



הרשת הטכנולוגית-מדעית המובילה בישראל
מכללות ובתי ספר לטכנולוגיה מתקדמת ולמדעים
המנהל למחקר ופיתוח ולהכשרה



מדעי
המוח

לבתי ספר על יסודיים

המדריך למורה

<http://brain.ort.org.il>



הרשות הטכנולוגית-מדעית המובילה בישראל
מכללות ובתי ספר לטכנולוגיה מתקדמת ולמדעים
המנהל למחקר ופיתוח ולהכשרה

מדעי המוח לבתי ספר על יסודיים המדריך למורה | ספטמבר 2016

© כל הזכויות שמורות לאורט ישראל

ספר זה פותח כחלק מפרויקט



יעוץ מדעי: פרופ' אורי אשרי

עורך אחראי: יאיר בן-חורין

כתיבה ופיתוח: ד"ר נירה שמעוני-אייל, יאיר לקרץ, שירי מקוב, ד"ר אבישג טופורוביץ', ד"ר צפריר שלמה,

אלדד סרגוסטי, אורי אוסמי, יאיר בן-חורין

עיצוב: קרן אייז

איורים: עמית גל, חגית מתוק

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או בכל אמצעי – דיגיטלי, אלקטרוני, אופטי, מכני או אחר (לרבות צילום, הקלטה, שידור), בין אם קיים היום ובין אם יהיה קיים בעתיד. שימוש מסחרי, או אחר, מכל סוג שהוא בחומר הכלול בספר זה ללא אישור מפורש, מראש ובכתב מן המוציאים לאור, אסור בהחלט. המפר אזהרה זו, בכל דרך שהיא, יהיה צפוי לעונשים הקבועים בחוק להגנת זכויות יוצרים.

Neuroscience for High School

The Teacher's Guide | September 2016

Chief Scientific Advisor: Prof. Uri Ashery

Editor: Yair Ben-Horin

Written by: Dr. Nira Shimoni-Ayal, Yair Lakretz, Shiri Makov, Dr. Avishag Toporovich, Dr. Tzafrir Shlomo, Eldad Saragosti, Ori Ossmy, Yair Ben-Horin

Design: Keren Eis

Illustrations: Amit Gal, Hagit Matok

© 2016 All Rights Reserved by ORT Israel

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means: digital, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, now known or hereafter invented, without the prior written permission by the publishers.

על התכנית

תכנית הלימודים במדעי המוח פותחה על מנת לחשוף את תלמידי חטיבת הביניים וכיתות י' לתחום מרתק הנמצא בחזית העיסוק המדעי והטכנולוגי כיום.

התכנית מקיפה ידע רב בנושא מדעי המוח. לצד התמקדות מדעית-ביולוגית בנושאים המרכזיים של מערכת העצבים, היא משלבת היבטים נוספים כמו טכנולוגיה, פסיכולוגיה, פילוסופיה ואתיקה.

התכנית פותחה במרכז למחקר, פיתוח והכשרה של רשת אורט, בשיתוף בית הספר סגול למדעי המוח באוניברסיטת תל אביב.

התכנית מיועדת לכיתות י' במסגרת לימודי "השכלה כללית", אך מתאימה לכל שכבות על-יסודי המעוניינות בהעשרה לשיעורי המדעים והטכנולוגיה תוך התאמת התכנים המוצעים לרמת התלמידים. היקף התכנית המוצעת הוא 30 שעות, והיא כוללת הצעות להרחבה והעשרה מעבר למסגרת הזמן הזו.

התכנים המוצעים מכילים מערכי שיעור מפורטים ומצגות הוראה, העושים שימוש נרחב באיורים ובסרטונים, ומציעים התנסויות שונות ללמידה חווייתית ומשמעותית של התלמידים בכיתה. חלק מתכני הלימוד מופיעים כפעילויות מקוונות באתר האינטרנט של התכנית. באתר זה תמצאו גם בחנים מקוונים להערכת התלמידים בנושאים שונים.

אתר האינטרנט של התכנית: <http://brain.ort.org.il>

מבנה התכנית

התכנית בנויה מארבעה פרקים:

עצבים חשופים ניורואנטומיה



- הרכב מערכת העצבים
- תאים ותקשורת במערכת העצבים
- מערכת העצבים המרכזית – מוחות הגולגולת

פרק זה מאפשר חשיפה ראשונית למערכת העצבים. הוא עוסק במבנה המערכת ובפריסתה בגוף האדם, וכן בקשר שבין מבנה המערכת ומיקום רכיביה השונים לבין תפקודיהם.

לזוז בלי לחשוב מערכת התנועה



- קשת הרפלקס
- מעבר האות העצבי
- תנועות רצוניות

פרק זה עוסק ברכיבים התנועתיים של מערכת העצבים – המערכת המוטורית. דרך היכרות עם הרפלקסים הגורמים לנו "לזוז בלי לחשוב", הוא מאפשר ללמוד מהם המסרים החשמליים והכימיים שבמערכת העצבים וכיצד הם נעים בתוכה. כמו כן הפרק מאפשר יצירת אנלוגיות בין גוף האדם ואופן פעולתו לבין מערכות טכנולוגיות.

לבלבל את המוח מערכת החישה



- כמה חושים יש לנו?
- חושים אחרים – בעלי חיים ומערכות טכנולוגיות
- חוש הראייה – מהעין למוח
- תפיסת עומק וצבע
- אשליות וליקויים תפיסתיים

פרק זה עוסק במערכת החישה, תוך התמקדות בעין ובחוש הראייה. הוא מציג את העקרונות המשותפים לכל החושים (המוכרים, והמוכרים פחות) ויוצר קישור בינם לבין מערכות טכנולוגיות. על ידי שימוש נרחב באשליות תפיסיות הפרק עומד על חשיבות העיבוד המתרחש במערכת העצבים אחרי קבלת הקלטות מאברי החוש.

מה שמזכיר לי... למידה וזיכרון



- מהי למידה ומהו זיכרון?
- סוגי זיכרון
- התניות
- שינויים בזיכרון
- סוגיות אתיות במדעי המוח

פרק זה עוסק במנגנון הפעולה של הזיכרון – משלב הלמידה ויצירת הזיכרון ועד לשלב ההיזכרות ושלילת הזיכרון. הוא עומד על טיבו של הזיכרון האנושי ועל ההבדל בינו לבין רכיבי הזיכרון במחשבים. באמצעות התנסויות חווייתיות וסיפורי מקרה מעניינים הוא מאפשר לדון במידת המהימנות של הזיכרון ובהשלכותיה.

תוכן העניינים

הקדמה למורה.....	4
סילבוס.....	6

עצבים חשופים (ניורואנטומיה)

מבוא למדעי המוח.....	14
הרכב מערכת העצבים.....	18
הרכב מערכת העצבים – דיון כיתתי ופעילות בקבוצות.....	29
תאים ותקשורת במערכת העצבים.....	33
מערכת העצבים המרכזית – מוחות הגולגולת.....	35
מערכת העצבים המרכזית – עבודת חקר בקבוצות.....	42

לזוז בלי לחשוב (מערכת התנועה)

מבוא לתנועה וקשת הרפלקס.....	44
קשת הרפלקס.....	52
מעבר האות העצבי.....	53
תנועות רצוניות.....	66

לבלבל את המוח (מערכת החישה)

אז כמה חושים יש לנו בעצם?.....	76
חושים אחרים – בעלי חיים ומערכות טכנולוגיות.....	79
חוש הראייה – מהעין למוח.....	88
תפיסת עומק.....	111
תפיסת צבע.....	123
עיוורים לשעבר (מאמר).....	146
ליקויים תפיסתיים.....	150
כשהעיוור הולך לאיבוד.....	151

מה שמזכיר לי... (למידה וזיכרון)

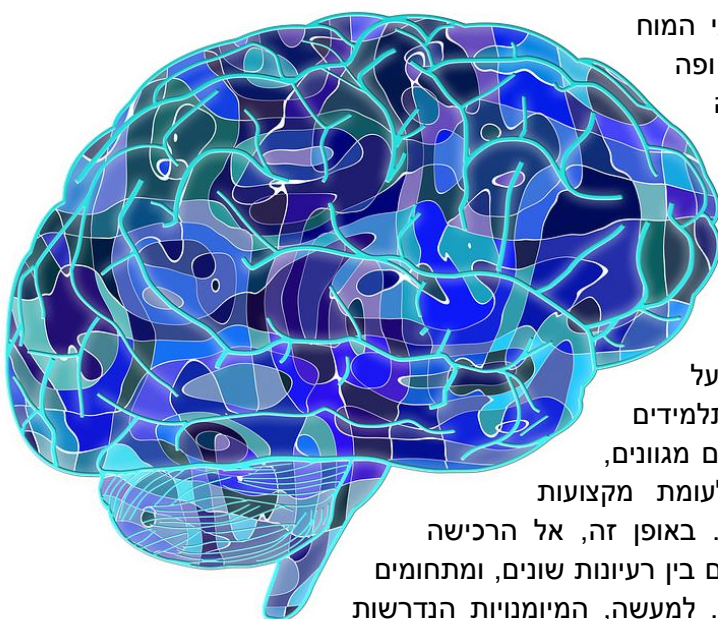
למידה וזיכרון.....	154
סוגי זיכרון.....	160
התניות.....	167
שינויים בזיכרון.....	168
סוגיות אתיות במדעי המוח.....	174

הקדמה למורה

עידן המוח

עיסוק מעניין יש לו, לחוקר המוח. מצד אחד, הוא בוחן שאלות שהעסיקו את האדם מאז ומעולם: כיצד אנו מתאהבים? מדוע אנו שוכחים? איך אנחנו תופסים את העולם שסביבנו? מהי מחשבה? היכן, אם בכלל, שוכנת הנפש? מצד שני, עליו להיות בעל עניין וידע רב במגוון תחומים, איש אשכולות של ממש! עקרונות הפיזיקה, הביולוגיה והכימיה מהווים כמובן את הבסיס הפיזיולוגי לתפקוד המוח, ועל חוקר המוח לשלוט בהם. אך מעבר לאלה ישנם גם תחומים רלוונטיים נוספים כמו מתמטיקה, מדעי המחשב והנדסה, פסיכולוגיה הקשורה לפן ההתנהגותי, בלשנות הקשורה לרכישת והבנת השפה, רפואה, ואף פילוסופיה. אולם יש דבר מעניין נוסף, ייחודי לחוקר המוח. עבורו, מושא המחקר הוא גם כלי העבודה לביצוע אותו המחקר. המוח חוקר את עצמו.

לא רק עיסוק מעניין יש לו, גם התזמון לא רע. למעשה, זוהי תקופה נפלאה לשאול שאלות על המוח, בין אם אתם חוקרים במוסד אקדמי, מורים בבית הספר, תלמידים, או "סתם" אנשים סקרנים. בכל העולם עוסקים כיום המדענים באתגרים שמציב בפנינו חקר המוח. מאמצים אלה מניבים פירות רבים, ולעיתים תכופות אנו שומעים על גילויים חדשים או המצאות מציתות דמיון. נראה שמגמה זו רק הולכת ומתרחבת, וכך גם הצורך שלנו להבין את המכונה המשוכללת ביותר שפגשנו אי פעם.



שלא באופן מפתיע, הפריחה הכללית של מדעי המוח מתחילה לחלחל גם לבתי הספר העל-יסודיים, ופה ושם אף לבתי הספר היסודיים. מדוע אין זה מפתיע? ראשית, ברור כי העיסוק בתחום זה מעורר עניין רב בקרב תלמידים צעירים. אין כמו המוח – כה מסתורי, כה רלוונטי לחיינו ובעל פוטנציאל כה עצום ליצירת חידושים טכנולוגיים – כדי לעורר את סקרנות התלמידים. ואין כמו סקרנות כדי לעורר מוטיבציה ללמידה. אך מעבר לכך, יש להסתכל על היתרונות הפדגוגיים הטמונים בלימודי המוח. התלמידים העוסקים בתחום זה נדרשים בדרך כלל ללימודים מגוונים, בין-תחומיים (אינטר-דיסציפלינאריים), וזאת לעומת מקצועות קלאסיים הנלמדים בדרך כלל בנפרד זה מזה. באופן זה, אל הרכישה ה"פשוטה" של ידע מצטרפת היכולת ליצור קשרים בין רעיונות שונים, ומתחומים שונים, ובכך מקבל הידע שנצבר ערך רב יותר. למעשה, המיומנויות הנדרשות בחקר המוח מתיישבות היטב עם מאפייני הלמידה והחשיבה שאליהם מכוונת מערכת החינוך של המאה ה-21.

לומדים מדעי המוח

על הרקע הזה פותחה במרכז המו"פ של אורט ישראל תכנית לימודים במדעי המוח, בשיתוף עם ראש בית הספר למדעי המוח באוניברסיטת תל-אביב ודוקטורנטים למדעי המוח. הלימוד בתכנית מגוון, וכולל:

- פעילויות מקוונות באתר התכנית – ובעקבות כל אחת מהן מבדק מקוון קצר להערכה, המאפשר קבלת ציון אוטומטי;
- התנסויות בכיתה או בבית;
- שיעורים בכיתה – בליווי מצגות הוראה ומערכי שיעור למורה.

כל חומרי התכנית – הכתובים והמקוונים – נמצאים באתר האינטרנט: <http://brain.ort.org.il>

שימו לב: מערכי השיעור שבאתר ניתנים לצפייה רק עבור מורים רשומים. תלמידים ואורחים באתר לא יוכלו לראותם.

החומרים המוצעים במדריך הזה ובאתר מכילים מידע רב ומפורט. אתם, המורים, מוזמנים לבצע התאמה של החומר לרמה הלימודית של תלמידים ולמסגרת הזמן של ההוראה. חלקים מסוימים יכולים לשמש כהרחבה והעשרה לתלמידים מתעניינים.

בחלק מהנושאים ניתנות דוגמאות מעולם הטכנולוגיה על ידי יצירת **אנלוגיות** בין מערכת ביולוגית למערכת טכנולוגית.

פיתוח תכנית הלימודים והטמעתה, כך אנו מקווים, יעלו את רמת העניין של התלמידים במדעים בכלל ובמדעי המוח בפרט, ויביאו חלק גדול מהם להמשך לימודים בתחום. יחד אתכם, המורים, נוכל להצמיח אנשים סקרנים וחושבים, ולטפח את מדעני העתיד של עידן המוח.

התמצאות במדריך למורה

מדריך זה מכיל את כל מערכי השיעור. לאורכו תמצאו 5 סמלים, שמשמעותם כדלהלן:

הערה למורה, בהקשר פדגוגי או תוכני



שאלה למחשבה או לדיון בכיתה



הצעה לצפייה או להתנסות קצרה בכיתה



הצעה לפעילות



קישור לאתר חיצוני



בהצלחה!

סילבוס: תכנית לימודים במדעי המוח לבתי ספר על יסודיים

מטרות התכנית

תוכן

- היכרות עם מושגי יסוד, עקרונות ותהליכים בתחום מדעי המוח, ויישומים טכנולוגיים שלהם.
- חשיפה אל הקשר ההדוק שבין מדעי המוח לדיסציפלינות נוספות.
- עיסוק בסוגיות אתיות הנובעות מהשימוש ביישומים טכנולוגיים בתחום מדעי המוח.
- עיסוק בהפרעות מנטליות כתוצאה ישירה של ליקויים במערכת העצבים, תוך דגש על קבלת השונה.
- למידה חווייתית שמטרתה לעורר התלהבות וסקרנות מדעית בקרב התלמידים.

מיומנויות

- טיפוח מיומנות למידה בתחומי דעת שונים באמצעות אנלוגיות בין-תחומיות במדע ובהנדסה.
- טיפוח סקרנות ומיומנויות של למידה עצמית וחשיבה ביקורתית.
- טיפוח חשיבה יצירתית להערכת רעיונות, תיאוריות ופרשנויות מתוך הסוגיות הנלמדות.

דרכי הערכה

בטבלאות הפרקים להלן תמצאו דרכי הערכה מוצעות לחלק מהנושאים, ביניהן בחנים מקוונים באתר האינטרנט של התכנית (כולל קבלת ציון אוטומטית). עליכם המורים להחליט באיזה אופן להעריך את התלמידים בכיתה. אנו ממליצים לשלב דרכי הערכה חלופיות.

התאמה לתכניות לימודים של משרד החינוך

פרק	תת-נושא	משך זמן מומלץ לפי תכנית				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
עצבים חשופים	מבוא	1	1			
	הרכב מערכת העצבים	3	2	2	3	2
	תאים ותקשורת במערכת העצבים	1	1	1		1
	מערכת העצבים המרכזית – מוחות הגולגולת	2	2	1		1
לזוז בלי לחשוב	מבוא לתנועה וקשת הרפלקס	1	1			1
	קשת הרפלקס	1	1			1
	מעבר האות העצבי	2	2	1		1
	תנועות רצוניות	1	1			
לבלבל את המוח	אז כמה חושים יש לנו בעצם?!	1	1	1	1	1
	חושים אחרים – בעלי חיים ומערכות טכנולוגיות	1	1		1	
	חוש הראייה – מהעין למוח	2	2	1		2
	תפיסת עומק	1	1			
	תפיסת צבע	2	2			
	עיוורים לשעבר (מאמר)	2	-			
	ליקויים תפיסתיים	1	1			
	כשהעיבוד הולך לאיבוד	1	1			
	הקרנת סרט	2	2			
	למידה וזיכרון	2	2			2
מה שמזכיר לי...	סוגי זיכרון	2	2			
	התניות	1	1		1	
	שינויים בזיכרון	1	1	1		
	סוגיות אתיות במדעי המוח	1	1			
	סה"כ שעות	32	30	8	6	12

לחצו על הקישורים לצפייה במסמכים של משרד החינוך:

- (1) תכנית מלאה – כיתות ט'-י' (כולל "השכלה כללית")
- (2) תכנית מלאה – כיתות ז'-ח'
- (3) ביולוגיה לכיתה ח': נושא מרכזי מערכות ותהליכים ביצורים חיים:
 - א. נושא משנה תפקודן של מערכות ביצורים חיים: תקשורת
 - ב. נושא משנה בריאות האדם, איכות החיים ודרכים לשמירתם
- (4) מבוא למדעים (ביולוגיה) לכיתה י' (לתלמידים שאינם מתמחים במדעים):
 - א. נושא חובה מבוא לביולוגיה של האדם (בדגש הומיאוסטזיס)
 - ב. נושא בחירה התנהגות בעלי חיים
- (5) ביולוגיה לחטיבה העליונה (5 יח"ל): נושא ליבה גוף האדם בדגש הומיאוסטזיס

א. עצבים חשופים (נוירואנטומיה)

מטרות הפרק

- היכרות מעוררת עניין וסקרנות עם תחום מדעי המוח.
- התלמידים יכירו את רכיבי מערכת העצבים, את הפריסה ואת התפקוד שלהם.
- התלמידים יתארו את ההיקף הרחב של פעילות מערכת העצבים ויסבירו את חשיבותה בחיי היום-יום.
- התלמידים יבינו שהמערכת בנויה מתאים ושהתפקוד של המוח מותנה בתקשורת בריאה ביניהם.
- התלמידים יבינו שהמוח הוא לא "עיסה אחידה", אלא מבנה-על המורכב ממבנים שונים בעלי תפקידים שונים.
- התלמידים יתנסו בחיפוש נבון של מידע מדעי באינטרנט.

משך הזמן: 7 שעות

תכנים

תת-נושא	תוכן	דרך הוראה	דרכי הערכה	רכיבי לימוד באתר
מבוא	פריטי ידע ומיתוסים במדעי המוח	הקנייה כיתתית / חידון בכיתה		- מצגת הוראה - מצגת חידון - חידון באפליקציית KAHOOT
הרכב מערכת העצבים	המערכת המרכזית והפריפריאלית	הקנייה כיתתית + פעילות בקבוצות		- מצגת הוראה - מערך למורה - פעילות בקבוצות
תאים ותקשורת במערכת העצבים	- מה זה תא? - תאי עצב (נוירונים) - תקשורת בין נוירונים (חשמלית / כימית) - סינפסה	הקנייה כיתתית + פעילות מקוונת	בוחן מקוון	- פעילות מקוונת - בוחן מקוון - מערך פעילות מקוונת למורה
מערכת העצבים המרכזית – מוחות הגולגולת	המבנה הפנימי של מערכת העצבים המרכזית ותפקידי האיברים השונים	הקנייה כיתתית + פעילות בקבוצות	פעילות חקר להצגה בכיתה	- מצגת הוראה - מערך למורה - פעילות בקבוצות
בוחן מסכם לפרק			בוחן מקוון	בוחן מסכם מקוון

ב. לזוז בלי לחשוב (מערכת התנועה)

מטרות הפרק

- העמקת ההיכרות עם מבנה הנירן (תא העצב) והבנת התקשורת בין תאים.
- העמקת ההבנה של הקשר בין התפקוד ברמת המאקרו (תקשורת בין מערכת העצבים המרכזית להיקפית) לרמת המיקרו (תקשורת בין תאים, פוטנציאל פעולה), תוך לימוד של קשת הרפלקס.
- העמקת ההבנה של שליטת המוח בתנועה, החל מהדגמה של מבנים מוחיים שמוסטים תנועה ועד הדגמה של ליקוי מוחי שמוביל לבעיות בתנועה.

