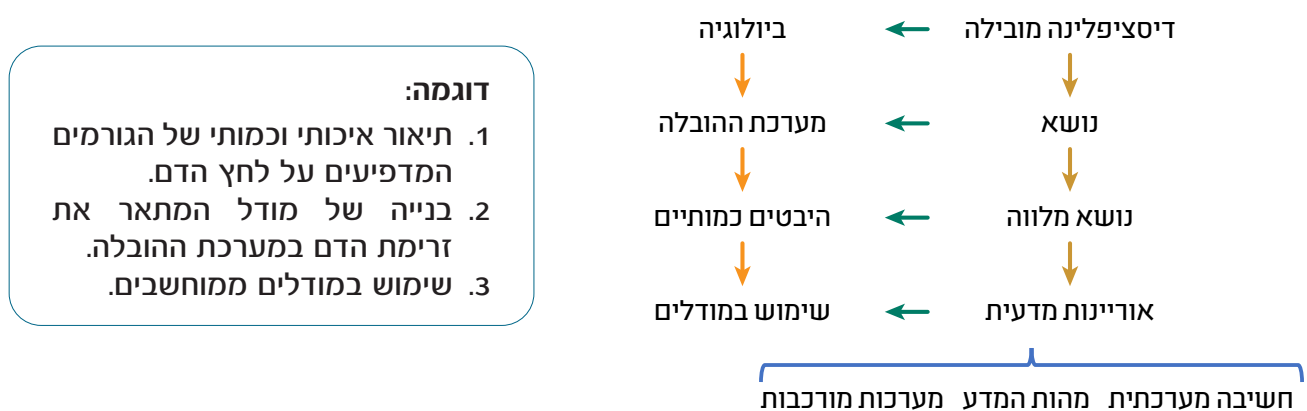


העוגן הלימודי סביבו נפתח את הלמידה יהיה מתחום המדעים (כימיה, ביולוגיה, פיזיקה) ואפילו נרצה להדגיש את הביולוגיה האורגניזמית (לימוד מבנה, תפקוד ועוד ברמת האורגניזם השלם). נרצה להדגיש מושגים כמו מגוון מינים, שירותי מערכת אקולוגית, שינויי אקלים ועוד, כחלק אינטרגלי ממערכת השיקולים של התלמידים לסוגיות משמעותיות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

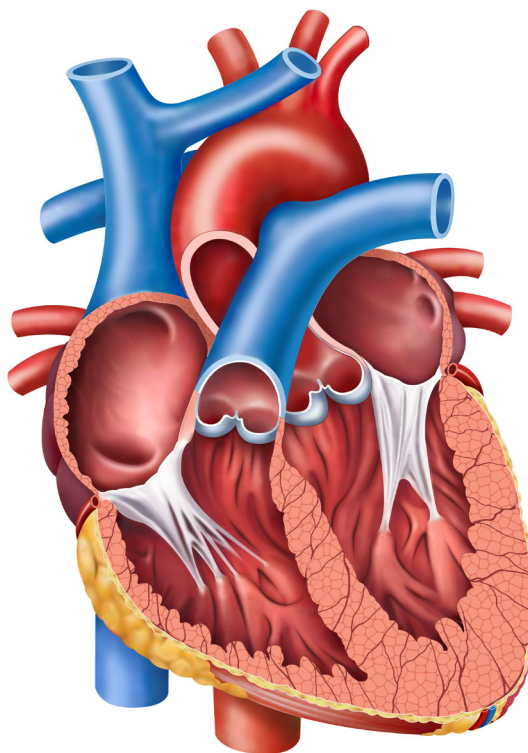
הביניים אם הם לא יבחרו ללמוד מקצועות ביולוגיים בחטיבה העליונה או בחייהם הבוגרים. בעידן בו משתוללת מגפה עולמית מזה כשנתיים, יש חשיבות גדולה בהוראת נושאים אלה. יתרה מכך, אנחנו חושבים, שהוראה של מערכות גוף האדם, מזמנת קרקע פורייה לשילוב של מושגים חוצי דיסציפלינות עם הוראה בינתחומית בהתאם לצורך.

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

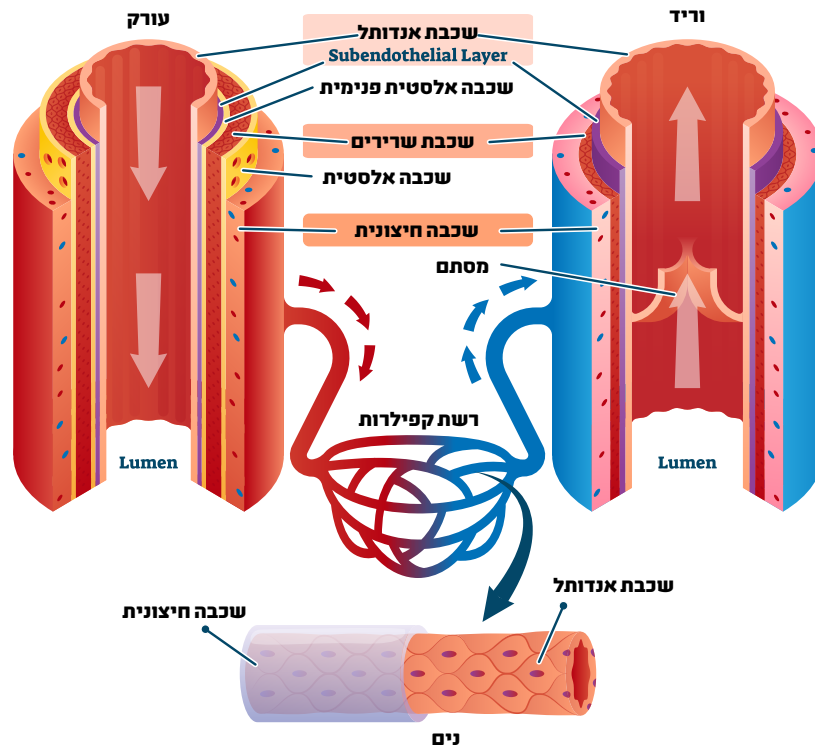
העורקים הם החלק האחרון והמסועף ביותר של המערכת העורקית. מדובר על עורקים קטנים שמתווכים את מעבר הדם לנימים. בערך 400 מיליון עורקים נמצאים בגוף והקוטר שלהם נע בין 15-300 מיקרומטר (μm). לעורקים שכבה שרירית חזקה המאפשרת להם להתכווץ עד כדי חסימה מוחלטת או להתרחב עד פי ארבעה מקוטרם המקורי (Guyton, A and Hall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

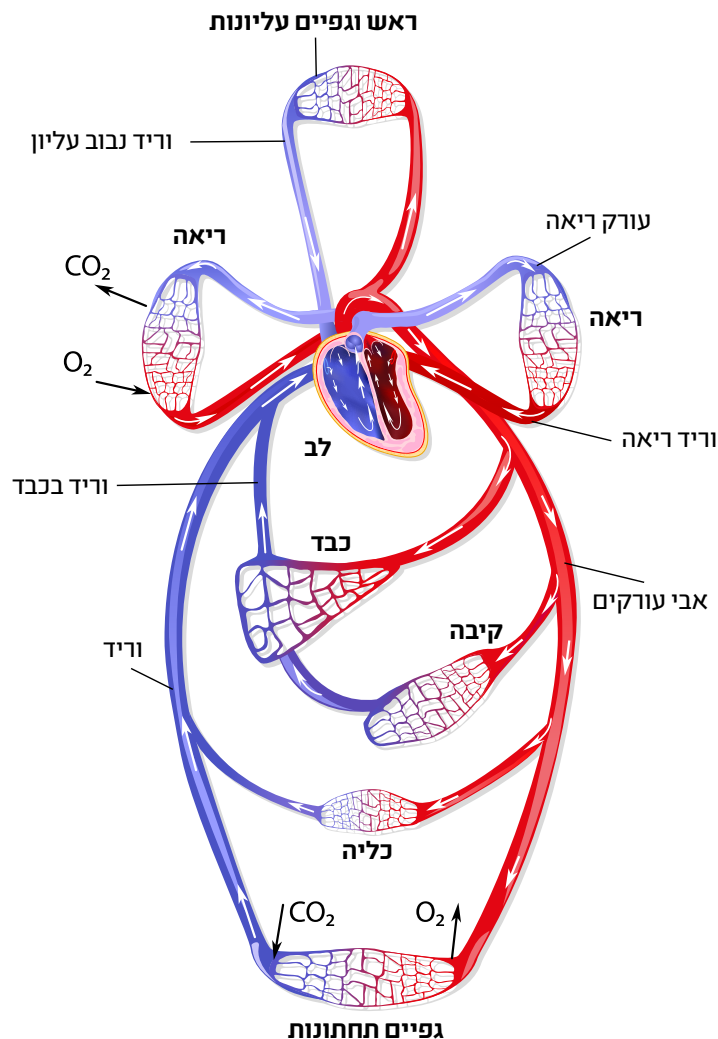
ב. מסלול זרימת הדם

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 הדרך הנימים, ורידונים, ורידים ונאסף אל הוריד הנבוב התחתון והעליון.