משך הזמן: 5 שעות

תכנים

תת-נושא	תוכן	דרכי הוראה	דרכי הערכה	רכיבי לימוד באתר
מבוא לתנועה וקשת הרפלקס	- רפלקסים מוכרים ופחות מוכרים - אנלוגיה עם מערכת הנדסית (תרמוסטט)	הקנייה כיתתית		- מצגת הוראה - מערך למורה
קשת הרפלקס	שלבי הרפלקס	פעילות מקוונת	בוחן מקוון	- פעילות מקוונת - מערך פעילות מקוונת למורה - בוחן מקוון
מעבר האות העצבי	- פוטנציאל פעולה - אינטגרציה עצבית - סינפסה כימית	הקנייה כיתתית		- מצגת הוראה - מערך למורה
תנועות רצוניות	- תנועות לא רפלקסיביות ומעורבות מוח הגולגולת - בקרה וקואורדינציה ע"י המוח הקטן (רכיבה על אופניים) - מיומנות גבוהה לתנועה (רקדנים / נגנים) - שליטה על תנועה והפרעות של חוסר שליטה (פרקינסון)	הקנייה כיתתית		- מצגת הוראה - מערך למורה

ג. לבלבל את המוח (מערכת החישה)

מטרות הפרק

- שבירת הקונספציה לגבי קיומם של חמישה חושים בלבד.
- חשיבה מעמיקה על הצורך ההישרדותי בחושים.
- תיאור המסלול החל מאיבר החישה ועד עיבוד במוח, תוך הדגשת החשיבות של היריסטיקות וסטראוטיפים
- שימוש באשליות ראייה להדגמה והסקת תובנות.

משך הזמן: 9 שעות

תכנים

תת-נושא	תוכן	דרך הוראה	דרכי הערכה	רכיבי לימוד באתר
אז כמה חושים יש לנו בעצם?!	• חושים נוספים	הקנייה כיתתית + פעילות מקוונת	בוחן מקוון	• פעילות מקוונת • מערך למורה • בוחן מקוון
חושים אחרים – בעלי חיים ומערכות טכנולוגיות	• חושים שיש לחיות אבל אין לאדם • חשיבות החישה לשרידות יצורים חיים • התאמה של יכולות החישה לסביבת המחיה ולצרכים • חישה במכשירים אלקטרוניים	הקנייה כיתתית		• מצגת הוראה • מערך למורה
חוש הראייה – מהעין למוח	• מבנה העין • "הכתם העיוור" • מסלול הראייה • שדה הראייה והקורטקס הראייתי הראשוני	הקנייה כיתתית		• מצגת הוראה • מערך למורה
תפיסת עומק	• רמזי עומק דו-עיניים וחד-עיניים	הקנייה כיתתית		• מצגת הוראה • מערך למורה
תפיסת צבע	• שלבי עיבוד ראייתי שקשורים בתפיסת צבע • העמקה בתכונות הרשתית התורמות לתפיסת צבע ואובייקטים	הקנייה כיתתית		• מצגת הוראה • מערך למורה
עיוורים לשעבר (מאמר)	• מחקר רפואי בעל השלכות קליניות, הנדסיות וחברתיות	עבודה עצמית	שאלון מקוון	• מאמר וסרטון • שאלון מקוון
ליקויים תפיסתיים	• עולם ללא תנועה – אקינטופסיה • עולם ללא צבעים – ארכומטופסיה • עולם ללא פנים – פרוסופאגנזיה	פעילות מקוונת	פעילות הערכת עמיתים מקוונת	• פעילות מקוונת • מערך פעילות מקוונת למורה • פעילות שיתופית מקוונת
כשהעיבוד הולך לאיבוד	• אשליות בחושים השונים • "התגשויות" בין קלטים מחושים שונים	פעילות מקוונת	בוחן מקוון	• פעילות מקוונת • מערך פעילות מקוונת למורה • בוחן מקוון

ד. מה שמזכיר לי... (למידה וזיכרון)

מטרות הפרק

- התלמידים יקבלו מושג פיזיולוגי לגבי הרעיון המופשט של זיכרון – כיצד מוח ביולוגי יכול לקודד מידע שהוא כביכול דבר מופשט לחלוטין.
- הבנת הפרעות זיכרון ככשלים במערכת הביולוגית.
- פתח לדיון על הפרעות מנטליות ואתיקה של הזיכרון.

משך הזמן: 9 שעות

תכנים

תת-נושא	תוכן	דרך הוראה	דרכי הערכה	רכיבי לימוד באתר
פתיחת הנושא	הצעה לסרטים אפשריים: Akeelah and the bee איש הגשם	הקרנת סרט באורך מלא		
למידה וזיכרון	• קידוד ושליפה • זיכרון מתוך הקשר • מקרי קיצון (אי זיכרון / אי שכחה) • זיכרון אנושי מול זיכרון מחשב	הקנייה כיתתית		• מצגת הוראה • מערך למורה
סוגי זיכרון	• זיכרון לטווח קצר • זיכרון לטווח ארוך	הקנייה כיתתית		• מצגת הוראה • מערך למורה
התניות	• התניה קלאסית • התניה אופרנטית	פעילות מקוונת	בוחן מקוון	• פעילות מקוונת • מערך פעילות מקוונת למורה • בוחן מקוון
שינויים בזיכרון	• פתולוגיות (דמנציה, אמנזיה)	הקנייה כיתתית		• מצגת הוראה • מערך למורה
סוגיות אתיות במדעי המוח	• העלאת טיעונים בסוגיות אתיות • מהימנות הזיכרון האנושי • שימוש בתרופות נירון-פסיכולוגיות המשפיעות על הזיכרון • השלכות אתיות של קוגניציה מלאכותית	דיונים כיתתיים		• מצגת הוראה • מערך למורה

עצבים חשופים



נוירואנטומיה

מבוא למדעי המוח

מטרה:

- היכרות מעוררת עניין וסקרנות עם תחום מדעי המוח.

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית

משך הזמן המוקצה: שעה אחת

רציונל השיעור

תחום חקר המוח הפך בשנים האחרונות לפופולרי ומעורר עניין בקרב הקהל הרחב. זוהי, כמובן, תופעה מבורכת. אולם חשוב לשים לב במקרים כאלה שלמידע היוצא מהאקדמיה אל הקהל הרחב עשוי להתווסף גם מידע שגוי – אם בשל מקרים של "טלפון שבור", או אף עקב שרלטנות – אשר בסופו של דבר גורמים ליצירת מיתוסים מרהיבים שאין להם כל אחיזה במציאות.

בתוכנית הלימודים הזו אנו משתדלים להנגיש את הידע בצורה סדורה ואחראית, שתוכל להוות בסיס מושכל ללמידה עצמית ולהעמקת הסקרנות של התלמידים בתחום מדעי המוח. התוכנית בנויה כך שבמהלך השנה תלמידים רוכשים ידע בסיסי על אופן הפעולה של המוח מחד, וכלים מחשבתיים שיאפשרו להם לסגל גישה ביקורתית לגבי מדעי המוח מאידך.

כפתיח לתוכנית, בשיעור הראשון, נציג מספר מיתוסים רווחים ונגלה אם הם נכונים.

ישנם שלושה עזרים עבור שיעור זה:

1. מצגת חידון
2. חידון באפליקציית KAHOOT
3. מצגת תקציר של מערך זה



ניתן לערוך את החידון לפני או אחרי לימוד התכנים שבמערך זה.

ניתן לקיים את השיעור בכיתת המחשבים, וכך בעת החידון התלמידים יוכלו לחפש את התשובות לשאלות ברשת. באופן זה התחרות לא תתבסס על ניחוש או ידע מוקדם, אלא על מיומנויות חיפוש מהיר ברשת.

מהלך השיעור

1. האם אנו משתמשים רק ב-10% מהמוח?

תשובה: בהחלט לא, אנו משתמשים בכל המוח.

עדויות לכך ניתן למצוא במדידות שונות של המוח, שמראות שכל חלקיו פעילים.

בנוסף, ישנו הסבר הגיוני: המוח האנושי שוקל רק כ-2% ממשקל הגוף שלנו, אך הוא צורך כחמישית מצריכת החמצן של הגוף וכחמישית מכמות הגלוקוז – כלומר פי 10 מגודלו היחסי בגוף. במילים אחרות, המוח הוא איבר "זולל אנרגיה". כדי להזין את המוח במספיק גלוקוז וחמצן גופנו נדרש למאמץ גדול והשקעת משאבים ניכרת. אילו היינו משתמשים רק בחלק קטן ממנו, לא הייתה סיבה "לפרנס" מוח כה גדול ויקר. לפיכך ניתן להסיק שאנו משתמשים בכל המוח, ולא רק בעשירית (או חלק אחר) ממנו.

חשוב לציין שבכל רגע נתון ישנה פעילות במספר מצומצם של מוקדים במוח, וכמעט בשום שלב אין הפעלה מאסיבית של כל המוח בבת אחת. המקרים הבודדים שבהם כל האזורים במוח פעילים בו-זמנית הם התקפים אפילפטיים ואחרים.

<http://ed.ted.com/lessons/what-percentage-of-your-brain-do-you-use-richard-e-cytowic>

סרטון:

[cytowic](http://ed.ted.com/lessons/what-percentage-of-your-brain-do-you-use-richard-e-cytowic)



2. האם אדם יוכל לשרוד אחרי שיוציאו לו חתיכה מהמוח?

תשובה: כן! לפחות בחלק מהמקרים.

יש אזורים נרחבים במוח שניתן להסיר מבלי ליצור פגיעה ניכרת בתפקודו של האדם. יחד עם זאת, יש אזורים שהסרתם או פגיעה בהם תגרום למוות מיידי; למשל אזורים בגזע המוח, אזורים שאחראים על ההפעלה השוטפת של הגוף (אזורי נשימה וכולי).

דוגמה למצב שבו מסירים חתיכת מוח לאדם: לעתים כאשר אזור מסוים במוח אינו תקין וגורם לבעיות ניתן לבצע ניתוח להסרתו. אם הניתוח מצליח הנבדק יכול לחזור לתפקוד רגיל.

סרטון המראה הסרת מוקד אפילפטי במוח. בהקשר זה "אזור מוח לא תקין" מתייחס בעיקר לאזור שמהווה מוקד אפילפטי ויוצר התקפים של חוסר איזון חשמלי המתפשטים במוח ומסכנים את חייו של החולה, או אזור הלוקה בגידול כלשהו: <http://ed.ted.com/lessons/what-if-we-could-look-inside-human-brains-moran-cerf>



[human-brains-moran-cerf](http://ed.ted.com/lessons/what-if-we-could-look-inside-human-brains-moran-cerf)

עניין זה מדגים היטב את הקשר: מדע ← רפואה ← מדע. התקדמות מדעית מאפשרת לבצע ניתוחים לטיפול באפילפסיה, שבהם מסירים את המוקד האפילפטי ממוחו של החולה. ההליך הרפואי עצמו כולל שלבים בהם מוחו של הנבדק מנוטר 24 שעות ביממה ולמעשה ישנה נגישות ישירה לרקמת המוח, ואז הנבדק יכול להתנדב להשתתף בניסויים של חוקרי מוח (שלא קשורים לניתוח שלו), ובכך לסייע בקידום המדע. קידום המדע מוביל בתורו לקידום הרפואה. ככל שנבין טוב יותר את המוח ואופן פעולתו, נוכל לאפיין בצורה טובה יותר מחלות ולקיימים ולספק להם מענה טיפולי בצורה טובה יותר.

3. ניתוח מוח הוא הניתוח הכי כואב

תשובה: לא נכון, ניתוח מוח אינו כואב כלל.

במוח אין קולטני כאב, ולכן חיתוך של רקמת מוח אינו מורגש. בהליך של ניתוח מוח עושים הרדמה מקומית רק לאזורים שסביב המוח, ואותם צריך לחתוך כדי להגיע אל המוח עצמו: עור הקרקפת, רקמת השריר שמעל הגולגולת וכולי. האדם נמצא בהכרה ויכול לנהל שיחה ערה, לנגן וכולי. הישארותו של המנותח בהכרה מלאה במהלך הניתוח מאפשרת לרופאים לוודא שהם לא פוגעים בחלקי מוח האחראים על תפקודים חשובים (דיבור, ראייה...).

קישור לאתר שבו סרטון של אדם מנגן ושר בזמן שהוא עובר ניתוח מוח להסרת גידול:
<http://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-4664881,00.html>



4. לאורך ההיסטוריה היה ברור מאז ומעולם שהמוח הוא איבר כה חשוב

תשובה: לא נכון. בתקופות מסוימות בעבר לא ידעו שהמוח ממלא תפקיד כה מרכזי בהוויית האדם.

במצרים העתיקה נהגו לחנוט גופות על מנת לשמר איברים חיוניים שיוכלו לשמש את המתים בגלגולם הבא. איברים כמו לב, קיבה, כבד וריאות נוקו ומולאו בחומרים משמרים, ולאחר מכן הוחזרו אל הגופה החנוטה. לעומתם, המוח נשאב החוצה דרך האף ונזרק – מה שמרמז על כך שהמצרים הקדמונים לא סברו שהמתים יזדקקו לו בגלגול החדש...

בתנ"ך המילה "מוח" מוזכרת רק פעם אחת, וגם אז – בהקשר של מוח העצמות (איוב, כ"א, 24). לאורך התנ"ך רגשות, מחשבות ותכונות אופי מיוחסים ללב, ולא למוח.

עד היום השתמרו מתקופות קודמות פתגמים רבים שמייחסים רגשות, מחשבות ותכונות אופילאיריים שונים, אך לא למוח:

- תחושת בטן
- לב של אבן
- קשה עורף בוחן כליות ולב
- מוסר כליות

עודדו את התלמידים למצוא ביטויים נוספים!



כל אלה מראים שלא תמיד היה ברור שהמוח הוא האיבר האחראי על התפקודים הקוגניטיביים של האדם.

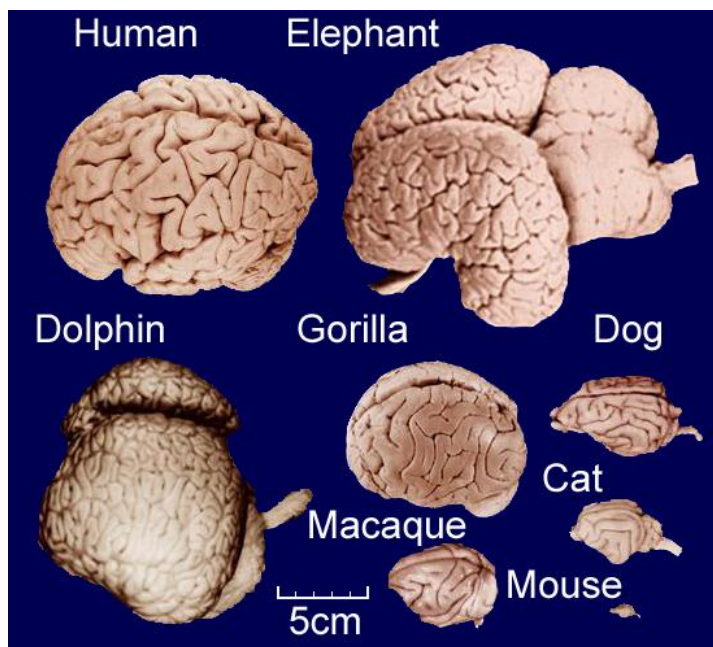
הפילוסוף היווני אריסטו (384-322 לפנה"ס) אמנם התייחס למוח, אך הוא סבר שהמוח אינו אלא אזור קירור המִצֵּן את אדי החום הנפלטים מהלב, שהוא האיבר המחולל את הקוגניציה.

הרחבה והעשרה על ההיסטוריה של מדעי המוח:

<http://techedu.huji.ac.il/learning/brain/brainhist1.html>



5. לפי גודל המוח אפשר לדעת עד כמה הוא טוב תשובה: לא בהכרח.



התשובה הארוכה מתחלקת למספר הסברים:

- א. לכל החיות יש מוח, או לכל הפחות – מערכת עצבים, שהיא גרסה פשוטה של מוח שפרושה לאורך הגוף. לכל חיה יש תפקודים שהיא צריכה למלא, ובהתאם לכך יש גבול לגודל המוח שחיות יכולות לשאת. עם זאת, אנחנו רואים שיש חיות מאוד מתוחכמות שהן גם מאוד קטנות, ובהתאם – המוח שלהן קטן. אחת מהן היא העורב, שיש לו זיכרון נהדר ויכולת תמרון טובה במרחב תלת-מימדי (בתעופה). המוח של כל חיה מתאים למה שהיא צריכה לעשות בעולם, ולכן לא טריוויאלי בהקשר זה לקבוע מזה "מוח טוב", שהרי מוח של ציפור מספק את כל מה שצריכה ציפור לעשות, ועבורה הוא "מוח טוב".
- ב. אם אנחנו מדברים על "מוח טוב" כמוח משוכלל שיש לו יכולות עיבוד גבוהות, זיכרון לטווח ארוך ומגוון תפקודים (שפה, רגש, שליטה מגוונת בהתנהגות) – גם כאן גודל המוח אינו תנאי מספיק כדי לקבוע אם המוח טוב. למשל, מוחות של פיל או של לווייתן גדולים ממוח של אדם, וכנראה פחות משוכללים ממנו מהרבה בחינות. יש שיאמרו שפיל ולווייתן באופן כללי גדולים מהאדם, ורק טבעי שמוחם יהיה גדול יותר – כי הוא צריך להפעיל ולתחזק גוף גדול יותר. לפיכך אפשר לקבוע מדד חדש – גודל המוח ביחס לגודל הגוף. גם במדד זה האדם לא "מנצח": יחס הדומה לזה של האדם (כ-2%, כפי שראינו בסעיף 1 לעיל) נמצא במוחם של קופים מזנים מסוימים. בנוסף, ישנן חיות פחות משוכללות שלהן יחס מוח-גוף גדול בהרבה, למשל נמלה או סנאי.
- ג. אז מה בכל זאת מסביר את הייחוד של האדם? נראה שהתשובה טמונה בכמות תאי העצב בקליפת המוח (בקורטקס), שהיא הגבוהה ביותר במוח האדם לעומת שאר החיות. כמות גבוהה של תאי עצב היא למעשה כמות גבוהה של יחידות חישוב, שמאפשרת חישובים מורכבים יותר מכל חיה אחרת.

סרטון TED מעניין שמסביר את הנושא:

[http://www.ted.com/talks/suzana_herculano_houzel_what_is_so_special_about_the_huma
n_brain](http://www.ted.com/talks/suzana_herculano_houzel_what_is_so_special_about_the_human_brain)



הרכב מערכת העצבים

מטרות

- התלמידים יזהו את הרכיבים השונים של מערכת העצבים, יתארו את פריסתם ויסבירו את התפקוד שלהם.
- התלמידים יתארו את ההיקף הרחב של פעילות מערכת העצבים ויסבירו את חשיבותה בחיי היום-יום.

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית + פעילות בקבוצות.

משך הזמן המוקצה: 3 שעות, כולל פעילות בקבוצות (במסמך נפרד).

מושגים (הסבר לכל מושג מופיע באתר)

מערכת העצבים המרכזית (מוח הגולגולת ומוח השדרה), מערכת העצבים ההיקפית (רצונית ואוטונומית), fight or flight.

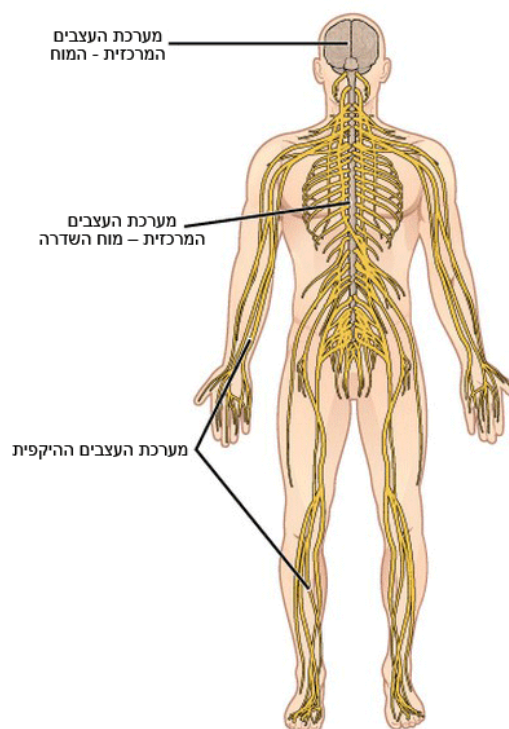
חומר קריאה חיצוני למורה:

קרלסון נ', הפיזיולוגיה של ההתנהגות כרך א', מהדורה 9, האוניברסיטה הפתוחה.

בשיעור הזה אנו מדגישים שמוח הגולגולת אינו פועל לבד, אלא הוא חלק ממערכת של עצבים. הוא המשכי למוח השדרה, ושניהם מקיימים תקשורת ערה עם מערכת העצבים ההיקפית. חשוב להדגיש את **הצורך בתקשורת** בין חלקי המערכת: קבלת מידע מהפריפריה ושליחת פקודות לתגובה, לטובת הישרדות איכותית.



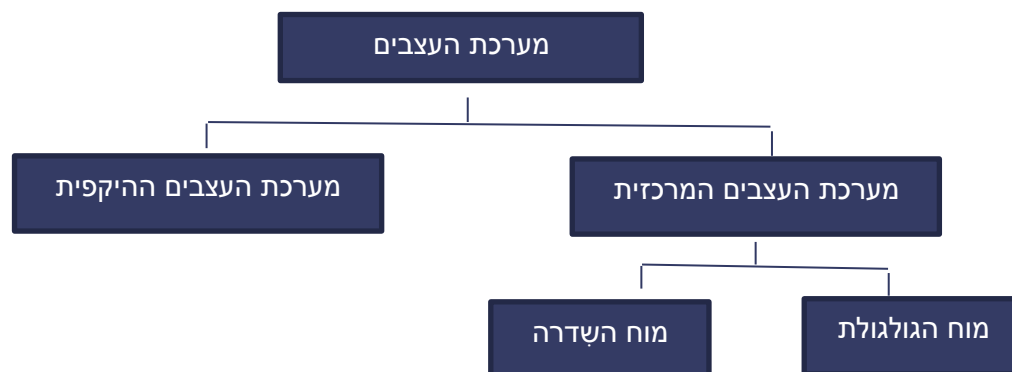
- בחיי היומיום אנו חושבים, מרגישים, מקבלים החלטות, מבצעים פעולות. האיבר שמאפשר לנו לעשות את כל הדברים הללו בצורה איכותית הוא **המוח**.
- המוח לא עובד לבד, אלא הוא חלק ממערכת – **מערכת העצבים**.
- המוח מתקשר ללא הרף עם יתר החלקים של מערכת העצבים, התפקוד שלו תלוי בכך.
- מיהם יתר החלקים של מערכת העצבים?



Author: CFCF, some rights reserved by CC-BY

- החלקים הם: **מוח הגולגולת** (שאנו רגילים לכוונתו פשוט – "המוח"), **מוח השדרה** (שאנו קוראים לו גם "חוט השדרה") ו**העצבים של מערכת העצבים ההיקפית**.

הערה למורה: בשלב זה כדאי לצייר על הלוח סכמה של מבנה מערכת העצבים, ולהשאיר אותה לאורך השיעור. (בהמשך תתווסף לסכמה זו חלוקה של המערכת ההיקפית):



- מוח הגולגולת ומוח השדרה מרכיבים את הליבה של מערכת העצבים – **מערכת העצבים המרכזית**. היא נחשבת מרכזית משום שבה מתרחשים תהליכי החישוב והעיבוד הגבוהים של מערכת העצבים, שהופכים את האדם ליצור כה משוכלל ובעל יכולות שכליות.
- **מערכת העצבים ההיקפית** מורכבת מהמוני עצבים שפרושים לאורכו ולרוחבו של הגוף. עצבי מערכת העצבים ההיקפית שולטים על התקשורת של המערכת המרכזית עם העולם שסביבנו – הם אוספים מידע מרחבי הגוף אל המערכת המרכזית, ומעבירים בחזרה לגוף פקודות והוראות ממנה.
- אילו סוגי מידע עוברים מהמערכת ההיקפית למרכזית? מידע על לחץ מגיע מהרגל והמוח מפרש אותו כתחושת כאב, מידע על גלי קול מגיע מהאוזן והמוח מפרש אותו כצלילי, מנגינה או כדיבור, מידע על אור מגיע מהעין והמוח מנתח אותו כתמונה.

דוגמאות: אפשר להסביר כדוגמה את מערכת השמיעה – האוזן היא כמו מיקרופון, היא קולטת גלי קול מהסביבה. בדומה למיקרופון, האוזן אינה יודעת מה פשרו של הקלט הקולי – האם זו מנגינה / צליל אזהרה / דיבור? כדי לזהות מה אומר הקול צריך מכונת עיבוד שתנתח את הקלט השמיעתי. מכונת העיבוד בגופנו היא מערכת העצבים המרכזית, אבל גם הרשמקול יכול להיות מחובר למכונת עיבוד, למשל אפליקציית זיהוי השירים "שזאם". כאשר משמיעים לאפליקציה שיר היא מחזירה את שם השיר והלהקה המבצעת. זה קורה כתוצאה מכך שגלי הקול עברו דרך תוכנת עיבוד שמזהה דפוסים של צלילים, ומשווה אותם למאגר קיים. כמובן שהמוח שלנו מזהה כמות גדולה לאין שיעור של צלילים, וניתן לומר שמבחינה זו הוא המחשב המשוכלל ביותר בעולם. חלק ניכר מההתקדמות הטכנולוגית בתחום עיבוד צליל מתבסס על ידע מחקר המוח ועל ההבנה של איך המוח מבצע עיבוד דומה.

דוגמה נוספת – העין בהקשר הזה היא כמו מצלמה: היא קולטת את התמונה, אבל לא "יודעת" מה רואים בה. צריך מכונת עיבוד כדי לזהות מה רואים בתמונה. כיום ישנן תוכנות שמאפשרות למחשבים לעשות עיבוד תמונה ולזהות בה דברים. למשל בפייסבוק, כאשר מעלים תמונה, פרצופים מסומנים בריבוע באופן אוטומטי. זה קורה כתוצאה מכך שהתמונה עברה דרך תוכנת עיבוד שמזהה פרצופים. כמובן שהמוח שלנו מזהה כמות גדולה לאין שיעור של פריטים, וניתן לומר שמבחינה זו הוא המחשב המשוכלל ביותר בעולם. חלק ניכר מההתקדמות הטכנולוגית בתחום עיבוד תמונה מתבסס על ידע מחקר המוח, וספציפית חקר מערכת הראייה ואזורים במוח שמעבדים תמונות. חשוב לציין שבדוגמה הזו יש חוסר דיוק ברמה מסוימת, כי למעשה העין לא מחוברת למוח **דרך** מערכת העצבים ההיקפית אלא עצב הראייה שיוצא מהעין נחשב **בעצמו** כבר לחלק ממערכת העצבים המרכזית, אבל היא מדגימה את ההבדלים בין איבר שקולט מידע מהסביבה (המערכת ההיקפית) לבין איבר שמעבד את המידע (המערכת המרכזית).

- אילו סוגי מידע עוברים מהמערכת המרכזית להיקפית? לאחר שהמוח "הגיע למסקנה" שחם, הוא מעביר פקודה דרך העצבים אל בלוטות ההזעה להפריש זיעה; לאחר שהמוח זיהה כאב ביד הוא שולח פקודה דרך העצבים אל שרירי היד להזיז אותה.

מה היה קורה אילו היתה לנו רק תת-מערכת אחת – מרכזית או היקפית?

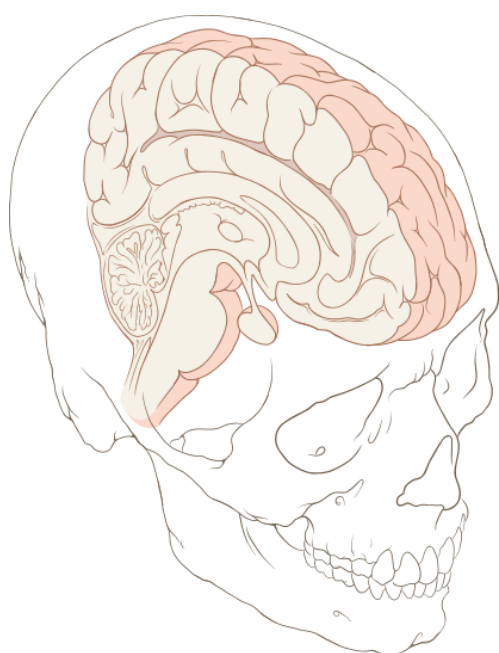
תשובה: אם היתה רק מערכת עצבים מרכזית, היא היתה יכולה לעבד ולעשות חישובים, אבל לא היתה לה גישה אל העולם שסביבנו, ולכן היא לא היתה יכולה לעזור לנו להבין את המציאות ולפעול כשורה. מאידך, אם היתה רק מערכת עצבים היקפית, היא היתה אמנם מודעת לסביבה ויכולה לפעול עליה, אבל כל אלה לא היו מתווכים על ידי מערכת החישוב והעיבוד המשוכללת – המוח, וכך היינו מסוגלים לתת **פרשנות מאוד בסיסית** לעולם שסביבנו ולייצר **תגובות מאוד בסיסיות** בהתאם.

- לכל היצורים החיים יש מערכת עצבים. ישנם יצורים פשוטים שלהם אין מערכת עצבים **מרכזית**, אלא רק עצבים היקפיים שפרושים ברחבי הגוף – לדוגמה תולעת. היכולת של תולעת לחוש את העולם

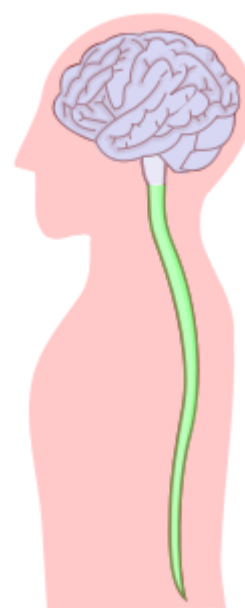
ולפעול בו מבוססת על מערכת עצבים היקפית בלבד. זה מגביל אותה לעיבוד נמוך בהרבה, ומאפשר לה להבין את העולם בצורה יותר פשוטה וגם לבצע מספר מצומצם של פעולות (זה לא בהכרח רע, כי בשביל להיות תולעת זה כנראה מספיק...).

מערכת העצבים המרכזית

- מערכת העצבים המרכזית כוללת את מוח הגולגולת ואת מוח השדרה.
- מוח הגולגולת ממלא את חלל הגולגולת, הוא מצוי מאחורי העיניים ומעל החך העליון. רוב הראש מלא במוח!



Author: Patrick J. Lynch, medical
illustrator, some rights reserved by CC-BY

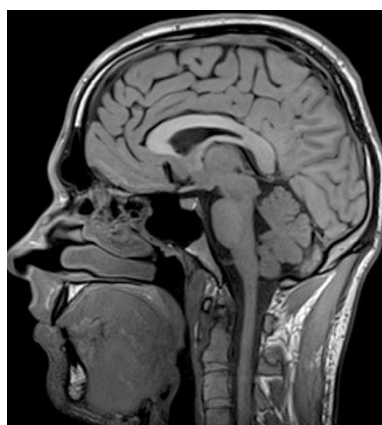


Author: Jordi March i Nogué, medical
illustrator, some rights reserved by CC-BY- SA

כדאי להדגים עם הידיים ולהתעכב על הנקודה הזו, רוב התלמידים עשויים להיות מופתעים עד כמה המוח גדול.



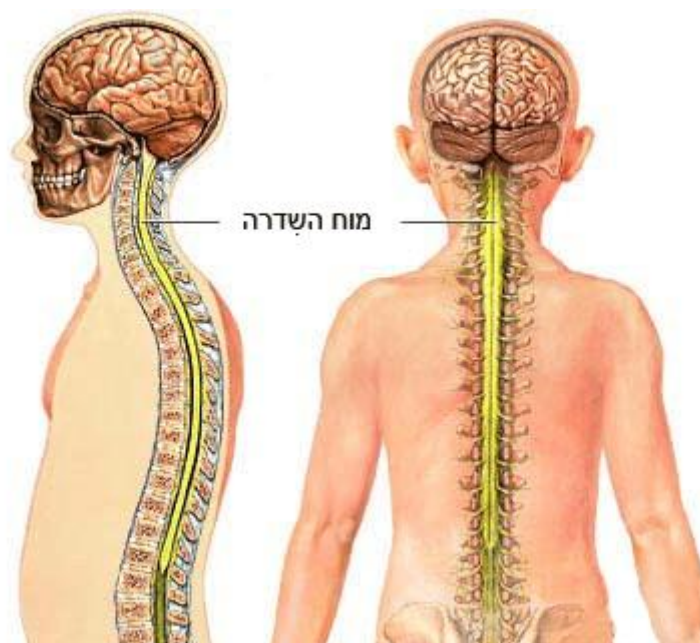
- מוח השדרה הוא המשך ישיר של מוח הגולגולת, שעוזר לו לתקשר עם מערכת העצבים ההיקפית, הפרושה ברחבי הגוף. חוט השדרה מאפשר למערכת העצבים המרכזית גישה נוחה יותר לאזורים מרוחקים של הגוף, כגון כף הרגל.



Author: Patrick J. Lynch, medical illustrator, some rights reserved by

תמונת ה-MRI (דימות בתהודה מגנטית - Magnetic Resonance Imaging) ממחישה את המשכיות מוחות הגולגולת ומוח השדרה. תמונה זו היא **חתך צידי** (חתך מלמעלה למטה שעובר בין שתי העיניים ובמרכז האף – לכן רואים את האף בשלמותו בתמונה).

- חוט השדרה הוא מוח לכל דבר. הוא מושחל בתוך חוליות עמוד השדרה:



Author: MrArifnajafov, some rights reserved by CC-BY-SA

בתמונה אפשר לראות שעמוד השדרה מתחיל ביחד עם מוח השדרה. כמו כן רואים שמערכת העצבים המרכזית מוגנת כולה בעצמות: הגולגולת ועמוד השדרה.



המחשה: אפשר לבקש מן התלמידים למשש את עמוד השדרה הצווארי של עצמם, כדי לקבל תחושה של מיקום חוט השדרה.

- **הגנה מיוחדת למערכת העצבים המרכזית:** מוח הגולגולת ומוח השדרה מהווים את מערכת העצבים המרכזית, כלומר מרכז הבקרה הגבוה ביותר של הגוף. הגוף אינו יכול להתקיים בלעדיהם, ולכן הם זוכים להגנה מיוחדת, בין היתר:
 - מעוטפים בעצמות הגולגולת ובעמוד השדרה.
 - מכוסים בשק, בו הם צפים בנוזל מונע זעזועים.

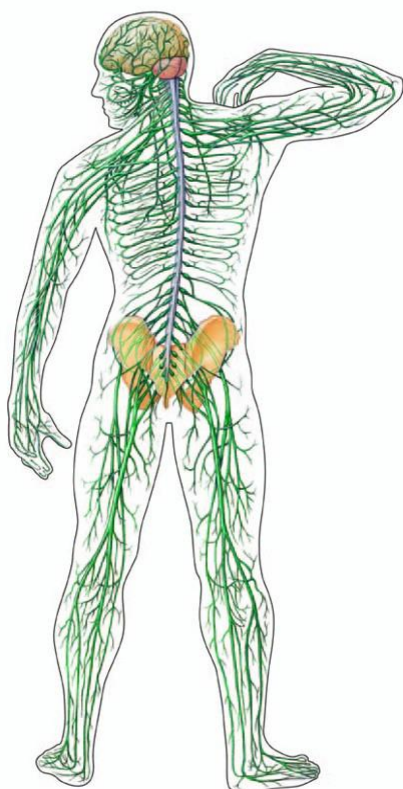
- למה כה חשוב להגן על מערכת העצבים המרכזית?
- משום ש:
 - היא זו שמפרשת את כל המידע שמתקבל בחושים שלנו ויוצרת לנו את תמונת העולם.
 - היא זו שמבקרת את ההתנהגות שלנו.
 - היא מכילה את הזכרונות שלנו.
 - היא קובעת את ההעדפות שלנו – מה אנחנו אוהבים ומה אנחנו שונאים.
 - היא מגדירה את רמת המוטיבציה שלנו.

אם הייתה בידינו הטכנולוגיה לעשות ניתוח השתלה של מערכת עצבים מרכזית, מה הייתה המשמעות של ניתוח כזה? האם השתלת מוח היא כמו השתלת לב או כליה? האם מושתל מוח נשאר אותו אדם לאחר ההשתלה, כשם שמושתל לב נשאר אותו אדם? על כן נאמר – המוח שלי הוא מי שאני.



מערכת העצבים ההיקפית

הכוונה לכל העצבים שאינם כלולים בשק עטופה המערכת המרכזית, ובכלל זה הגפיים, הפנים, אפילו הקרקפת של הראש – היא אמנם בראש אבל מחוץ לשק של המערכת המרכזית.



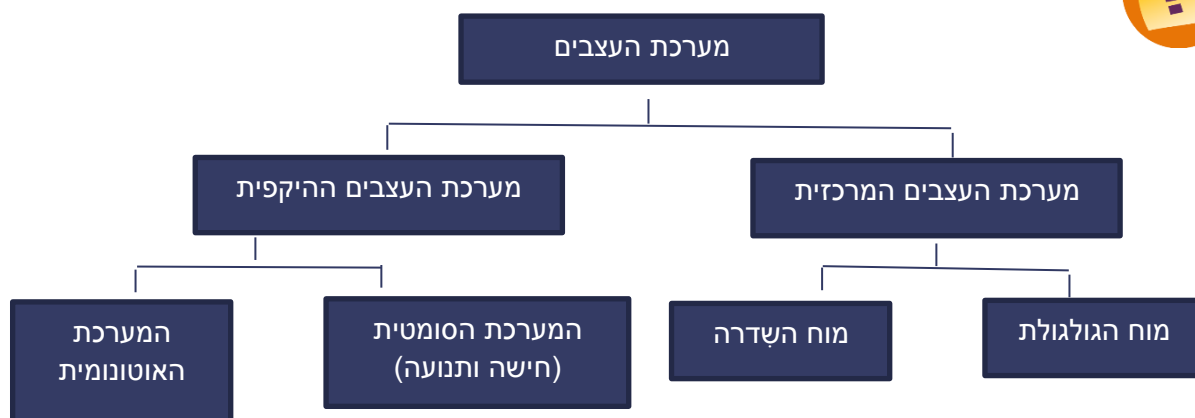
- מערכת העצבים המרכזית אינה פועלת לבד! היא מרגישה את הגוף ושולטת עליו דרך מערכת העצבים ההיקפית.
- המערכת ההיקפית כוללת סיבי עצבים שפרושים בכל רחבי הגוף.
- מערכת העצבים ההיקפית מחוברת מצד אחד למערכת העצבים המרכזית, ומן הצד השני **לאיברי חוש** (עין/אוזן וכו'), **לשרירים** (למשל השריר של הרגל/היד) או **לבלוטות** (למשל בלוטות זיעה/רוק).
- הקישור בין מערכת העצבים המרכזית לאיברי החוש שבפריפריה מאפשר להעביר מידע חושי מהפריפריה אל מערכת העצבים המרכזית – למשל להעביר את המידע הראייתי שהתקבל בעין אל המוח, לצורך עיבוד שיאפשר לנו להבין מה ראינו.
- הקישור בין מערכת העצבים המרכזית לשרירים מאפשר לתת פקודות לתנועה.
- הקישור בין מערכת העצבים המרכזית לבלוטות מאפשר לתת פקודות להפרשה או הפסקת הפרשה מבלוטה כלשהי.

• כיצד התקשורת מתקיימת?

- אנחנו כל הזמן מדברים על מעבר מידע, ולנוכח התמונה הזאת כדאי לציין שהעצבים הם כמו חוטי חשמל קטנים שדרכם זורם המידע (חשמל של ממש, כמו במכשיר חשמלי).
- גם מערכת העצבים המרכזית מורכבת מחוטים דומים, אך הם דחוסים זה לצד זה ומרכיבים את המבנים שראינו בתוך הגולגולת, או את חוט השדרה.

- כפי שראינו, מערכת העצבים ההיקפית אחראית למגוון גדול מאוד של תפקידים.
- מקובל לחלק אותה ל-2 תת-מערכות, בהתאם לאופי התפקוד: תת-המערכת הסומטית ותת-המערכת האוטונומית.

כעת כדאי להוסיף לתרשים שנמצא על הלוח מתחילת השיעור:



מערכת העצבים ההיקפית – תת-המערכת הסומטית: חישה ותנועה

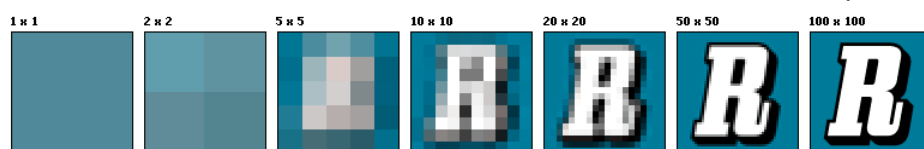
- הרכיב הסומטי של מערכת העצבים ההיקפית מכיל שלוחות חישה ושלוחות תנועה.
- שלוחות החישה קולטות מידע מהחושים שפרושים ברחבי הגוף (בעתיד נלמד בהרחבה על חושים שונים ומשונים שאולי אתם כלל לא יודעים על קיומם!).
- כל תחושה שאנו חשים מאיבר בגוף – מתאפשרת בזכות סיבי חישה של מערכת העצבים ההיקפית, שקצותיהם מצויים מתחת לעור ממש – זו מערכת הפרושה בכל הגוף.
- **הדגמה:** געו עם קצה העיפרון בכף ידכם. התחושה שהרגשתם היא למעשה תוצאה של התהליך:
- מגע בעור ← הפעלה של קצות העצבים שמתחת לעור ← שליחה של המידע למוח ← הבנה וחוויה של דקירה קלה בכף היד.
- לא כל האיברים מקבלים את אותה רמת עצבוב! בגב יש פחות עצבוב מאשר באצבע, ולכן החדות (רזולוציה) של התחושה בגב נמוכה יותר. אפשר להדגים זאת:

- מתחלקים לזוגות. תלמיד אחד עוצם עיניים והאחר נוגע בו באצבע אחת או בשתי אצבעות בו-זמנית (אפשר גם לגעת עם עפרונות / עטים במקום עם האצבעות). על התלמיד שעוצם עיניים לומר אם חברו נגע בו באצבע אחת או בשתיים. הדבר קשה יותר במקומות שבהם ההפרדה (רזולוציה) של הקולטנים שרגישים למגע יותר נמוכה, למשל בגב. כשנוגעים באזור הגב בשתי נקודות קרובות זו לזו ובדיוק באותו זמן, קשה לומר שמדובר בשתי אצבעות. זאת למשל לעומת אזור כף היד, שבו ההפרדה טובה יותר ואפשר בקלות להרגיש שמדובר בשתי אצבעות גם אם הן צמודות זו לזו. אפשר לנסות לבדוק בגב עד כמה האצבעות יכולות להתרחק זו מזו ועדיין להרגיש כמו אצבע אחת.



מהי רזולוציה וכיצד היא קשורה לטריק שהדגמנו זה עתה?

רזולוציה = כושר הפרדה, או כושר הבחנה. לוקחים שדה כלשהו ומחלקים אותו לחלקים. למשל בתמונות הבאות, לקחו את אותו גודל וכל פעם חילקו אותו לכמות שונה של חלקים, כך שבכל חלק צבע אחיד: משמאל כל השדה הוא חלק אחד, ולכן לכל התמונה גוון אחיד, שהוא הממוצע (ערבוב) של כל הצבעים שיש בשדה. ככל שמתקדמים ימינה השדה מחולק ליותר ויותר חלקים (4, 25, 100 וכן הלאה). כאשר יש יותר חלקים ההפרדה מתאפשרת בצורה טובה יותר.

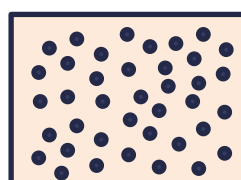
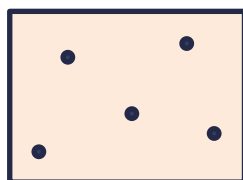


הרזולוציה נובעת מכמות היחידות הנפרדות שהשדה מחולק אליהן. ככל שנחלק את השדה ליותר יחידות נפרדות, כך נוכל להפריד את המידע בצורה טובה יותר, ולהגיע לרמת דיוק גבוהה יותר. זה מה שקרוי "רזולוציה גבוהה".