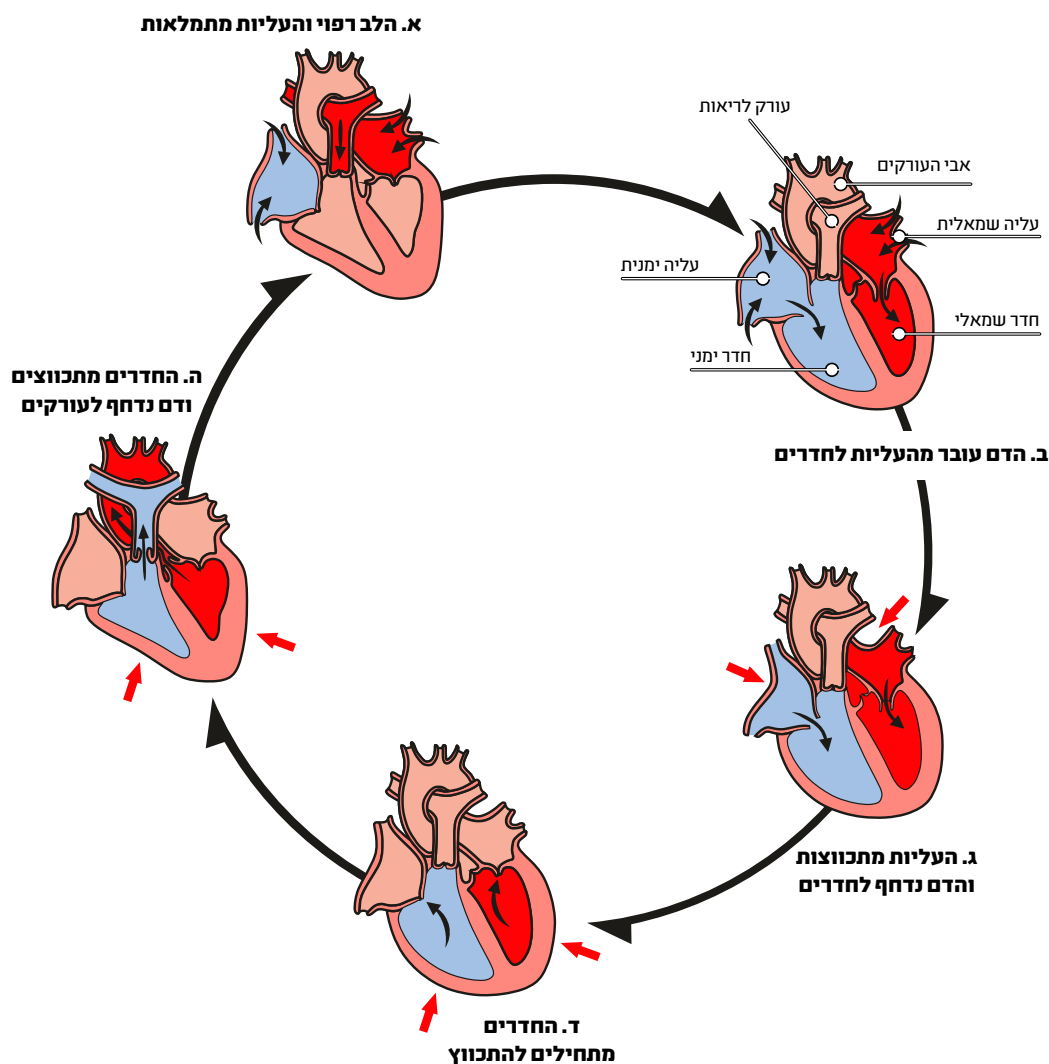
ג. מחזור פעימת לב ותפוקת הלב

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](#)

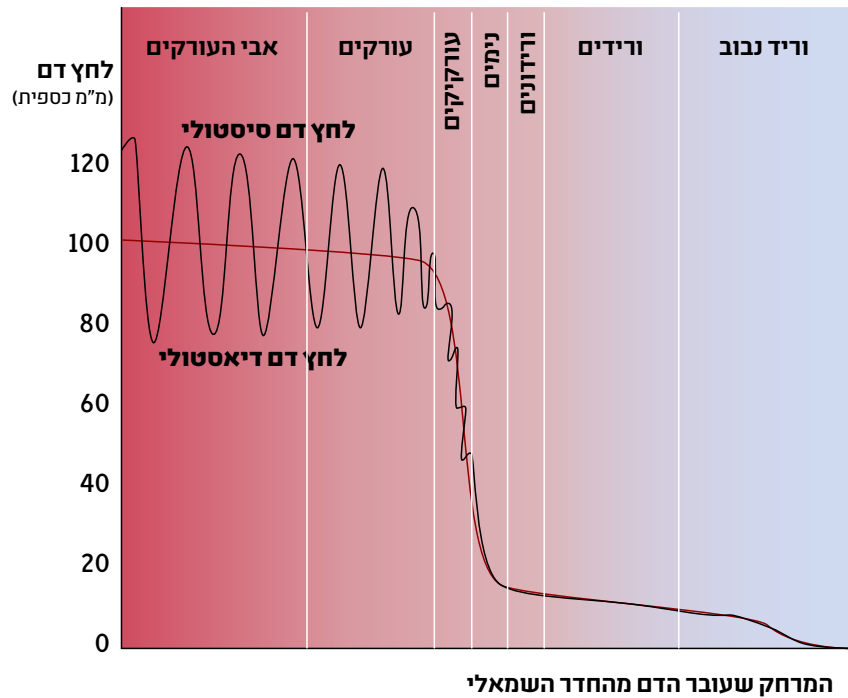
טבלה 1: מדדי לחץ הדם באדם בוגר במנוחה.

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

$$Q = \frac{(p_1 - p_2)}{R} \longrightarrow \text{התנגדות לזרימת הדם}$$

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.

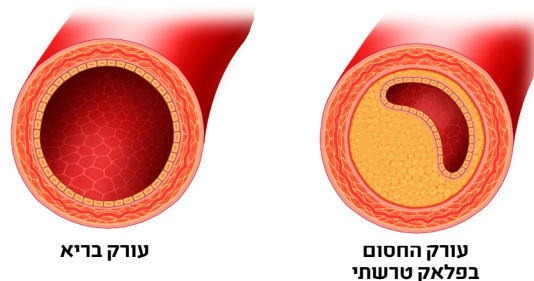
הגורם השלישי הוא האורך הכולל של כלי הדם. ככל שאורך כלי הדם גדול יותר ההתנגדות לזרימה גם כן גדולה יותר. אנשים שמנים מאד, סובלים פעמים רבות מלחץ דם גבוה בגלל כמות גדולה של כלי דם ברקמת השומן. מעריכים שתוספת של ק"ג אחד במשקל מובילה לעליה של כ-800 ק"מ נוספים באורכם של כלי דם (JG, Betts et al. 2013)

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
↑	↑	↑

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

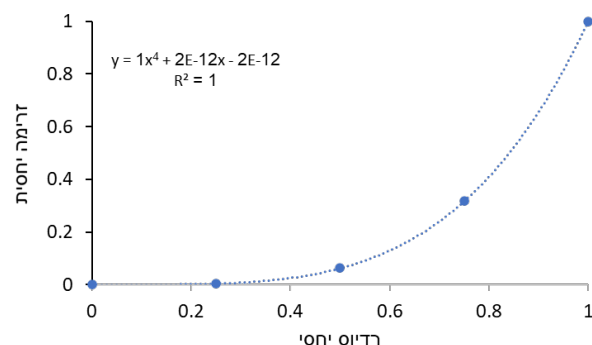
↓

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.