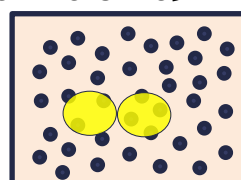
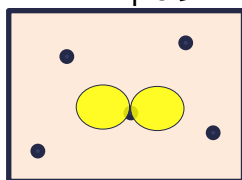
אז איך כל זה קשור לטריק של שלוחות החישה? מתחת לעור פרושים קצוות של עצבים שקולטים מידע. ככל שיש יותר קצוות עצבים, זה מאפשר להפריד טוב יותר בין אזור לאזור על גבי העור. מתחת לעור של כף היד יש המון קצוות עצבים ולכן הקליטה ברזולוציה טובה יותר - לעומת אזור הגב, שם יש פחות קצוות עצבים מתחת לעור והרזולוציה פחות טובה. הדגמה:

עצבים מתחת לעור הגב

עצבים מתחת לעור כף היד



שתי אצבעות שנוגעות בכף היד מכסות עצבים שונים, נפרדים. כושר ההפרדה גבוה ולכן המוח מפרש את שתי האצבעות כשני דברים נפרדים. לעומת זאת, שתי אצבעות שנוגעות בגב מכסות לעתים רק עצב אחד. אין אפשרות להפרדה ולכן המוח עשוי לפרש את שתי נקודות המגע כנקודה אחת.



כעת כדאי לדבר על החשיבות של הפרדה טובה בתחושה באזורים מסוימים לעומת אחרים: בגלל שאנו עושים דברים עדינים מאוד באמצעות כפות הידיים, חשוב לנו לקבל היזון חוזר (פידבק) יותר מדויק. לעומת זאת, בגב עיקר החשיבות של התחושה היא פשוט לדעת שמישהו נוגע בנו, ומשלב שאנו יודעים זאת אנו יכולים להמשיך את ההתמודדות באמצעות אזורי חישה אחרים, רגישים יותר.



• שלוחות תנועתיות:

- כמו סיבי החישה, גם הסיבים האלה פרושים בכל הגוף. הדבר נכון גם לגבי סיבים שמגיעים לקצות הידיים והרגליים, ומשמעות הדבר שבמערכת העצבים יש תאים שאורכם עשרות סנטימטרים ויותר.
קצותיהם מגיעים לשרירים ומשפיעים על כיווצם ועל הרפייתם.
- פגיעה בעמוד השדרה – עצמות עמוד השדרה נשברות וחותרות את סיבי מערכת העצבים. הסיבים ההיקפיים מתקשרים עם עמוד השדרה בגבהים שונים, שמתאימים לגובה שלהם בגוף. לכן כשעמוד השדרה נפגע, הגוף משותק ממיקום הפגיעה ומטה, כלומר מנקודת הפגיעה בעמוד השדרה. בתוך עמוד השדרה יש גם סיבים חישתיים וגם סיבים תנועתיים, ולכן בדרך כלל בפגיעה בעמוד השדרה האדם יאבד גם את יכולתו להרגיש וגם להניע את האיברים שממוקמים (בערך) מתחת למיקום הפגיעה.

מערכת העצבים ההיקפית – תת-המערכת האוטונומית

- מערכת העצבים ההיקפית האוטונומית היא מערכת שחשובה מאוד להישרדות שלנו, עוד מהימים שאבות אבותינו גרו במערות וטיפסו על עצים. מערכת זו מזהה מצבים של סכנה ומכינה אותנו לפעולה.
 - בשפה המקצועית קוראים למצבים כאלה **מצבי fight-or-flight** (הילחם או ברח). כשאנו נתקלים באיום אנחנו יכולים לבחור בדרך פעולה של להתעמת איתו (fight) או לברוח ממנו (flight). שתי ההתנהגויות האלה מצריכות פעילות פיזית של הפעלת הגפיים, חידוד הקלט החושי, הפרשת אדרנלין וחומרים נוספים שמאפשרים לגוף לעסוק בפעילות גופנית מאומצת. יש להזרים דם רב לגפיים, להרחיב את האישונים כדי שהעיניים יקלטו כמה שיותר וכדומה.
 - מי שמפעיל בבת-אחת את כל התגובות הללו שמאפשרות להתמודד עם סכנה, היא מערכת העצבים ההיקפית האוטונומית.
 - ומה לגבי מצבים שבהם אין איום כלל? בהיעדר איום, הגוף מצוי במצב רגיעה. אין צורך לבצע פעילות פיזית מאומצת, לכן אין צורך באספקת חמצן גבוהה לגפיים ובזמן הזה נוח להזרים דם רב למערכת העיכול ולעכל מזון. במצב כזה תת-המערכת האוטונומית מפעילה שרירים שמפעילים תהליכים של מנוחה, למשל שרירים במערכת העיכול (מנוחה היא זמן טוב לאכול ולעכל אוכל, לעומת ריצה, שהיא זמן לא טוב לעשות זאת).

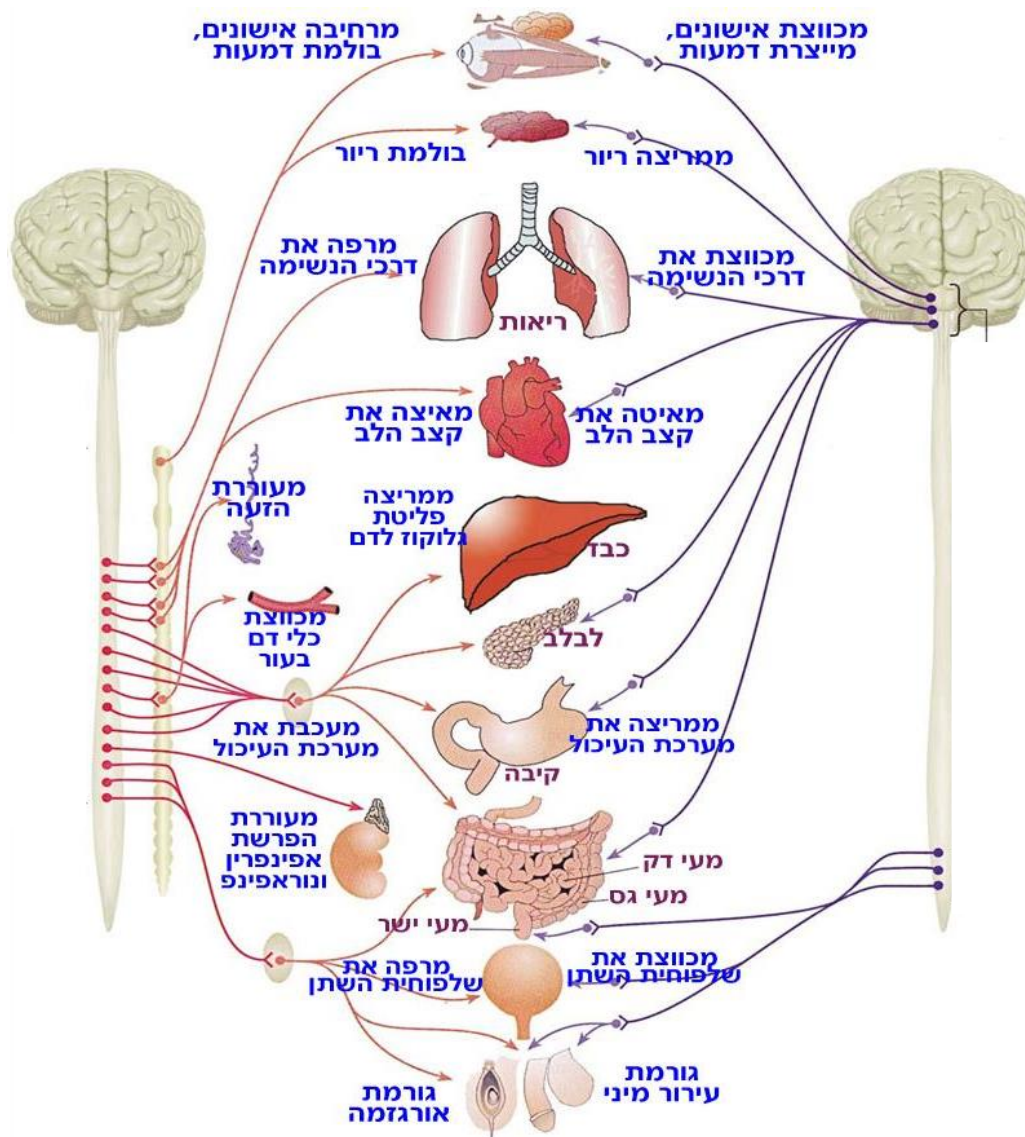
רעיון לפעילות: בתמונה הבאה רואים דוגמאות לאיברים שמופעלים על ידי מערכת העצבים האוטונומית: משמאל בעתות לחץ ומימין במנוחה.

כדאי לתת משימה של כמה דקות שבה כל תלמיד ינסה להסביר את ההיגיון בפעולות המערכת האוטונומית שמוצגות בתמונה, למשל:



- למה זה הגיוני **שבזמן לחץ** המערכת האוטונומית מרחיבה אישונים ובולמת דמעות? כדי שבעת סכנה ייכנס כמה שיותר קלט ראייתי.
- למה זה הגיוני **שבזמן רגיעה** המערכת האוטונומית ממריצה ריור? כי הריר דרוש לעיכול, פעולה המתרחשת בזמן מנוחה (בעת שבורחים לא אוכלים).
- למה זה הגיוני **שבזמן לחץ** המערכת האוטונומית גורמת להרפיית שלפוחית השתן? כי לשתן יש משקל והוא עלול להכביד בשעת בריחה (כל אחד בחייו היה במצב שבו גור מבוהל עשה עליו פיפי... הסיבה היא הפעלה סימפטטית שנבעה מן הבהלה).
- למה **בזמן לחץ** המערכת האוטונומית מרפה את דרכי הנשימה? כי היא פועלת בזמן שבו הגוף צריך לבצע מאמץ, יש צורך בחמצן רב ודרושה כניסת אוויר חופשית ככל האפשר.
- מדוע **בזמן רגיעה** המערכת האוטונומית מאטה את קצב הלב? משום שקצב לב מהיר גובה מן הגוף אנרגיה, ובעת רגיעה אין צורך לבזבז אנרגיה מיותרת.

- מדוע **בזמן לחץ** המערכת האוטונומית ממריצה הפרשת גלוקוז לדם? כי גלוקוז דרוש לתאים לשם הפקת אנרגיה, ובעת מאמץ גופני יש צורך באנרגיה רבה.
- לאחר מכן עורכים דיון והשוואה בין תת-המערכות יחד עם התלמידים – כדאי להדגיש ששתי המערכות לרוב מעצבות את אותם איברים, וגורמות להם השפעה הפוכה.



מתוך: הפיזיולוגיה של ההתנהגות, א. ניל ר' קרלסון, © [2008], האוניברסיטה הפתוחה, כל הזכויות שמורות.

דבר שעלול לבלבל - התלמידים עלולים לחשוב שיש מערכת אחת "רעה ומלחיצה" ומערכת שנייה "טובה ומרגיעה". יש להדגיש ששתי המערכות חיוניות בחיי היום-יום. כמו כן, כיוון שלרוב לא מזדמן לתלמידים לברוח מטורפים, כדאי לתת דוגמאות רלוונטיות כמו לחץ שמתעורר בעת מבחן או דבר שהם יוכלו להזדהות איתו.

הפעלה ודיון בנושא נמצאים בקובץ נפרד (הרכב מערכת העצבים – דיון כיתתי ופעילות בקבוצות).



אנטומיה ודיסקציות	
http://health.yahoo.net/human-body-maps/brain#1/4294967253	אנטומיה – אתר מומלץ לתלמידים
http://www.youtube.com/watch?v=D1zkVBHPh5c	למורים – אנטומיה מפורטת של מוחות הגולגולת.
http://www.youtube.com/watch?v=OMqWRIxo1oQ	למורים – סרטון שבו רואים מוח אמיתי. דיסקציה של המוח (אבל עושה סליים ולא מראה מבנים).
http://www.youtube.com/watch?v=YDA7gGjpPWM	למורים – סרטון שבו רואים גופה בפורמלין שממנה מוציאים את הCNS בדיסקציה (עלול להיחשב כמגעיל והקריין קצת מלחיץ).
המערכת האוטונומית	
http://www.youtube.com/watch?v=m9DCK9ocCok&list=PLXWBPo42YRzYNSNDjoziQBiwjBS9Cvj3q	למורים – המערכת האוטונומית והפרעות שלה – ד"ר קרסו. לא 100% רלוונטי.
http://www.youtube.com/watch?v=25-Tr-fyAz0	ביופידבק – הדגמה
http://davidson.weizmann.ac.il/online/maagarmada/med_and_physiol/%D7%AA%D7%92%D7%95%D7%91%D7%AA-%D7%94%D7%99%D7%9C%D7%97%D7%9D-%D7%90%D7%95-%D7%91%D7%A8%D7%97	תגובת "הילחם או ברח" והמערכת הסימפתטית (ניתן להפעיל כתוביות בעברית).
העשרה – ניתוחי מוח	
http://www.youtube.com/watch?v=BgTFFEJbtTk	הסבר על ניתוח מוח בעירות.
http://www.youtube.com/watch?v=hLBQoKunuHI	הוצאת גידולים מהראש בשיטת אנדוסקופית.

הרכב מערכת העצבים – דיון כיתתי ופעילות בקבוצות



מטרות התרגיל:

- להמחיש לתלמידים שכל דבר שהם עושים/חושבים/מרגישים מערב את מערכת העצבים.
- להדגיש את החשיבות של רכיבי מערכת העצבים להישרדות.
- ליצור סקרנות להמשך הלימוד במגמה, תוך אֶזכור של נושאים שיידונו בהמשך.

הנחיות:

- יינתנו תיאורי מקרה מן החיים והתלמידים יסבירו את כל קשת התגובות במושגים של תגובות מערכת העצבים.
- את המקרה הראשון יש לפענח בדיון כיתתי בהנחיית המורה.
 - המורה יעלה לדיון את המהלכים החשובים, אם התלמידים לא יצינו אותם.
 - יש לשים דגש על הפעילות המקבילה והמשותפת של הרכיבים השונים של מערכת העצבים, ושיתוף הפעולה עם שאר רקמות הגוף.
 - כשעולה נושא שנכלל בתכנית הלימודים (רפלקס/קשב/מערכת הראייה) יש לציין ש"נלמד זאת בהמשך", כדי ליצור עניין וסקרנות, ולחשוף את התלמידים לסוגיות שונות שנכללות בתחום מדעי המוח.
- תחרות בין קבוצות – על כל קבוצה לספק עבור כל מקרה תיאור של כמה שיותר שלבי פעולה של מערכת העצבים.
 - בכל תור יוצג מקרה אחד.
 - יוקצב זמן לפתרון קבוצתי.
 - הפתרונות יוצגו בכיתה, והמורה ידגיש מהלכים חשובים שלא צוינו.

הרכב מערכת העצבים – מקרה א'

"בדרכי לשיעור גיטרה עברתי בגינה הציבורית. פתאום הבחנתי ביצור ארוך ודק מתפתל על האדמה למרגלות השיח ממש על ידי. מיד קפאתי במקום, עיני נפערו ולבי החל להלום בחוזקה. כשריכזתי את מבטי ביצור המפותל על הקרקע, גיליתי לשמחתי שזהו בסך הכול חבל מרוט שמישהו השליך... חייכתי לעצמי בהקלה, התכופפתי להרים את החבל והשלכתי אותו לפח הקרוב."

תשובה למורה:

תיאור התהליכים במונחים של מערכת העצבים:

- העין העבירה למערכת המרכזית מידע לגבי יצור ארוך ומפותל על הרצפה.
- הענף הסימפטי של המערכת האוטונומית נכנס מיד לפעולה והכין את הגוף למצב חירום: פתיחת העיניים = הגברת הקלט, רתיעה = זהירות מסכנה פוטנציאלית.
- תוך כדי כך, המערכת המרכזית המשיכה לעבד את הגירוי הוויזואלי והבינה שאין סכנה.
- המערכת הסימפטיקה הפסיקה את פעילותה ובמקומה החלה המערכת הפרא-סימפטיקה להכניס את הגוף למצב רגיעה.
- כעת עלתה מחשבה בחלקים הגבוהים של המערכת המרכזית, על כך שזה לא בסדר שהחבל זרוק כך, והתקבלה החלטה להרימו.
- מסר נשלח למערכת הפריפריאלית הרצונית, וזו הפעילה את שרירי הגוף להתכופפות ושלחה את היד כלפי החבל.
- [עכשיו אפשר להתחיל להיכנס לפרטים שממחישים לתלמידים את מהות המערכת והיקף השליטה שלה על כל מה שהגוף מבצע]: המערכת הפריפריאלית שלחה מידע למרכזית לגבי מנח הגוף בזמן ההתכופפות, והמרכזית עשתה בקרה על שיווי המשקל. העין מסרה למערכת המרכזית שהיד עומדת להגיע אל החבל, והמרכזית שלחה תגובה להאט את התנועה כלפי מטה ולאחוז בחבל... ואין לזה סוף, אפשר "לשחק" עם זה.

הרכב מערכת העצבים – מקרה ב'

"אתמול בצהרים חיממתי קערת פסטה במיקרוגל. הייתי כל-כך רעב שלא התאפקתי, ומיד כששמעתי את צפצוף שעון העצר של המיקרוגל – פתחתי אותו ושלפתי את הקערה בשתי ידיי. כעבור רגע קט נוכחתי שהקערה חמה מאוד. נעתי במהירות לעבר השולחן, שהיה במרחק צעדים ספורים, אבל לא הייתי בטוח אם אוכל להחזיק מעמד כשהקערה הלוהטת בין ידיי. ברגע האחרון כמעט שמטתי את הקערה ארצה בניגוד לרצוני, אך למזלי הצלחתי להניחה על השולחן. בעת האכילה, חשבתי לעצמי כמה טוב שהקערה הגיעה למקומה בשלום ואני יכול לאכול את הפסטה – במקום לנקות אותה מן הרצפה..."

תשובה למורה:

תיאור התהליכים במונחים של מערכת העצבים:

- תחושת הרעב.
- שמיעת הצפצוף – קלט שמיעתי וקבלת החלטה לפעול.
- תחושת חום בנוירונים הסנסוריים הפריפריאליים מגיעה לשני מקומות:
 - לחוט השדרה – הפעלת רפלקס רתיעה (שיוביל לשמיטת הקערה באופן לא רצוני) – נלמד על רפלקס בהמשך.
 - לאזורים גבוהים במוח – הבנה שמוטב שהקערה לא תיפול, ודיכוי הדחף לשמוט אותה, השפעה רצונית על שרירי הידיים.
- פעולת האכילה – הפעלה מוטורית עדינה לצורך שימוש בסכ"ם, תיאום עין-יד, הפעלת שרירי לעיסה. כדאי לציין שהנוירונים שמגיעים אל הפנים שייכים למערכת העצבים הפריפריאלית, אף על פי שהם קרובים למוח – יש שם נוירונים סנסוריים ומוטוריים רגילים, כמו בגפיים.
- מחשבה, דמיון.

הרכב מערכת העצבים – מקרה ג'

"בניגוד לכל שאר הבנות בלהקת המחול, אני אוהבת להופיע בשורה הראשונה – הדבר גורם לי התרגשות נוראה, אני מצליחה להתרכז בריקוד ובטוחה שאכשל לעיני כולם. סיפרתי על כך לליאור, חברתי הסולנית, והיא סיפרה לי שגם היא מתרגשת מאוד, אבל שהיא חיה בשביל ההתרגשות הזאת..." – שאלה: מה קורה לדוברת כשהיא נדרשת לרקוד בשורה הראשונה, ומה קורה לליאור חברתה?

תשובה למורה:

תיאור התהליכים במונחים של מערכת העצבים:

- אצל שתי הבנות יש הפעלה סימפטטית, שמאפיינת את ההתרגשות מן ההופעה בשורה הראשונה.
 - אצל הדוברת הפעילות הסימפטטית החזקה גוברת על היכולת להתרכז, ובמקביל אזורים גבוהים במוח מעלים תכנים לא נעימים של כישלון.
 - אצל חברתה הפעילות הסימפטטית גורמת לתחושות נעימות.
- יש הטוענים שאצל אנשים שמכורים לספורט-אקסטרים יש רמה בסיסית נמוכה של פעילות סימפטטית, ולכן הם חשים צורך בריגושים כדי להפעיל אותה בעוצמה. הרמה הבסיסית של פעילות מערכת העצבים שלנו משפיעה על הדברים שאנחנו נהנים/לא נהנים לעשות.
- מקרה זה נועד להדגיש שאין להסביר את תפקודי המערכת במונחים של "טוב"/"רע", כלומר פעילות סימפטטית אינה "טובה"/"רעה", אלא פשוט תהליך שקורה. מה שלאחד נחשב פרס לאחר נחשב עונש. אפשר לנסות לתת עוד מקרים (שמיעת מוזיקה בזמן הכנת שיעורי בית, צניחה חופשית, מדיטציה...).

תאים ותקשורת במערכת העצבים

מטרות

- התלמידים יתארו את מבנה תא העצב (הנוירון) ואת תפקידי רכיביו השונים: דנדריטים, אקסון, כפתורים סופיים.
- התלמידים יתארו תיאור מתומצת של מנגנון העברת המידע בתא העצב.
- התלמידים ילמדו על בעיות תפקודיות הנגרמות עקב כשלים בתקשורת במערכת העצבים: מחלת ניוון שרירים, שימוש בסמים.

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית + למידה עצמית מקוונת

משך הזמן: שעה

הערכה: בוחן (כניסה מתוך אתר האינטרנט, בנפרד מהפעילות המקוונת).