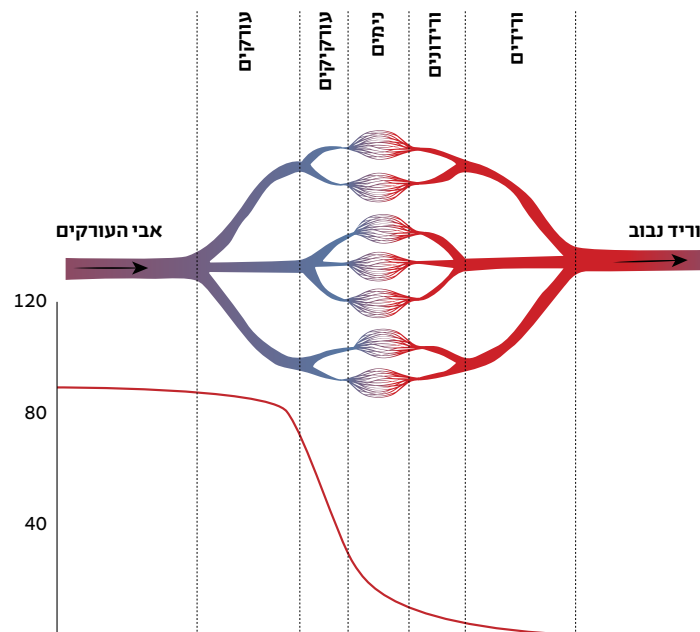
חשוב לציין שכאשר השריר עובד קשה וזקוק לחמצן, אז הפתרון של להעלות לכל הגוף את לחץ הדם לא סביר ולא רצוי, ולכן דרוש פתרון מקומי, כמו התרחבות העורקיים.

דוגמה נוספת:

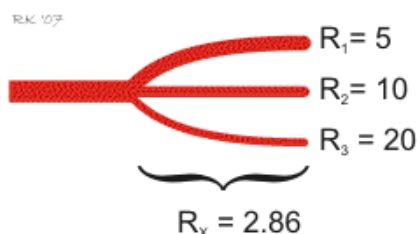
חשבו מה תהיה ההשפעה של הקטנת הרדיוס של כלי הדם פי שניים על נפח הזרימה Q?
פתרון: נעזר שוב בנוסחה הפשוטה שלנו. אם הרדיוס קטן פי 2 הרי שנפח זרימת הדם יקטן פי 16. מכאן שכדי לשמור על אותו קצב זרימה של דם במצב זה נצטרך להעלות את לחץ הדם באותו היחס אך מאחר ולא נוכל להעלותו פי 16 ניתן להניח שקצב הזרימה הכולל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

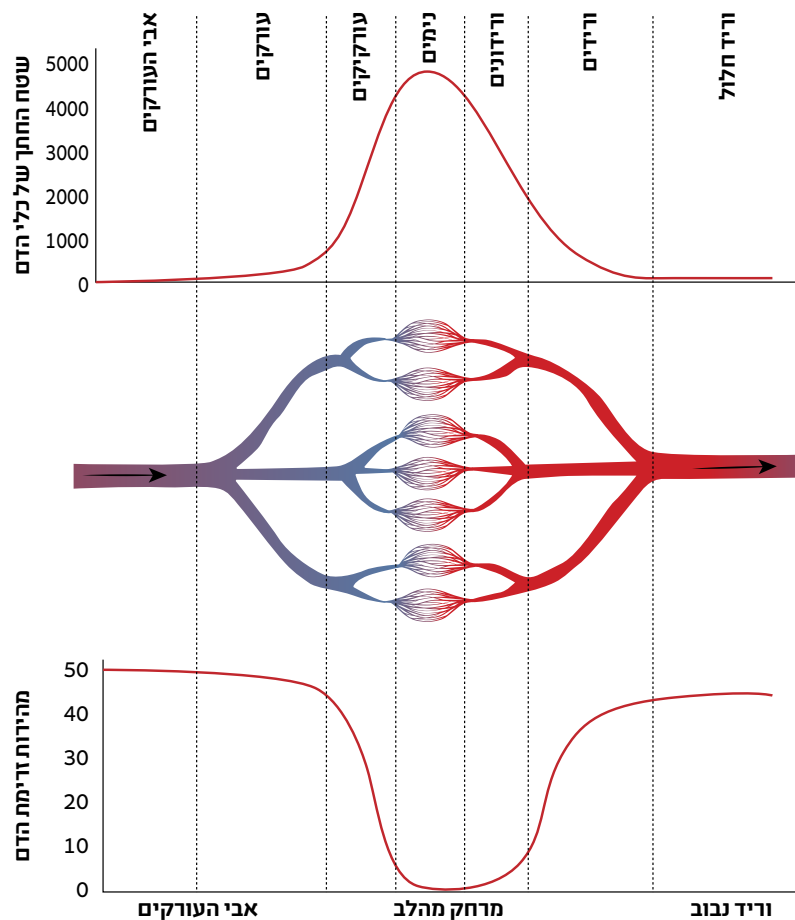
- התלמיד יתאר את הקשר בין נפח זרימת הדם לבין ההתנגדות לזרימת הדם.
- התלמיד יסביר מדוע ההתנגדות הכוללת בעורקים או בנימים קטנה ממה מהמצופה מכלי דם בעל קוטר קטן.