השיעור מכיל פתיחה וסיום שנערכים באופן פרונטלי במליאה, והחלק המרכזי של השיעור ניתן להעברה כפעילות מקוונת לעבודה עצמאית, או במרכז במליאה.



מהו תא?

טקסט קצר + סרטון לתלמידים:

http://davidson.weizmann.ac.il/online/maagarmada/life_sci/%D7%A8%D7%A0%D7%AA-%D7%94%D7%AA%D7%90-%D7%95%D7%93%D7%95%D7%A4%D7%9F-%D7%94%D7%AA%D7%90



בשלב זה יש להפנות את התלמידים לפעילות המקוונת באתר. מסמך עם מתווה מפורט של הפעילות נמצא באתר.



לאחר הפעילות המקוונת – המשך במליאה:



בעיות בתקשורת מערכת העצבים גורמות להפרעות בתפקוד

ראינו שבאמצעות תקשורת בין נוירונים מתאפשרת זרימה של מידע במערכת העצבים. התפקוד של המערכת תלוי בזרימת המידע הזו, ועל כך נלמד בהרחבה במהלך השנה. מה קורה כאשר התקשורת נפגעת? נתייחס כעת לשני סוגים של מצבים שבהם תקשורת מערכת העצבים מופרעת: מצב של מחלה שמתפתחת בגוף ומצב של שיבוש בתקשורת עקב נטילת חומרים מסוכנים.

(1) **ALS, מחלת ניוון שרירים** – מחלה שבה נפגעת התקשורת בין נוירונים של מערכת העצבים ההיקפית עם השרירים, מה שמוביל לקושי לבצע תנועה ולבסוף ניוון של השריר.

לקריאה נוספת: <http://israls.org.il/%D7%9E%D7%94%D7%99-%D7%9E%D7%97%D7%9C%D7%AA-als/>



מומלץ להראות בכיתה את הסרטון הבא:

https://www.youtube.com/watch?v=JNZcC_3YLuo

(2) **שימוש בסמים** – כדי לתפקד, מערכת העצבים צריכה לקיים תקשורת ערה בין הנוירונים לבין תאי המטרה שלהם. כמו שלמדנו, התקשורת הזו מתרחשת בסינפסה, שם משתחרר **חומר כימי** מהנוירון הקדם-סינפטי ומשפיע על תא המטרה. חשבו מה יקרה אם נחזיר באופן מלאכותי חומר כימי לסינפסות ברחבי המוח... תאי מטרה יפעלו באופן עצמאי. זוהי פעולתם של תרופות וסמים שמשפיעים על מערכת העצבים. נטילת סמים שגורמים להזיות או לשינוי במצב הרוח, היא למעשה החדרה מלאכותית של חומרים כימיים לסינפסות, אשר משנה באופן בלתי מבוקר את התקשורת במוח ואת התפקוד שלו. השינויים הכימיים יכולים להישאר לאורך זמן ואף לגרום לנזק בלתי הפיך לתפקודים מוחיים.

השפעת סם מסוג קוקאין על הרכב וכמות החומרים בסינפסה. זוהי הדמיה, בהתחלה רואים מצב נורמלי וצריך לחוץ מימין למטה Add cocaine ורואים את האפקט: <http://www.thirteen.org/closetohome/animation/coca-anim-main.html>

התנסות מקוונת: "מסיבת עכברים". כנסו לאנימציה וגלו מה קורה במוח כשמשתמשים בסמים. <http://learn.genetics.utah.edu/content/addiction/mouse>



באנימציה זו מוצגים עכברי מעבדה שמשמשים למחקר בתחום המוח. ייתכן שיהיו תלמידים שיחשו חוסר נוחות לגבי שימוש בחיות לצורכי מעבדה. כדאי לתת מקום לתחושות הללו, וניתן לקיים דיון במידת הצורך. חשוב להדגיש שמדענים רבים אכן עושים שימוש בחיות מעבדה כדי לקדם את המדע, אבל כל שימוש כזה נעשה תחת הנחיות קפדניות וכללי בטיחות וכבוד שהוגדרו על ידי ועדה בינלאומית (ועדת הלסינקי). מעבר לכך, הסרטון מציג יחס מזלזל יחסית כלפי החיות, שאינו מאפיין את הפרקטיקה במעבדות אמיתיות.

לסקרנים – במעבדות בהן חוקרים השפעה של סמים אכן יש חיות שמשמשות בסמים (קוקאין, הרואין, אלכוהול וכו'). המחקר הזה חשוב כי הוא מלמד אותנו על ההשפעות ההרסניות שיש לסמים הללו על המוח ועל הגוף בכלל.



מערכת העצבים המרכזית – מוחות הגולגולת

מטרות ידע

- התלמידים יבינו שמוח הגולגולת אינו איבר אחד, אלא שהוא מכיל מבנים שונים בעלי תפקידים ייחודיים.

מטרות מיומנות

- התלמידים יתנסו בעבודת חקר עצמאית ובקבוצה.
- התלמידים יציגו את תוצר עבודתם בכיתה.

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית + עבודה בקבוצות (חלק בבית) + הצגה בכיתה

משך הזמן: שעה הקנייה כיתתית + שעה הצגת מטלה בכיתה

הערכה: פעילות חקר להצגה בכיתה

הערות לקראת השיעור: במהלך השיעור נעשה שימוש באפליקציית הדמיה. יש להדפיס מראש מתוך האתר דף לכל צמד תלמידים, וכמו כן כדאי שהתלמידים יורידו מראש את האפליקציה. **פירוט בגוף המערכ.**



מושגים

המיספרות, קורטקס, אונות המוח, תלמוס, חדרי המוח

חומר קריאה חיצוני

קרלסון נ', הפיזיולוגיה של ההתנהגות כרך א', מהדורה 9, האוניברסיטה הפתוחה, פרק 3 (מבנה מערכת העצבים).

מוח הגולגולת

במבט חיצוני על המוח השלם, נראה שמבנהו די אחיד:

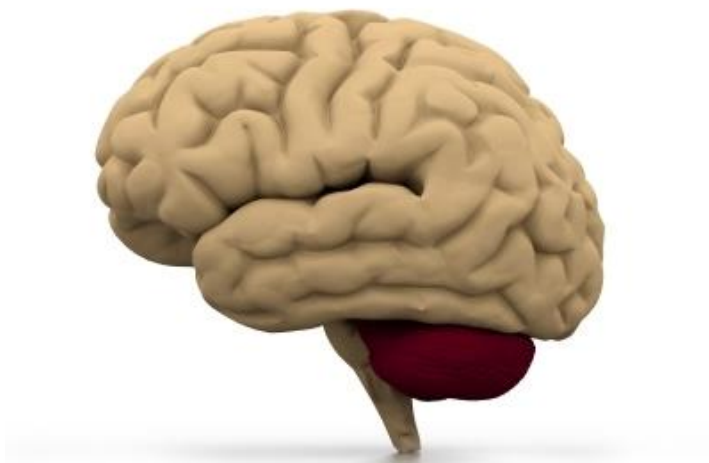
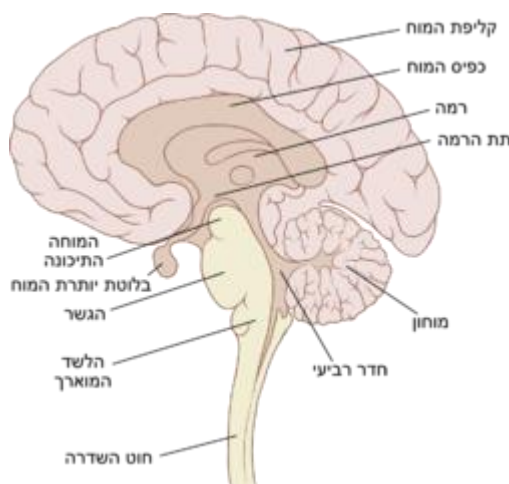


Image courtesy of ddpavumba / FreeDigitalPhotos.net.

זהו מבט צידי על מוח ש"מסתכל" שמאלה. ניתן לראות את המוחון בחלק הגבי למטה (אדום) וכן את חלקו העליון של חוט השדרה.



אך בחתך אמצעי של המוח נוכל להבחין במבנים שונים ומגוונים:



Author: Patrick.lynch, some rights reserved by CC-BY

זהו בדיוק אותו מנח כמו בתמונה הקודמת, אבל הפעם ההמיספרה השמאלית (הקרובה אל הקורא) הוסרה, ורואים את החלק הפנימי של ההמיספרה הימנית.



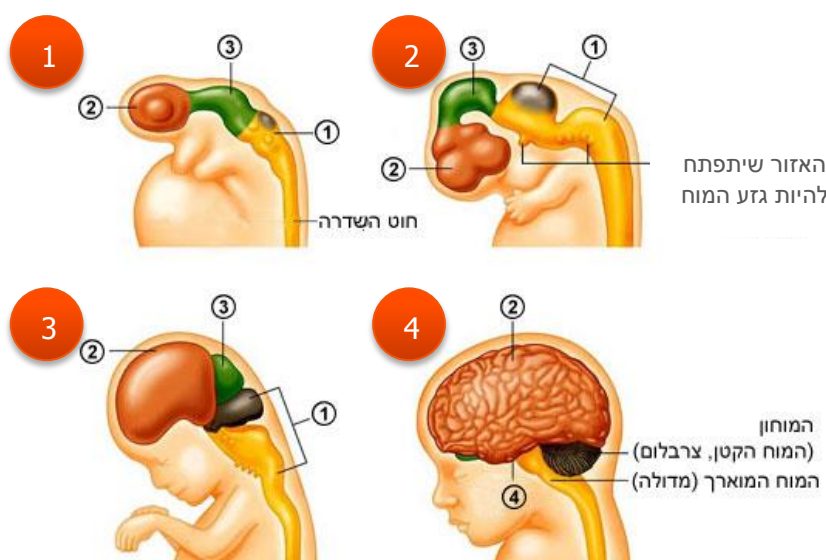


למורה - כשמדברים על חתכים חשוב להמחיש בפנטומימה לאורך ציר נעשה חתך. כמו כן יש לציין תמיד לאן "מביט" המוח (באיור הזה החתך הולך במקביל לאף, בין העיניים ואחורה. המבט הוא כלפי שמאל).

ההתפתחות העוברית של מערכת העצבים – על קצה המזלג

כדי שנוכל להבין טוב יותר מניין הגיעו כל המבנים הללו, נתבונן רגע קל בהתפתחות העוברית של מערכת העצבים.

הנה עובר בשלבי התפתחות שונים במהלך ההיריון. מערכת העצבים מתחילה להתפתח בשלב מוקדם מאוד של חיי העובר. כל החלקים הצבעוניים בתמונות הם רכיבים של מערכת העצבים המרכזית. הם מתפתחים בשלבים שונים של ההיריון, ולכל אחד תצורה שונה ותפקידים משלו.



Source: "Educating Educators About ABI: Resource Binder", Ontario Brain Injury Association



חידת היגיון: מוחו של עובר בן 3 חודשים נראה חלק, ואילו מוחו של ודך נראה מפותל מאוד. מהיכן הגיעו הפיתולים?

תשובה: צינור העצבים ממשיך לגדול ולהתעבות. בשלב מסוים הגדילה הזאת מוגבלת על-ידי עצמות הגולגולת. כשהמוח ממשיך לגדול כנגד הגולגולת, הוא נדחס ונוצרים פיתולים. הפיתולים האלה אינם אקראיים, והמבנה שלהם דומה באופן יחסי בין אדם לאדם.



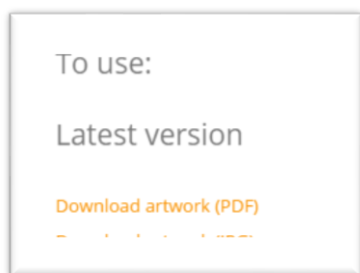
עבודה בזוגות – מציאות רבודה (AR): מבנים שונים במוח הגולגולת.

בפעילות זו התלמידים יתנסו באפליקציית מובייל (טלפון חכם / טאבלט) המציגה את המוח והגולגולת בטכנולוגיית מציאות רבודה (Augmented Reality). מלבד ההנאה שבשימוש באפליקצייה, יוכלו התלמידים לראות את מבנה המוח מבפנים ומבחוץ, ואף לנסות לזהות את האיברים השונים.

להלן סרטון הדגמה כיצד האפליקציה עובדת: <https://youtu.be/vasq7h3lcbU>

הנחיות:

- יש להוריד מראש לטלפון החכם את האפליקציה The brain AR app (חפשו בחנות האפליקציות, ניתן להורדה בחינם).
- יש להדפיס דף אחד עבור כל צמד תלמידים, מתוך האתר: <http://www.harmony.co.uk/portfolio/brainapp>. על מנת להוריד את העמוד להדפסה יש לגלול למטה וללחוץ על אחד הקישורים (מומלץ להוריד כ-PDF):



- יש להציב את הדף שהדפסתם על שולחן חלק, להפעיל את האפליקצייה ולכוון את המצלמה אל השולחן עם הדף. בזווית המתאימה יופיע הראש מעל הדף.
- עודדו את התלמידים להתנסות בפונקציות השונות של האפליקצייה:
 - לחיצה על האפשרויות השונות שבתחתית המסך – מעבר בין מצבים שונים;
 - לחיצה על הראש במצבים שונים – תגרום לפתיחה / סגירה של הגולגולת או המוח;
 - לחיצה על חלק מסוים של המוח – תגרום לקבלת מידע (באנגלית) אודות אותו החלק.
- שימו לב כי ניתן להסתובב סביב ה"ראש" כדי להביט בו מכיוונים שונים. כמו כן ניתן להתקרב ולהתרחק ממנו כדי להגדיל ולהקטין את התמונה.

הפעלה ודין בנושא נמצאים בקובץ נפרד (הרכב מערכת העצבים – דין כיתתי ופעילות בקבוצות).



במסגרת הפעילות, כל קבוצה תציג אזור מוחי מתוך הרשימה. ההצגה תימשך כמה דקות ותכלול מידע לגבי:

1. מיקום האזור (תמונה).
2. תפקוד או התמחות של האזור.
3. מה קורה כשהאזור נפגע.
4. מידע מעניין נוסף לבחירתכם.

הערה חשובה ביותר לתלמידים לקראת חיפוש המידע באינטרנט: תחום מדעי המוח פורח מאוד בשנים האחרונות, ויש אתרים רבים שמבקשים להציע מידע פופולרי לקהל הרחב. חשוב להביא בחשבון שהרוב המכריע של האתרים האלה לוקה באי דיוקים במקרה הטוב ובשקרים עזים במקרה הרע. ובאשר לוויקיפדיה – מכיוון שהאתר ערוך בידי המשתמשים, אין להסתמך על הכתוב בו כמקור יחיד.



כיצד מאתרים מידע בדרך נכונה?

1. מחפשים באתרים של מוסדות מוכרים (כגון אוניברסיטה), שחתומים עליהם אנשים בעלי תארים מתקדמים (ואפילו חיפוש כזה אין בו די, ולכן כדאי להסתמך על הצלבת מידע מכמה אתרים).
2. במקרים של סתירה או ספק מתייעצים עם מומחה. לצורך ההתייעצות אפשר להיעזר באתר עמותת בשער: <http://www.bashaar.org.il>, שם מפנים שאלות למומחים מן האקדמיה ונענים בפורום.

3. גם אנשי המקצוע חלוקים בעמדותיהם בנושאים רבים בתחום חקר המוח, ולכן הקורא הישר צריך לשמור על רמה סבירה של ספק וביקורתיות כשהוא נעזר במקורות מידע. הנה שתי דוגמאות המבהירות מתי נחוצים ספק וביקורת:

- דוגמה קיצונית ומעולם תוכן אחר – בגרמניה של ראשית המאה ה-20, התיאוריה המדעית של תורת הגזע שימשה לחיזוק טיעונים אנטישמיים. העניין הבעייתי: ייתכן שבאופן אובייקטיבי אפשר לחלק את בני האדם לגזעים, ואולי אפילו אפשר להיעזר לשם כך בתכונות כמו אורך האף. אבל ההסקה המוטת והמסוכנת היא שעצם החלוקה לגזעים מתירה עליונות של גזע אחד על פני אחר. זו טענה שאינה מדעית, אלא פוליטית.
- דוגמה מעולם חקר המוח: במשך שנים רבות טענו משום שלנשים יש מוח קטן יותר, הן אינן מתאימות ללימודים גבוהים. כמובן שלנשים יש בממוצע מוח קטן יותר מאשר לגברים, אבל זה משום שכל הגוף שלהן בממוצע קטן יותר(!). כיום ידוע שנשים יכולות להצטיין בלימודים גבוהים, וברור שטענת גודל המוח שימשה בעבר כלי פוליטי להדרת נשים ולא כטענה מדעית גרידא.

לסיכום – ראינו שהמדע עשוי לקדם עמדות פוליטיות או חברתיות מסוימות. בבואנו לדלות מידע על מבנה המוח ופעולותיו, חשוב לבדוק שהדברים אינם משמשים את הדוברים לחיזוק טיעונים שיש בהם אפליה מגדרית או חברתית או פוליטית וכולי. כצרכנים אחראיים של מידע, עלינו להיות ביקורתיים ולבחון את מה שמנסים לספר לנו על המוח, כדי שלא להיסחף למסקנות מסוכנות ולא ראיות, שאין זה מעניינו של המדע להסיק.

ייתכן שלכם ההסבר הזה נהיר וברור מאליו, אך חשוב לזכור ש"הילדים-של-היום" נולדו לתוך שטף אדיר של מידע, שבו הגבולות בין דעה לעובדה מטושטשים, ולכן חשוב לעמוד איתם על

העקרונות הללו – במיוחד כאשר אנו שולחים אותם לחפש מידע ברשת בנושא כה רגיש להטיות כמו חקר המוח.

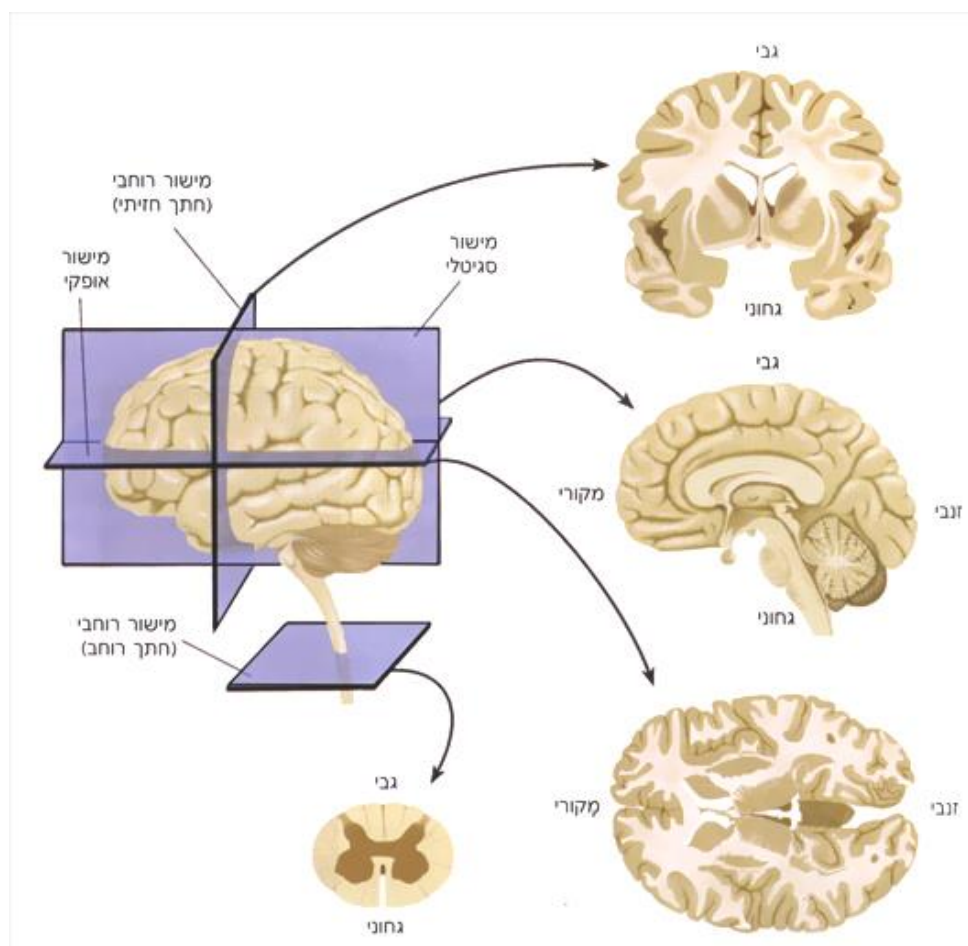
רשימת האזורים במוח לבחירה:

- **אזור ברוקה** – אזור קורטיקלי בהמיספרה השמאלית שאחראי להפקת שפה. אפאזיית ברוקה – בעיה בהפקת שפה (דיבור או כתיבה). [לקריאה נוספת](#).
- **גרעיני הבסיס** (basal ganglia) – מערכת חיונית לביצוע פעולות אוטומטיות.
- **המערכת הלימבית** – מערכת עיבוד רגשות. [לקריאה נוספת](#).
- **היפוקמפוס** – קידוד זכרון לטווח ארוך, [הנבדק המפורסם HM](#). ניווט, [ניסוי נהגי המוניות בלונדון](#).
- **אונת המוח הקדם-מצחית** (prefrontal cortex) – החלק הקדמי של האונה המצחית. עיבוד גבוה ורכיבים אישיותיים, המקרה של [פינאס גיג'י](#). [לקריאה נוספת](#).
- **אזור זיהוי פרצופים** – עיבוד מתקדם של מידע ראייתי. פרוסופאגנוזיה, אי יכולת לזהות פנים של אנשים מוכרים. [לקריאה נוספת](#), [ועוד](#).
- **החומר השחור** (substantia nigra) – אזור במוח האמצעי שחיוני לוויסות תנועה. מכיל נוירונים שמפרישים דופמין. מוות של הנוירונים האלה גורם למחלת [הפרקינסון](#).
- **גזע המוח** – תפקודים בסיסיים ואוטומטיים. [בדיקת מוות מוחי](#) באנשים ללא הכרה. [לקריאה נוספת](#).
- כדאי לאפשר הצגת אזור אחר במוח, לפי מה שמעניין את התלמידים, בתיאום מראש עם המורה.



נספח למורה: חתכי מוח

באיורים ובהדגמות מקובל לחתוך את המוח באחד מ-3 צירים:



מתוך: הפיזיולוגיה של ההתנהגות, א. ניל ר' קרלסון © [2008] האוניברסיטה הפתוחה, כל הזכויות שמורות.

- **חתך סגיטלי (Sagittal)** – חתך העובר מלפנים לאחור ומחלק את המוח לחלק ימני ולחלק שמאלי (לא בהכרח שווים). החתך הסגיטלי שעובר בדיוק במרכז המוח עובר בין שתי ההמיספרות וחושף את האספקט האמצעי של הקורטקס.
 - **חתך אופקי (Horizontal)** – חתך המחלק את המוח לקבלת חלק עליון וחלק תחתון.
 - **חתך חזיתי (Coronal)** – חתך המחלק לקבלת חלק קדמי וחלק אחורי.
- הדרך הכי טובה להעביר את המידע הזה לתלמידים היא כשבכל פעם שמופיעה תמונה של המוח תדגומו בפנטומימה כיצד בוצע החתך. עם הזמן המידע יחלחל.

לקריאה נוספת:

- אתר של אוניברסיטת הרווארד, עם הדמיות MRI של מוחות שלמים. המשתמש יכול להגדיר אזור ספציפי וסוג הדמיית MRI ולהתרשם מתמונות הדמיה ב-3 צירי חתך שונים.

<http://www.med.harvard.edu/AANLIB/cases/caseNA/pb9.htm>



עבודת חקר בקבוצות – מוחות הגולגולת

גודל הקבוצה: 2-3 תלמידים

בחרו אזור במוח מתוך הרשימה המצורפת בהמשך.

1. חפשו מידע על האזור הזה ברשת האינטרנט. הקפידו להשתמש במקורות מידע מהימנים ומבוססים על מחקרים (כדוגמת אתרים אקדמיים). **הצליבו מידע בין כמה מקורות מידע.** אפשר להתייעץ עם מומחים באתר "[בשער](#)" אם נמצאה סתירה לכאורה בין מקורות המידע. תוכלו גם להיעזר [בקישור הזה](#) כדי להעריך את המידע מרשת האינטרנט.

2. הכינו מצגת קצרה (5-6 שקופיות) שתכלול את המידע הזה:
 - א. מיקום האזור ביחס למבנים אחרים בגולגולת (אפשר להיעזר בתמונות).
 - ב. תפקוד או התמחות של האזור.
 - ג. מה קורה כשהאזור נפגע (מהי הפגיעה, מהם התסמינים, האם יש השפעה על אזורים אחרים במוח ו/או בגוף).
 - ד. ידע מעניין נוסף לבחירתכם.
 - ה. מקורות מידע שהשתמשתם בהם.
 - ו. השקופית האחרונה תכלול 4-5 שאלות (רצוי שאלות רבות ברירה או משפטי נכון / לא נכון) כדי לבדוק את הבנת הנושא על ידי יתר התלמידים.
 - ז. אפשרות: להכין קטע יצירתי לסיכום החקר – חמשי, קריקטורה, קומיקס, סרטון, דגם פשוט, בוחן קצר לכיתה (עם הומור) או כל רעיון אחר שיעזור לזכור את החומר הנלמד.
4. כל קבוצה תציג את הממצאים במשך כ-5 דקות ותענה על שאלות התלמידים בכיתה.

רשימת האזורים לבחירה:

האזור	כדאי להתייחס
1 אזור ברוקה	• פול ברוקה
2 גרעיני הבסיס (basal ganglia)	• עמוק בתוך המוח
3 המערכת הלימבית	• המערכת הלימבית • פחד, הבעות פנים והשקד שבפנים
4 היפוקמפוס	• ניסוי נהגי המוניות בלונדון
5 אונת המוח הקדם-מצחית (prefrontal cortex)	• המקרה של פיניאס ג'ייג' • ממצאים חדשים על מוחו של אינשטיין
6 החומר השחור (substantia nigra)	• פרקינסון
7 גזע המוח	• גזע המוח • מוות מוחי – קביעת המוות לפי מות המוח • מוות מוחי
8 אזור זיהוי פרצופים	• פרוספאגנוזיה: המחלה שמקשה לזהות פנים מוכרות • "הפיסבוק המוחי"
9 אזור אחר על פי בחירתכם - באישור המורה	

לזוז בלי לחשוב



מערכת התנועה

מבוא לתנועה וקשת הרפלקס

מטרות

- התלמידים יכירו את האופן שבו שרירי השלד גורמים לתנועה בפקודת מערכת העצבים.
- התלמידים יעמיקו את ההבנה של קשת הרפלקס.
- התלמידים יתנסו ברפלקסים שונים.
- התלמידים ייחשפו להקבלה בין מערכת רפלקס ביולוגית ומערכת הנדסית, המתפקדות כמערכות בקרה.

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית

משך הזמן המוקצה: שעה

מבוא

מרבית הפעולות היומיומיות שאנו מבצעים מצריכות תנועה של איברי גוף: כדי ללכת יש להניע את הרגליים, כדי לאחוז יש להניע את היד, כדי לדבר יש להניע את השפתיים והלשון, ועוד. כפי שלמדנו בפרק הקודם, הגורם האחראי לתנועות שאנו מבצעים הוא מערכת העצבים המרכזית. כיצד שולטת מערכת זו על האופן שבו אנו מניעים את גופנו? על כך נלמד בפרק הנוכחי.

שלד, שרירים ועצבים

תנועה של איבר מותנית בכיווץ של שרירים.

גוף האדם בנוי משלד, אליו מחוברים שרירים.

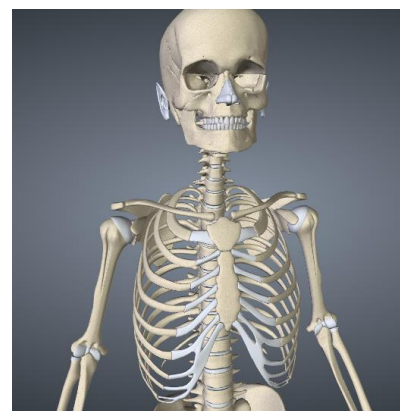


כדאי להדגים באמצעות האפליקציה האינטרנטית ביו-דיגיטל:

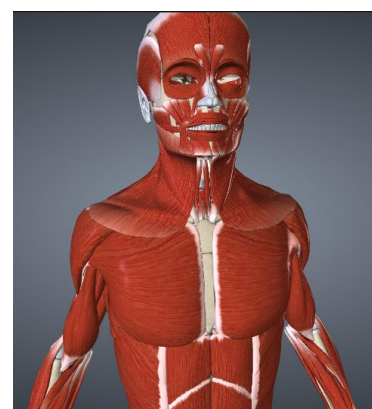
<https://human.biodigital.com/index.html> (יש להיכנס באתר לפני השימוש. ניתן להורדה גם כאפליקציה במכשירים ניידים).

תמונות מתוך האפליקציה עם העקרונות שחשוב להדגים:

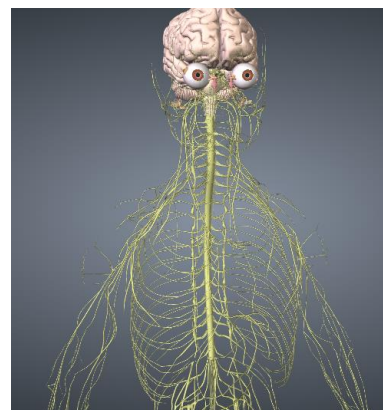
- הגוף בנוי על בסיס שלד:



- את השלד עוטפים שרירים:



- בין השלד והשרירים שזורים העצבים:



בעזרת האפליקציה ניתן לטעון את השלושה יחד, או שילובים שלהם (משמאל). כמו כן ניתן להטות את הגוף בזוויות שונות.

כאשר השרירים מתכווצים, הם מושכים איתם את העצם, וכך מתקבלת תנועה של איבר בגוף.



רטונים קצרים של דימות רנטגן המראים מפרקים שונים בזמן תנועה:

<http://www.iflscience.com/health-and-medicine/amazing-x-ray-gifs-show-joints-motion>



רטון שמדגים אילו שרירים פועלים בזמן הליכה. בכל העת השרירים המכווצים מסומנים באדום.

<https://www.youtube.com/watch?v=6ObNnCTV6MY>

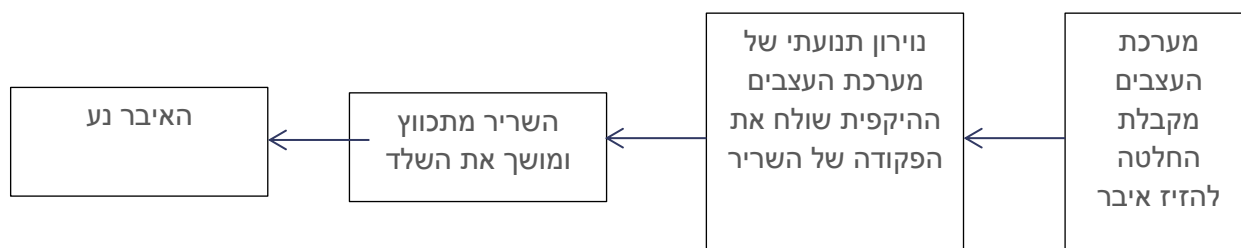


הדגמה לצורך המחשה של פרישת השרירים בגוף ושליטתם בתנועה: פשוט את ידכם לפנים והניחו את האמה על השולחן כאשר גב היד מופנה כלפי מטה. כעת הרימו את האמה כלפי מעלה והתבוננו בזרוע. האם תוכלו לומר איזה שריר התכווץ על מנת להרים את האמה? **[תשובה: השריר הקדמי של הזרוע]**. כעת נסו להניע חלקים שונים ביד ולזהות אילו שרירים מתכווצים לצורך תנועתם. **(הערה למורה: אם התלמידים מתלהבים אפשר לעודד אותם להזיז איברים נוספים, למשל את הגבות, השפתיים, הקרסול וכו').**

השריר מתכווץ בפקודת מערכת העצבים המרכזית

כיצד מערכת העצבים מעורבת בתנועת השרירים?

בסמוך לשלד ולשרירים פרושים עצבים (מערכת העצבים ההיקפית). לאחר שהתקבלה החלטה להזיז איבר כלשהו, הפקודה עוברת ממערכת העצבים המרכזית להיקפית. נירון תנועתי של המערכת ההיקפית שולח את הפקודה אל השרירים הרלוונטיים, והם מתכווצים וגורמים לתנועה.



רפלקסים – מקרה פשוט של תנועה

כדי להבין כיצד מערכת העצבים מעורבת בתנועת השרירים, נתייחס למקרה פשוט של תנועה שנקרא רפלקס.

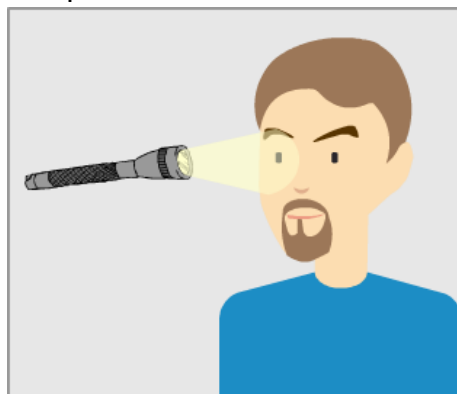
רפלקס (בעברית: "היגב" או "החזר") = תגובה מיידית ולא רצונית של הגוף לגירוי. (ויקיפדיה).



התנסות ברפלקסים

למורה: עודדו את התלמידים להתנסות בזהירות במגוון רפלקסים (דוגמאות מטה), ולתאר את קשת הרפלקס ככל יכולתם.

- רפלקס פיקת הברך שהודגם עד כה. שימו לב שלצורך כך "נבדק" צריך לשבת על שולחן כשרגלי אינה נוגעת בריצפה. **אין צורך** להכות בחוזקה, אם הרפלקס לא עובד יש לנסות להכות בעדינות בזוויות שונות.
- רפלקס העפעף – תלמיד 1 פוקח את עינו ותלמיד 2 נושף לכיוונה בזהירות. העפעף נסגר מיד.
- רפלקס כיווץ האישון – תלמיד 1 עוצם את עינו ומכסה אותן למשך 2 דקות (לצורך הרחבת האישון). לאחר מכן הוא פוקח, ותלמיד 2 מאיר על פניו בעזרת פנס. האישון מתכווץ מיד.





הערת בטיחות: חל איסור להשתמש בצייני לייזר להתנסות זו, שכן הם עלולים להזיק

לראייה! ניתן להשתמש בפנס רגיל.



- התנסות רפלקס הסרגל – מצגת מצורפת בנפרד. הוראות: תלמיד 1 מחזיק את הסרגל מעל ידו של תלמיד 2 (תלמיד 2 מתכוון לתפוס אותו ברגע שייעזב, כשידו ממוקמת בהתחלה בדיוק בקו ה-0 ס"מ). בלי להתריע, תלמיד 1 עוזב את הסרגל, ותלמיד 2 צריך לתפוס אותו באמצעות שתי אצבעות. בודקים כמה ס"מ עבר הסרגל, ולפי זה מחשבים את זמן התגובה (הרצונית!) של תלמיד 2. את הזמן הזה אפשר להשוות לזמן תגובה של רפלקס (שאמור להיות קצר יותר).

זמן התגובה של רפלקס פיקת הברך = 50 מילי שניות לערך.
היעזרו בטבלה הבאה לבדיקת מרחקי התגובה שהתלמידים מודדים אחת לשני, והמרתם לזמני תגובה.
האם הזמנים של התגובה הרצונית (סגירת האצבעות על הסרגל) ארוכים או קצרים יותר מזמן התגובה של הרפלקס?

המרחק שנמדד	זמן התגובה
2 in (~5 cm)	0.10 sec (100 ms)
4 in (~10 cm)	0.14 sec (140 ms)
6 in (~15 cm)	0.17 sec (170 ms)
8 in (~20 cm)	0.20 sec (200 ms)
10 in (~25.5 cm)	0.23 sec (230 ms)
12 in (~30.5 cm)	0.25 sec (250 ms)
17 in (~43 cm)	0.30 sec (300 ms)
24 in (~61 cm)	0.35 sec (350 ms)
31 in (~79 cm)	0.40 sec (400 ms)
39 in (~99 cm)	0.45 sec (450 ms)
48 in (~123 cm)	0.50 sec (500 ms)
69 in (~175 cm)	0.60 sec (600 ms)

הרחבה – השוואה למערכת הנדסית

בקה בגופנו ובקרה הנדסית

ניתן לחשוב על תהליך הרפלקס בגוף כעל תהליך של **מעגל בקרה** - תהליך המערב מערכת שליטה הכוללת משוב עצמי. כאשר ממערכת החישה נכנס אות חזק דיו, הוא מפעיל את המערכת הפעלה מוטורית. נציג מערכת הנדסית שתדגים את תהליך פעולתו של "רפלקס" כמערכת בקרה ממוחשבת. לשם כך נציג תחילה את **רפלקס המתיחה**.
מתוך ויקיפדיה:

רפלקס המתיחה הוא תגובה של השריר להתארכות פתאומית ובלתי צפויה. מתיחה כזו של השריר מאריכה את סיבי השריר עד סף המתיחה. מתיחה מעבר לכך יוצרת רפלקס מתיחה שמתנגד להארכת יתר וגורם לשריר להתכווץ. זהו מנגנון הגנה של השרירים מפני הפעלה של כוח גדול העשוי לגרום לקריעה בשריר.

מתיחה מהירה של השריר גורמת לדחפים עצביים לנוע בסיבים התחושתיים, להפעיל דרך הסינפסה את הנוירונים התנועתיים, אלו שולחים דחפים עצביים דרך סיביהם אל השריר וגורמים לכיווצו הרפלקסיבי המיידי וכן לכיווצם של שרירים נוספים שתומכים בתנועה. עם כיווצו של השריר הגורם לקיצורו, נפסק הגירוי של הכישור ומסתיימת התגובה הדינמית. לאחר מכן משמרת התגובה הסטטית את השריר באורכו המקורי.

רפלקס המתיחה משמש לשמירת השרירים באורכם כנגד כוחות חיצוניים. לדוגמה, שרירי היציבה הפועלים נגד הכבידה וכך משמרים את היציבה. אפשר לזהות את הרפלקס במקרה היומיומי של אחיזת ספל שנוזל נמזג לתוכו, מסת הנוזל מגבירה את המנוף המופעל על המרפק ושואפת ליישר את המרפק, בתגובה לישור המרפק המהיר רפלקס המתיחה מגביר את פעולת השרירים הכופפים של המרפק וישורו של המרפק מתבטל בעזרת פעולת השרירים.

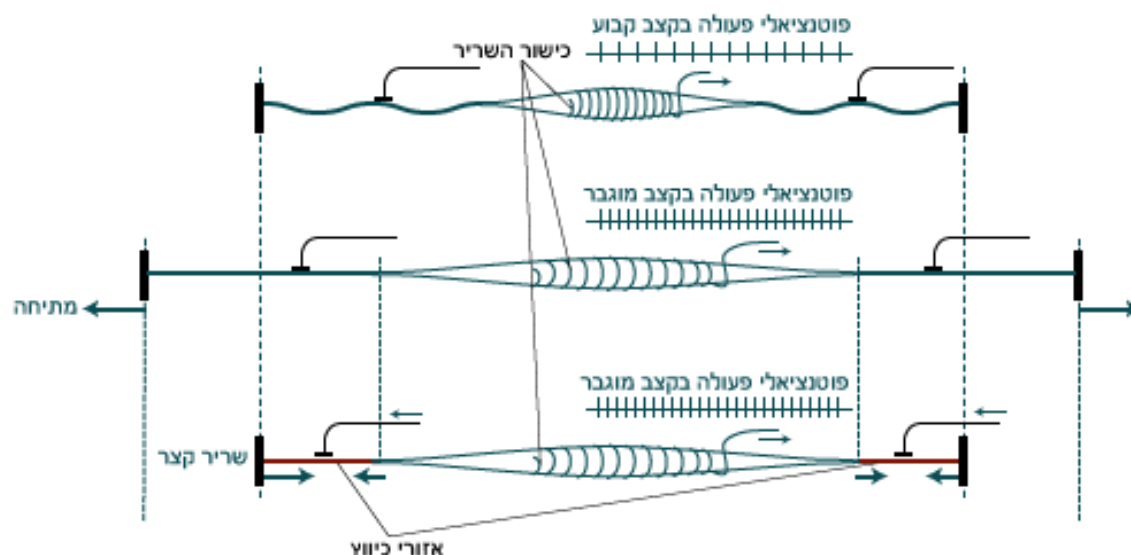
רפלקס המתיחה הוא גם מקור לכשל של כוח מתפרץ. אם המתח המופעל על השריר גדול מערך סף מסויים (שהוא למעשה המתח הגדול ביותר שהשריר חווה, או משהו דומה לזה) השריר ייתכווץ וייתרפה מיד. התחושה היא שמנסים לעשות את התנועה, ושום דבר לא קורה. במקרה כזה, יש לנוח עד להתאוששות שכן הרפלקס דורש זמן ל"טעינה", וללא הרפלקס הזה, שמהווה כאמור מנגנון הגנה, השריר נמצא במצב של סכנת קריעה חמורה.



עוד על רפלקס המתיחה:

http://wiki.imga.org.il/index.php?title=%D7%A8%D7%A4%D7%9C%D7%A7%D7%A1_%D7%9E%D7%AA%D7%99%D7%97%D7%94

מתח השרירים שלנו נמצא כל העת תחת תהליך בקרה: משוב עצמי וויסות מתמיד ע"י מערכת שליטה. השליטה על אורך השריר מושגת באמצעות קולטנים הנמצאים בעומק השריר ומרגישים כל הזמן את מידת המתיחה שלו. לקולטן כזה קוראים **כישור השריר** (ראו איור).



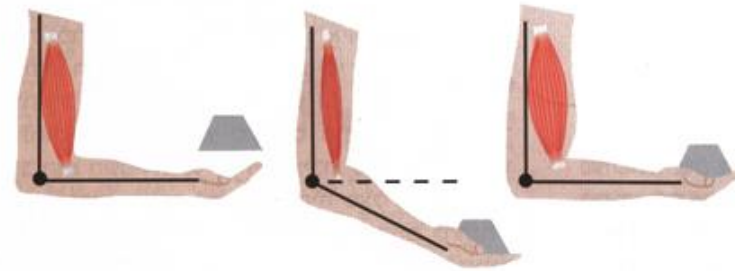
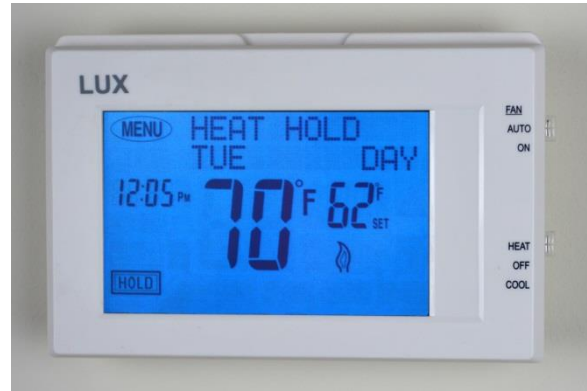
כישור השריר מלוכף סביב סיב שריר עמוק.

כל שהשריר יותר מתוח, כך הקולטן חש יותר במתיחה, וגורם לנוירונים התחושתיים לשלוח יותר אותות למערכת העצבים המרכזית. במצב ההפוך כאשר השריר מכווץ, הנוירונים התחושתיים ישלחו פחות פוטנציאלי פעולה.