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

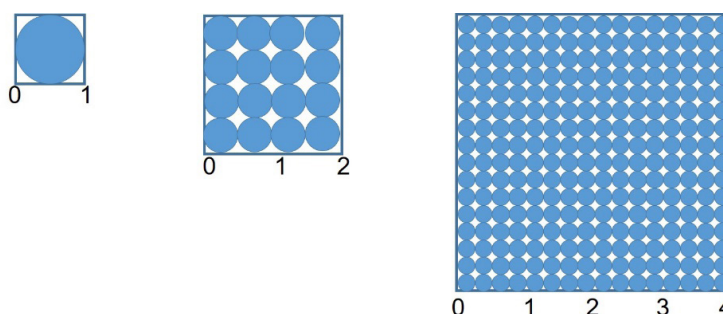
מהירות זרימת הדם נמדדת בס"מ לשנייה, והיא נמצאת ביחס הפוך לסכום שטחי החתך הכולל של כל כלי הדם מאותו הסוג (משוואה 6). (שטח החתך של צינור מוגדר כשטח העיגול המתקבל כאשר חותכים את הצינור לרוחבו). (טבלה 2).

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

מהירות זרימה ממוצעת.
נפח הזרימה

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.

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

↓

מהירות
ממוצעת

↑

רדיוס הפרש
הצינור לחצים

↑

רדיוס הפרש
הצינור לחצים

↑

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

צמיגות
הנוזל

↑

אורך הצינור

↓

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



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

ב

לחץ
בנקודה 1



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

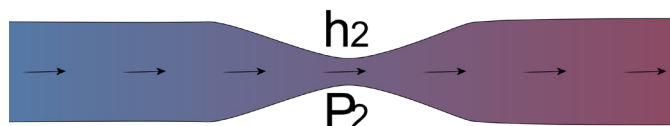
mg

1/2mv²

א

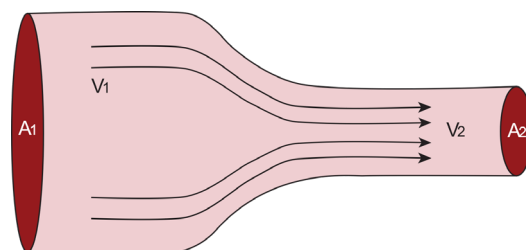


משוואה 8. (א) משוואת ברנולי. P - לחץ הנוזל; ρ - צמיגות הנוזל; g - כח המשיכה; y - גובה; V - מהירות. (ב) בהנחה וגובה הצינור וצמיגות הנוזל אחידים ניתן להגיע למשוואה פשוטה יותר בה הלחץ והמהירות בצד אחד של הצינור שווים ללחץ ולמהירות בצידו השני.



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

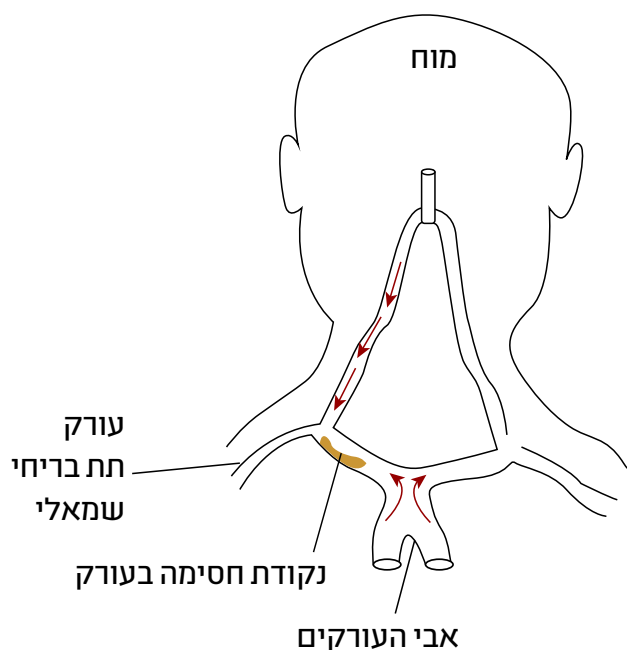
כלל נוסף החל על תנועה של נוזל בצינור בא לידי ביטוי במשוואת הרציפות. לפי כלל זה, מכפלת שטח הפנים במהירות הזרימה צריכה להיות שווה בין שני חלקיו של הצינור כך שמתקבלת הנוסחה: $A_1 V_1 = A_2 V_2$.



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.