מערכת העצבים המרכזית מנטרת את כמות האותות שנשלחים אליה מכישור השריר. אם נשלחים מעט מאוד אותות, מערכת העצבים המרכזית מסיקה שהשריר מכווץ בצורה מוגזמת ומסוכנת, והרפלקס גורם למתיחה מיידית שלו. אם לעומת זאת נשלחים יותר מידי אותות, זה מורה למערכת העצבים המרכזית שהשריר מתוח בצורה מוגזמת ומסוכנת, והרפלקס פועל ומכווץ את השריר.

באופן זה, הקולטן מאזן למעשה את פעולתו של השריר.

פעולה זו דומה לפעולתו של תרמוסטט. תרמוסטט הוא מכשיר שמנטר כל העת את הטמפרטורה סביבו ומגיב בהתאם בחימום/קירור על-מנת לשמר את הטמפרטורה בטווח מסוים המוגדר מראש. בדוגמה הביולוגית שהצגנו האלמנט שנשמר מאוזן היה **מתח השריר**, ואילו בדוגמה ההנדסית של התרמוסטט האלמנט שנשמר מאוזן הוא **הטמפרטורה**.



בתרמוסטט, המערכת פועלת אמנם באופן אוטומטי, ב"מעגל סגור" ללא שליטה חיצונית, אבל קביעת הטמפרטורה הרצויה מתבצעת באופן חיצוני, על-ידי כיוונון ידני – ובהתאם לה מתבצעת העבודה האוטומטית של המערכת.

באותו אופן, גם המערכת הפיזיולוגית של קשת הרפלקס פועלת באופן אוטומטי וסגור, אך פעולתה מתבססת על מעורבות חיצונית של המוח, אשר קובע את אורך השריר הרצוי. המוח מחליט באיזו זווית אנו רוצים לשמור את היד ולפי זה מכונן את קשת הרפלקס לשמור את השרירים באורך הרצוי.

קשת הרפלקס

מטרות

- התלמידים יכירו תפקיד ואופן הביצוע של בדיקת רפלקס פיקת הברך
- התלמידים יתארו את מסלול העברת המידע בקשת הרפלקס

דרך ההוראה: למידה עצמית מקוונת (כניסה לפעילות מתוך אתר האינטרנט). מומלץ כשיעורי בית אחרי שיעור "מבוא לתנועה וקשת הרפלקס", או כלמידה משותפת במליאה אחרי שיעור זה (במידה ויש שיעור כפול).

משך הזמן: שעה

הערכה: בוחן (כניסה מתוך אתר האינטרנט, בנפרד מהפעילות המקוונת)

מסמך עם מתווה מפורט של הפעילות המקוונת נמצא באתר.



במידה ומעבירים את הפעילות המקוונת במליאה, ניתן להפנות לתלמידים את השאלה הבאה:

אם בדיקת קשת הרפלקס (למשל בדיקת רפלקס פיקת הברך, באמצעות פטיש מיוחד) מצליחה, ניתן ללמוד שכל ארבעת התהליכים שמנינו מעלה התרחשו כשורה. מה ניתן ללמוד אם הבדיקה לא מצליחה?

תשובה: ניתן ללמוד שלפחות אחד מהתהליכים פגוע, אך בדיקת קשת הרפלקס בעצמה לא מאפשרת לנו לדעת איזה. לשם כך יש צורך בבדיקות נוספות. אי-הצלחה של הבדיקה יכולה לנבוע ממגוון סיבות: בעיה בהולכת האות החשמלי לאורך אחד הנוירונים, בעיה כימית בתקשורת בין אחד הנוירונים לתא המטרה שלו, בעיה בקולטני החישה שנמצאים בקצה הנוירון החישי, בעיה בעיבוד במערכת העצבים המרכזית, ועוד.

מעבר האות העצבי

המסמך מחולק לשני פרקים עיקריים – "פוטנציאל פעולה" ו"סינפסה כימית". כמה מן התכנים הכרחיים לתלמידים, וכמה מהם בגדר העשרה והרחבת היריעה.



במקומות שונים במסמך משובצות הפניות לסרטוני אנימציה העשויים לסייע למורים בהסבר התופעות והתהליכים הנלמדים. כדי להיכנס לסרטוני האנימציה, יש להוריד ולהתקין את התוכנה של האוניברסיטה הפתוחה שנמצאת בפרק זה באתר. חלק מהסרטונים מחולקים למספר חלקים – התייחסות למספר החלק הדרוש נמצאת בהפניה לכל סרטון, בגוף מסמך זה.

מטרות

- התלמידים יתארו את מבנה הנירון ואת תפקודו.
- התלמידים ישוו בין אות חשמלי בתוך הנירון לאות כימי בין נירון לתא מטרה.
- התלמידים יגדירו מהו פוטנציאל פעולה ויסבירו את פעולתו בסינפסה עצב-שריר.

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית

משך הזמן המוקצה: 2 שעות

מושגים

נירון, אקסון, דנדריטים, כפתורים סופיים, פוטנציאל פעולה, סינפסה, נירון קדם סינפטי, נירון בטר סינפטי, המרווח הסינפטי, קולטן.

מבוא

כיצד מידע מקודד, וכיצד מידע עובר, במערכת העצבים?

מערכת העצבים שלנו כל הזמן קולטת מידע מהסביבה ושולחת פקודות שמייצרות התנהגות בהתאם, לדוגמה: אם הגוף קולט בחושיו טמפרטורה גבוהה הוא מגיב בהפרשת זיעה המסייעת לשמירת טמפרטורת הגוף. אם אור מסנוור נקלט במערכת הראייה שלנו, יתרחשו תגובות של מצמוץ, הקטנת האישונים, ואולי הרמת היד להגן על העין. אם ריח של מאכל מזין נקלט באפינו, אולי הגוף שלנו "ירצה" לקדם עצמו אל עבר המאכל, ולהכין את הפה לאכילה באמצעות הפרשת רוק מבלוטות מתאימות בחלל הפה. ואם דמות אהובה תיקלט במערכת החושים, "ירצה" אולי הגוף לומר לה שלום ולגשת לחבקה.

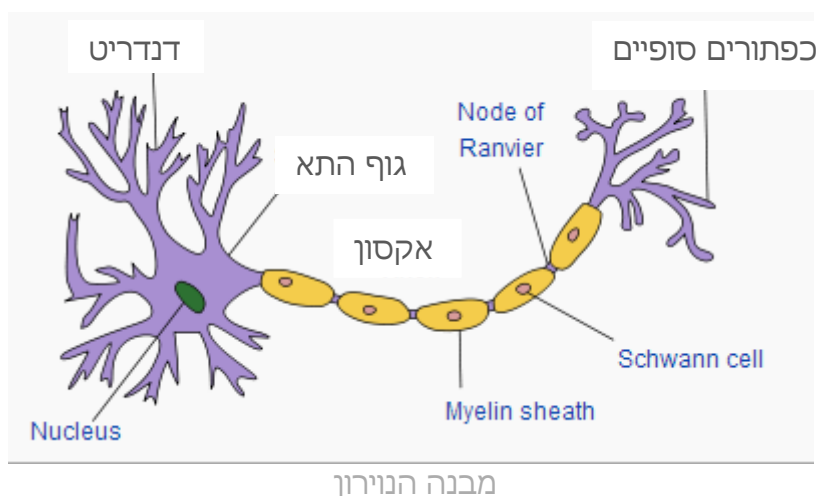
חשוב להדגיש: כשאנחנו מדברים על התנהגות, אנחנו מדברים על קשת רחבה מאוד של פעולות. החל מהזעה, שהיא התנהגות אוטומטית שמבוססת על שיקולים פיזיולוגיים גרידא, ועד קידום עצמי לעבר מקור מזון (הליכה למטבח) או התחמקות ממצב מביך או נסיעה לבקר את סבתא, שהן התנהגויות מורכבות שמבוססות על מערך שיקולים רחב, גם אם לא לגמרי מודע. לכן חשוב לציין כאן בפני התלמידים שהמוח מייצר את כל ההתנהגויות הללו, והוא עושה זאת באמצעות **מעבר אות עצבי** (זהו נושא השיעור).



מערכת העצבים כל הזמן קולטת ומוסרת מידע. אם כך, כיצד מקודד המידע הזה? כיצד הוא מועבר לאזורים אחרים במערכת העצבים? כיצד מגיע המידע לשרירים האחראים לתגובות שהגוף מבצע?

כדי להבין את העברת המידע במערכת העצבים, ניזכר ממה היא מורכבת – תאים!

במוח יש **כל מיני** סוגים של תאים, ואנו מתמקדים בתאים מסוג מסוים – ניורונים. ניורונים מהווים כ-10% מתאי המוח, אבל נכון להיום הם התאים הכי נחקרים וידוע שיש להם תפקיד מרכזי בהעברת מידע.



מבנה הניורון

Picture source: Wikipedia - <http://en.wikipedia.org/wiki/Neuron>

Author: [Quasar Jarosz](#), some rights reserved by CC BY-SA

לנירון יש אקסון שמתפקד כמו חוט חשמלי. מכאן שהעברת המידע לאורך האקסון היא העברה של זרם חשמלי.

אנלוגיה: נניח שאנו רוצים להדליק נורה. כיצד נעביר לנורה את המידע על כך? במילים אחרות, כיצד נגרום לנורה "לדעת" שאנו מעוניינים שתילדק? לשם כך אנו צריכים "לדבר בשפה של הנורה", שהיא שפה של זרמים חשמליים: אנו לוחצים על מתג, והדבר מוביל לסגירת מעגל חשמלי ולזרימת זרם חשמלי בחוטי החשמל שעוברים בתוך הקירות עד הנורה, כך שהיא נדלקת. הזרם הוא "המידע" – אם יש זרם הנורה דולקת, ואם אין זרם היא נותרת כבויה. הלחיצה שלנו על המתג גרמה להעברה של מידע, וכאשר המידע הגיע ליעדו הנורה נדלקה.

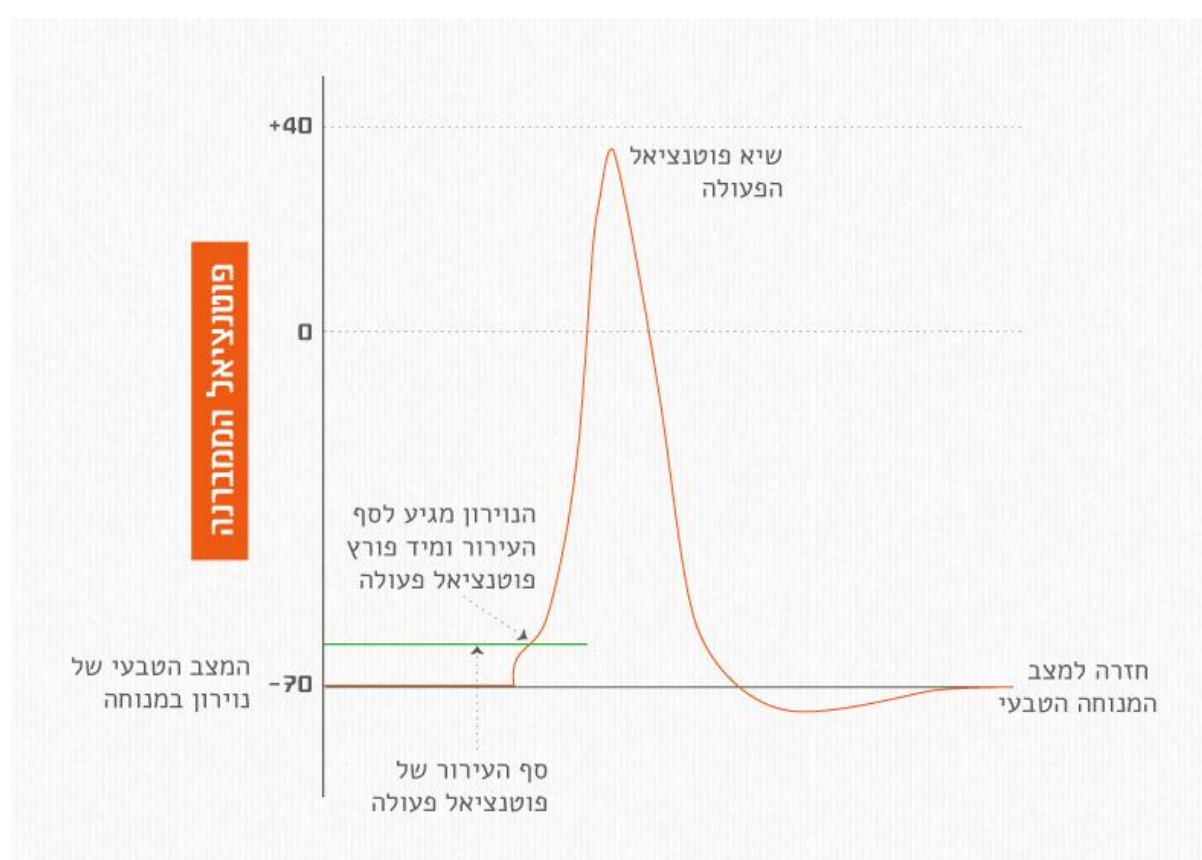
המוח עובד בצורה דומה – אם מגיע זרם חשמלי למקום מסוים, הוא יגרום להפעלה שלו, והתוצאה תהיה תפקוד מוחי.

פוטנציאל פעולה

החשמל הזורם לאורך הנירון גורם להפעלה של המוח, ולכן קוראים לו **פוטנציאל פעולה** (פוטנציאל במובן זה היא מילה הלוקחה מתחום החשמל).

פוטנציאל פעולה הוא אירוע **חד ומהיר**, כמו הבזק. הוא עובר תמיד בכיוון אחד: מגוף התא אל עבר קצה האקסון.

ניתן לתאר את ההתפתחות והדעיכה של פוטנציאל הפעולה באמצעות גרף:



משום שהתלמידים אינם מנוסים בקריאת גרפים, כדאי להתעכב על קריאת הצירים והדגמה של מספר נקודות לאורך הגרף.



ציר ה-X מתאר זמן. ציר ה-Y מתאר תכונה חשמלית של התא (שלא נתאר אותה לעומק בכיתה, אבל בעקרון היא מתארת את הפוטנציאל החשמלי, המתח על גבי קרום התא). כשתכונה זו ברמה גבוהה פירוש הדבר שעובר זרם חשמלי (הסבר פשוט מאוד).

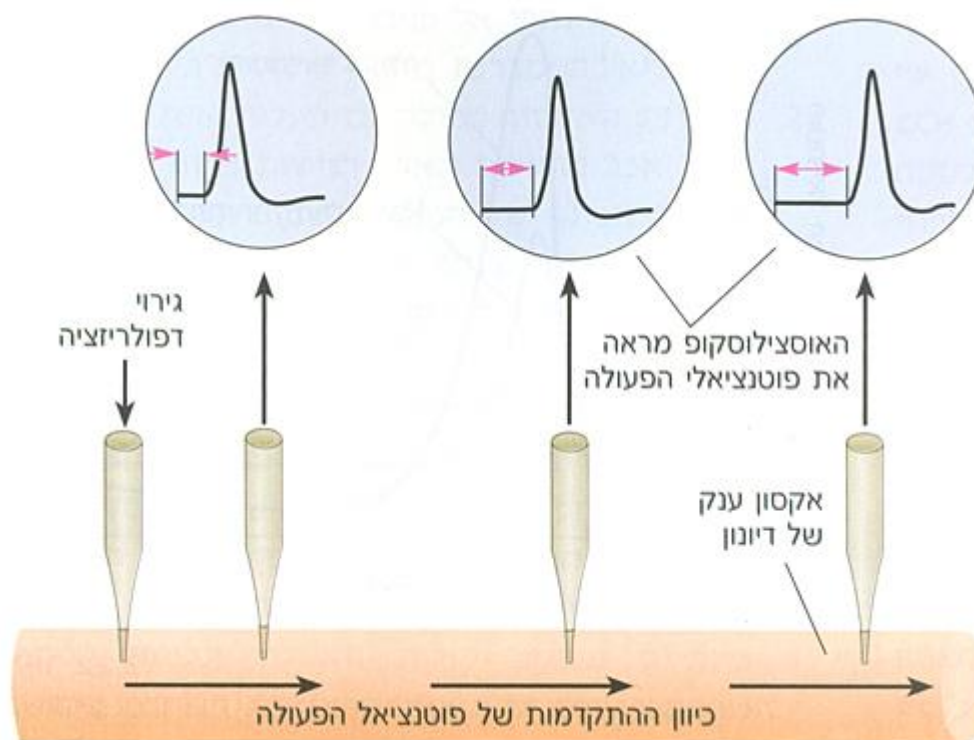
פירוש הגרף: ניתן לראות כיצד פוטנציאל הפעולה מתפתח בהדרגה עד שמגיע לסף העירור, ואז מיד הוא פורץ במהירות רבה. גם הדעיכה מהירה, לכן נאמר שהוא כמו הבזק של חשמל. ציר הזמן המתואר בגרף

מתרחש במציאות בכאלפית-שניה! פוטנציאל פעולה הוא כה מהיר, שנהוג לכנותו "ירי של נירון". כאשר אומרים ש"נירון ירה" מתכוונים שעבר בו חשמל של פוטנציאל פעולה.

פוטנציאל הפעולה המתואר בגרף מתפשט לאורך האקסון של הנירון – וכך האות החשמלי מגיע מגוף התא ועד לכפתורים הסופיים שבקצה האקסון.

[סרטון הולכת פוטנציאל פעולה]

כל פוטנציאל פעולה בנקודה מסוימת על פני האקסון, יגרור אחריו פוטנציאל פעולה בנקודה שבאה אחריו. פוטנציאל פעולה, בכל נקודה על פני האקסון, תמיד יראה באותה הצורה ותמיד יהיה בגודל קבוע. כמו כן, פוטנציאל פעולה לעולם לא ידעך אלא תמיד ימשיך בגודל קבוע עד סוף האקסון – חוק "הכול או לא כלום".



CARLSON, NEIL R., *PHYSIOLOGY OF BEHAVIOR*, 11th, ©2013, pp. 43, 49, 50, 31,174,175,173. Reproduced by permission of Pearson Education, Inc., New York, New York.

סרטוני הדגמה: הפעלה חשמלית חיצונית גורמת לשליטה על התנהגות של בעלי-חיים – לפעמים אפילו לאחר המוות (מצורפים מספר סרטונים, לא חייבים לראות כל סרט עד הסוף, רק עד שמגיעים לפואנטה של הניסוי):



- ניווט ג'וק באמצעות זרמים חשמליים למערכת העצבים עם התקן מיוחד שמופעל ע"י מכשיר סלולרי חכם. הזרמים מפעילים ירי של ניורונים במערכת העצבים וגורמים לג'וק לקבל החלטות לגבי שינוי

כיוון: <https://www.youtube.com/watch?v=y8iaDFwvNfw>

- שליטה על תנועת רגל של ג'וק (שנותקה מהגוף) בעזרת הזרקת זרם חשמלי.

<https://www.youtube.com/watch?v=aQqiOligveM>

- הזזת רגליים של גופת צפרדע בעזרת חשמול נוירונים תנועתיים (האקשן מתחיל אחרי כ-5 דקות)

<https://www.youtube.com/watch?v=sJifWqUa2pY>

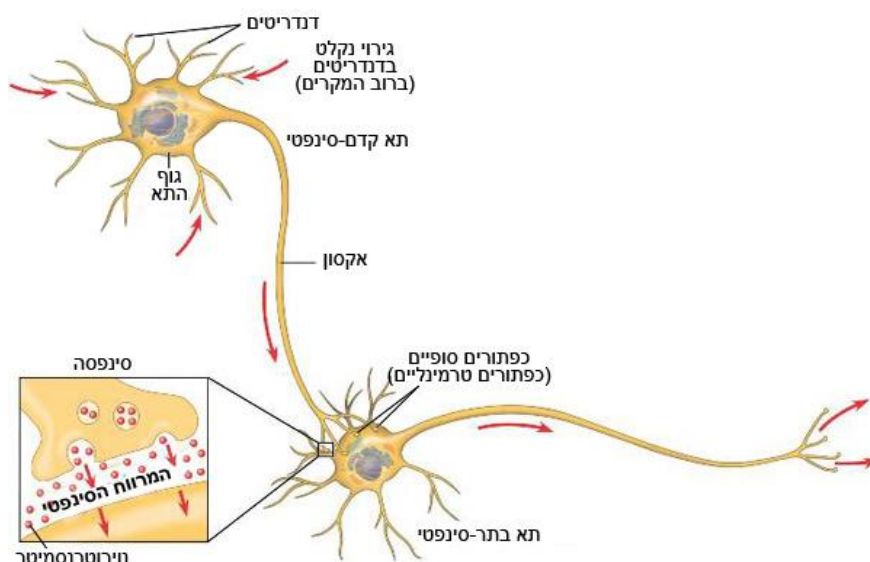
הפעלה של פוטנציאל פעולה

הבנו שהפעלה של המוח מתאפיינת במעבר זרם חשמלי, כמו שזורם במכשיר חשמלי. אבל למוח אין "מתג", אם כן מה מפעיל את הזרם החשמלי שזורם בתוך הנוירון? על הדנדריטים של הנוירון יש **קולטנים**. הקולטנים רגישים לדברים שמפעילים אותם כמו מתג וגורמים ליצירה של זרם בנוירון. ישנם מגוון קולטנים שרגישים לכל מיני דברים:

- לאור (כמו הקולטנים שיש על נוירונים בעין)
- לגלי קול (כמו אלו שנמצאים באוזן הפנימית)
- ללחץ (כמו קולטנים שנמצאים על קצות העצבים מתחת לעור)
- לחומרים כימיים (כמו ברחבי מערכת העצבים).

תקשורת בין נוירונים – מבוא לסינפסה כימית

ניזכר במבנה הנוירון:



נוירונים מעבירים זה לזה מידע בצורה יעילה, משום שלכל נוירון יש קצה אחד עם דנדריטים שעשירים בקולטנים – דרכם הוא מופעל, וקצה שני שממנו משתחררים חומרים כימיים שיכולים להשפיע על הפעלתו של הנוירון הבא.

הסינפסה הכימית

סינפסות הן מקום המפגש בה מתרחשת העברת המידע בין הנוירון לתא המטרה שלו (שיכול להיות נוירון אחר, תא שריר או בלוטה).

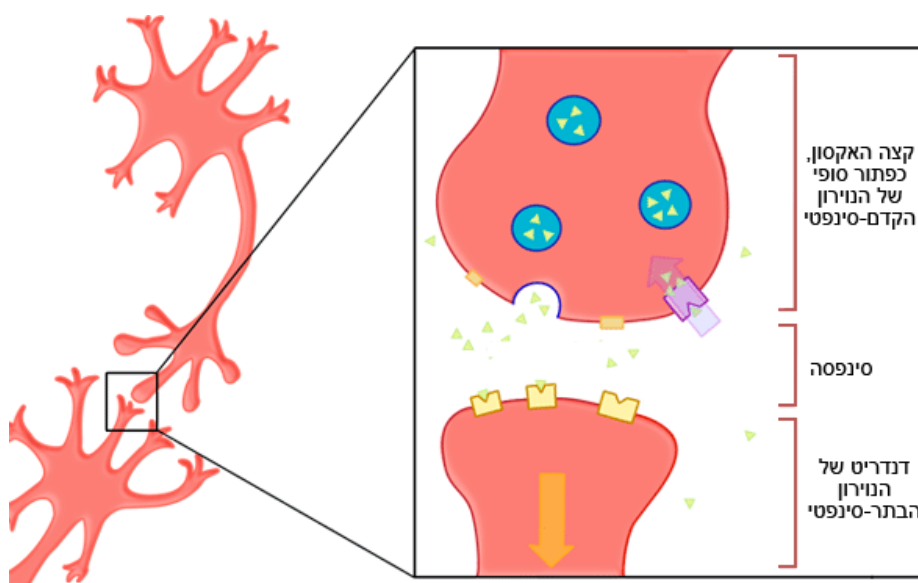
ראוי לציין שיש שני סוגי סינפסות: סינפסה כימית וסינפסה חשמלית. בפרק זה נתמקד בסוג הראשון בלבד של סינפסות – סינפסות כימיות. לקריאה נוספת על סינפסות חשמליות ראו:



http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_synapse

מבנה כללי של סינפסה

הסינפסה הכימית היא מקום מפגשם של קצה אקסון של תא עצב אחד עם תא עצב אחר. מקום מפגש זה יכול להימצא על פני אזורים שונים של תא העצב האחר: גוף התא, הדנדריט או האקסון. בסינפסה הכימית אין מגע ישיר בין הממברנה המצויה בקצה האקסון של תא העצב הראשון (הקדם-סינפטי), לבין הממברנה של תא-העצב השני (הבתר-סינפטי), אלא מתקיים ביניהם מרווח צר הקרוי המרווח הסינפטי. (ראו תרשים).



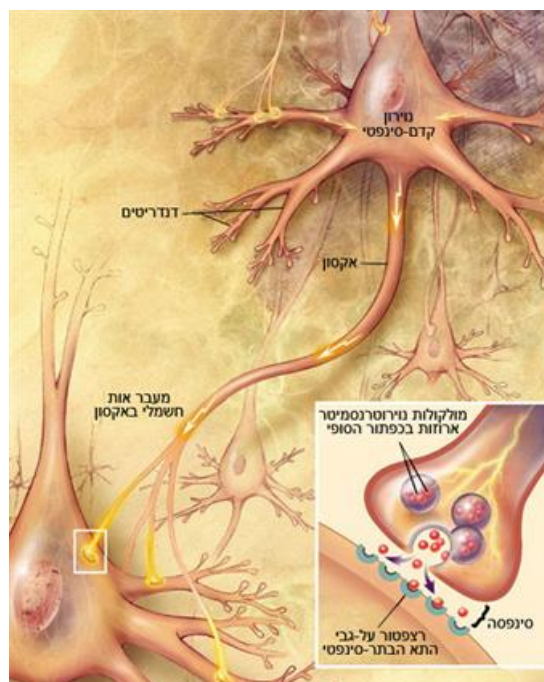
<http://theconnecto.me/2011/08/different-vesicles/> איור 1

משמאל רואים שני נוירונים שמקיימים תקשורת. מימין רואים תקריב של אזור התקשורת: הסינפסה. הנוירון הקדם-סינפטי מפריש חומר כימי, וזה נקלט ע"י התא הבתר-סינפטי ומשפיע על הפעלתו.

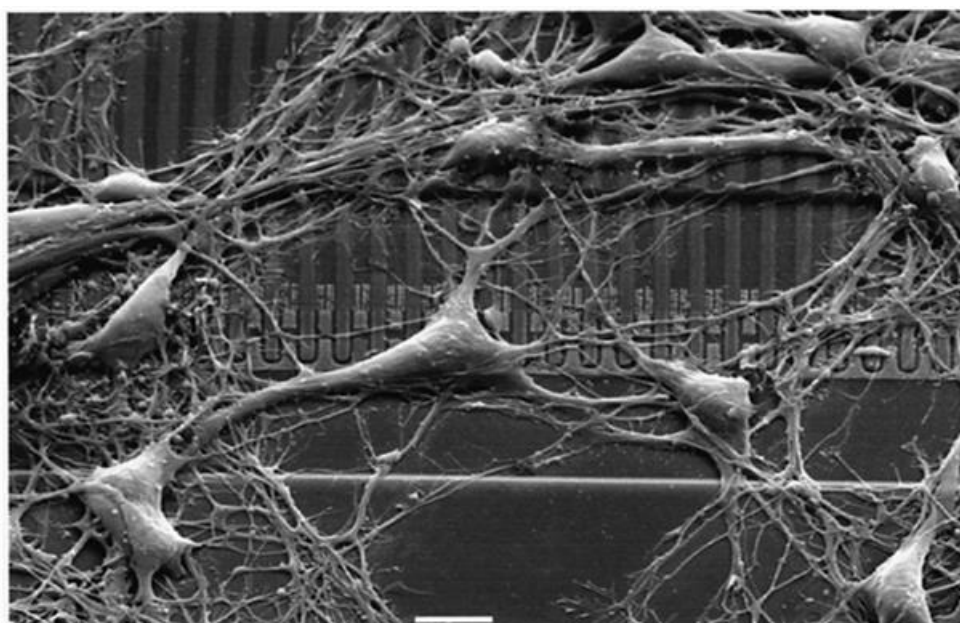
סרטון מסכם (אנגלית עם כתוביות בעברית) [כל מה שנוגע ליונים לא נלמד בשיעור, אפשר להתעלם]: https://www.youtube.com/watch?v=uU_4uA6-zcE



באיור הבא רואים שהנוירון הקדם-סינפטי עושה כמה סינפסות על נוירון המטרה. כמו כן, רואים ברקע עוד נוירונים, וכדאי להדגיש זאת – נוירונים פועלים ברשת, ומקיימים מערך מורכב של סינפסות.



המציאות כמובן מורכבת בהרבה מהמוצג באיור לעיל. הנה תמונה של רשת נוירונים אמיתית שהופקה באמצעות מיקרוסקופ אלקטרוני:



Transistor Probes Local Potassium Conductances in the Adhesion Region of Cultured Rat Hippocampal Neurons, Stefano Vassanelli and Peter Fromherz, The Journal of Neuroscience, August 15, 1999, 19(16):6767-6773

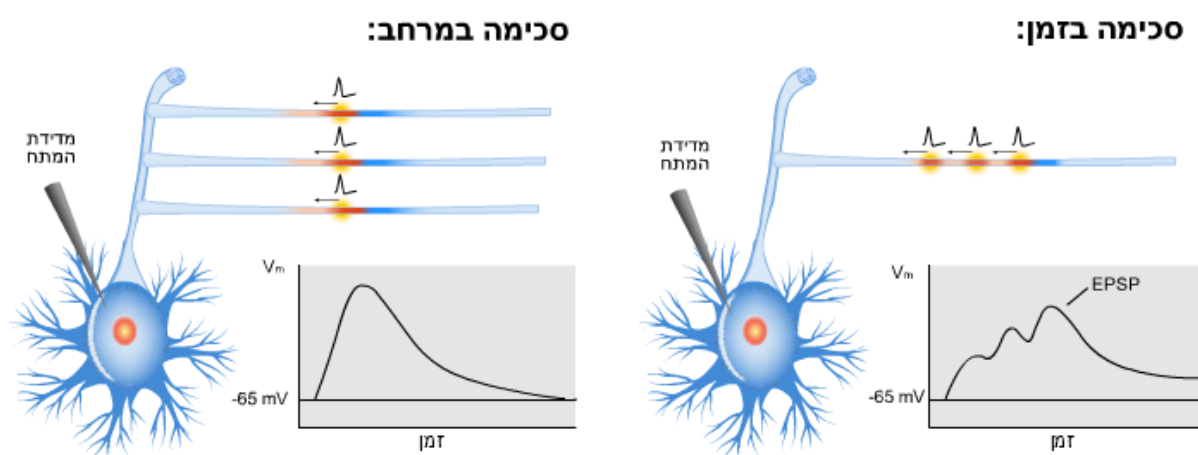
כל נוירון מושפע מהרבה נוירונים אחרים. אם הם ירו, זה ישפיע על הסיכוי שלו לירות גם כן. למעשה כל נוירון מתחשב בירי של כל הנוירונים שמשפיעים עליו, ולפי החישוב הזה מתקבלת החלטה האם לירות ולהעביר את המידע הלאה.

השפעות מעוררות והשפעות מעכבות של סינפסות

כאן חשוב לציין שלא כל הסינפסות מעודדות ירי פוטנציאל פעולה! בחלק מהסינפסות מופרשים חומרים כימיים שמעודדים היווצרות של פוטנציאל פעולה בתא הבתר-סינפטי (סינפסה מעוררת), אבל באחרות מופרשים חומרים כימיים שבולמים את ההיווצרות הזו (סינפסה מעכבת).

הנוירון הבתר-סינפטי מתחשב גם במסרים המעוררים וגם באלו המעכבים. להתחשבות זו במגוון אותות שמגיעים אל הנוירון קוראים **אינטגרציה עצבית**. אינטגרציה = שילוב דברים לכדי דבר אחד שלם, אינטגרציה עצבית = שילוב של מספר אותות עצביים לכדי החלטה סופית של הנוירון האם לירות או לא, כלומר האם להעביר את המידע העצבי הלאה או לבלום אותו. התהליך הזה יקבע אם אכן יתרחש פוטנציאל פעולה באקסון או שהזרם פשוט ידעך עד שייעלם.

כדי שהאינטגרציה העצבית תגרום לעירור שמספיק לירי פוטנציאל פעולה, היא יכולה להתבסס על אחד משני עקרונות – **סכימה במרחב** ו**סכימה בזמן**.



[לומדה סרטון אינטגרציה עצבית 1-5]



אפשר לנסות להבין את העיקרון של אינטגרציה עצבית באמצעות האנלוגיה לכדור המונח למרגלות גבעה:

מנסים להעביר את הכדור על ידי דחיפות רגעיות שלו למעלה, כל הדחיפות באותה עוצמה. אם תדירות הדחיפות נמוכה, הכדור יספיק בכל פעם להתגלגל למטה ולא יעבור את הגבעה; ואילו אם התדירות תהיה גבוהה, הכדור כמעט לא יספיק להתגלגל בחזרה ולבסוף יעבור את הגבעה. לחלופין, האנלוגיה לסכימה במרחב היא ששלושה אנשים דוחפים את הכדור יחד, כך שסכום הדחיפות (הכוחות...) מספיק להעברת הכדור אל הגבעה.



הצעה לפעילות להבנת עקרון האינטגרציה העצבית:

תלמיד אחד מושיט את ידו, כף היד מופנית כלפי מעלה. תלמיד אחר צריך להוריד אותה על ידי דחיפה קלה, והתלמיד הראשון מתנגד. עם כל דחיפה היד יורדת קצת, ומיד עולה בחזרה. אם תדירות הדחיפות תהיה גבוהה (למשל כמה תלמידים ידחפו את היד זה אחר זה), היד תרד מתחת לסף מסוים, שלאחריו היא תשלים סיבוב שלם. סף זה אנלוגי לסף המתח של "פוטנציאל הפעולה".

סיכום

- מעבר מידע בנוירון מקודד באופן חשמלי על ידי פוטנציאלי פעולה המתקדמים לאורך האקסון.
- הגעת פוטנציאל פעולה לקצה האקסון גורמת הפרשת חומר כימי אל המרווח הסינפטי.
- החומר הכימי נקלט בקולטני התא הבתר-סינפטי, ומשפיע עליו.
- ההשפעה יכולה להיות **עידוד** או **עיכוב** של פעולת תא המטרה.

סיכום מעט ארוך יותר למורה, המקיף גם נושאים שלא נידונו בשיעור:

ראינו כי המידע העובר בין תאי העצב מקודד רובו באופן חשמלי על ידי פוטנציאלי פעולה המתקדמים לאורך האקסון. הפוטנציאל החשמלי בסיום דרכו באקסון, בכפתור הסינפטי, גורם לעלייה חדה בריכוז הסיידן על ידי פתיחת תעלות סידן בממברנת התא הקדם-סינפטי. בכפתור הסינפטי מצויות הרבה וסיקולות טעונות במוליכים עצביים, והעלייה החדה בריכוז הסיידן הגבוה מזניקה תהליך חדש של מיזוג בין הוויסיקולות ובין ממברנת התא. כתוצאה ממיזוג זה, מופרשים המוליכים העצביים אל תוך המרווח הסינפטי, והמוליכים העצביים מתחילים תהליך של פעפוע אל עבר התא הבתר-סינפטי. בעת הגיעם לממברנת התא הבתר-סינפטי, המוליכים העצביים יכולים להיקשר אל קולטנים המצויים בממברנת התא הבתר-סינפטי. הקשירה הזאת של מוליך עצבי לקולטן יוצרת שינוי חשמלי או מטבולי בתא הבתר-סינפטי, שינוי שיכול להשפיע בתורו על יצירת פוטנציאלי פעולה חדשים. כלומר המידע שמקודד באופן חשמלי בתחילה, בפוטנציאל הפעולה, מתורגם לאות כימי הנישא בעזרת המוליכים העצביים, ובסופו של דבר יכול להיות מתורגם שוב לאות חשמלי על ידי יצירת פוטנציאל פעולה חדש בנוירון הבתר-סינפטי.



הרחבה: פעילות עם התלמידים - ניסוי וירטואלי

בקישה הבא ניתן לערוך ניסוי וירטואלי עם סינפסת עצב-שריר (Neuromuscular Junction). מומלץ לעקוב אחר השלבים הבאים:

1. תארו והסבירו לתלמידים את המרכיבים השונים של הניסוי (סטימולטור, אוסצילוסקופ, אלקטרודות, וכו').
2. הציגו תגובות בתר-סינפטיות שונות עבור גירויים שונים (לדוגמא, 200mA, 100mA, וכו'). תארו לתלמידים איכותית את הקשר בין חוזק הגירוי לגודל התגובה.
3. חזרו על הסעיף הקודם אך הפעם לחצו ראשית על כפתור 'מבט מקרוב'. תארו לתלמידים את הקולטנים על התא הבתר-סינפטי, ואת המוליכים העצביים בתא הקדם-סינפטי. משכו את תשומת ליבם לתנועת הוסיקולות כתוצאה מהגירוי המדמה פוטנציאל פעולה. כמו כן תארו את התנועה הדיפוזית של המוליכים העצביים במרווח הסינפטי (Cleft). כמה וסיקולות משתחררות בתגובה לזרם גירוי נמוך לעומת זרם גירוי גבוה (מקסימלי, למשל)? **(תשובה: גירוי גבוה יותר גורר שחרור של מספר גדול יותר של וסיקולות).**
4. לחצו כעת על כפתור 'ניסוי לדוגמה' ובסופו בחרו ב'הצגת גרף תוצאות'. מתקבלת היסטוגרמה של עוצמות התגובה בתא הבתר. תארו את צירי הגרף לתלמידים, שימו לב כי ציר ה-X מתאר את המתח של התגובה בתא הבתר-סינפטי. מה מאפיין גרף זה? **(תשובה: למורה: המרחק בין השיאים השונים הוא קבוע).** מדוע זה כך? **(תשובה: הדבר מצביע על קיומן של "חבילות", "קוונטות", אשר גורמות לתגובה בתא הבתר-סינפטי).** מי הן חבילות אלה? **(תשובה: הוסיקולות - כיום אנחנו יודעים את התשובה גם בזכות רזולוציה גבוהה של מיקרוסקופים. בעבר, ללא ציוד זה, ניסויים מהסוג הזה סיפקו עדות לקיומן של וסיקולות האוצרות בתוכן מספר גדול – ובקירוב, קבוע – של מוליכים-עצביים).**

הרחבות:



5. העתיקו את נתוני הטבלה מסוף הניסוי אל תוך טבלת אקסל. הציגו את הנתונים על-גבי גרף מסוג scatter כאשר ציר ה-X מייצג את עוצמת הגירוי. איזה סוג של גרף מגמה כדאי להוסיף? **(תשובה: לינארי. הדבר הוא בהתאם לכך שמספר הניורטרנסמיטריים בכל וסיקולה הוא בקירוב קבוע).** דבר נוסף שאפשר לעשות עם התלמידים הוא לחזור על הצגת ההיסטוגרמה, אך הפעם בעזרת אקסל, במקום ע"י תוכנת הניסוי ע"י כפתור ('הצגת גרף תוצאות').
6. לחצו כעת על כפתור 'מידת פעילות ספונטנית'. מדוע רואים תגובה? **(תשובה: זוהי פליטה ספונטנית של וסיקולות מהתא הקדם סינפטי).** מהו גודל התגובה? **(תשובה: דומה לגודל**

התגובה בעת הפעלת גירוי נמוך מכיוון שמדובר על שחרור "חבילה" יחידה של מוליכים-עצביים עובר גירוי נמוך).

הערה למורה: את תהליך הפליטה הספונטנית ניתן לתאר מתמטית על-ידי תהליך פואסון למשל (ראו כדוגמה מאמר קלאסי: Katz, B., and R. Miledi. "The effect of temperature on the synaptic delay at the neuromuscular junction." *The Journal of physiology* 181.3 (1965): 656.



תנועות רצוניות

מטרות

- הרחבה של הידע הקיים לגבי תנועה למגוון התנועות וההתנהגויות שאנו מוציאים לפועל.
- התלמידים יבינו שביצוע תנועות מורכבות דורש מעורבות של מוח הגולגולת.

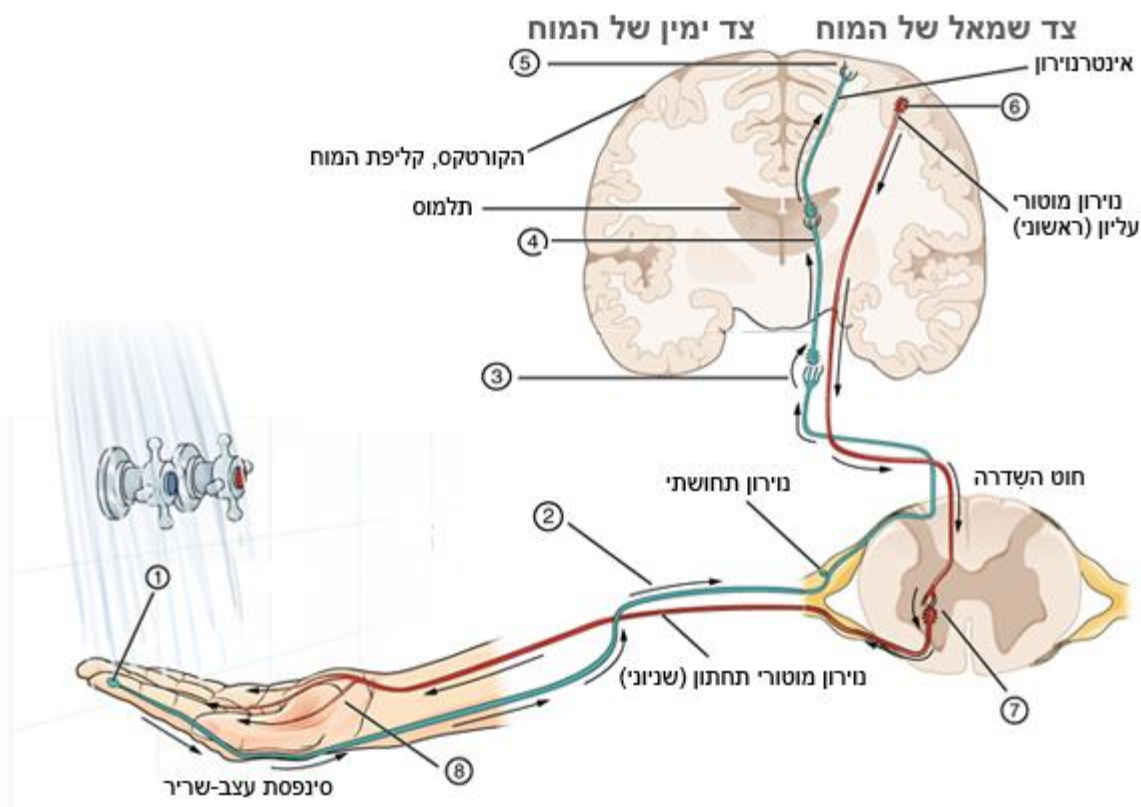
דרך ההוראה: הקנייה כיתתית

משך הזמן המוקצה: שעה

מבוא

בפרק זה עסקנו עד כה ביצירה של תנועות רפלקסיביות (רפלקסים). במקרים כאלה, סיב חישתי של מערכת העצבים ההיקפית מזהה מגע ומיידיע את מערכת העצבים המרכזית. היא בתורה שולחת פקודה בעזרת נוירון תנועתי של מערכת העצבים ההיקפית, אשר מגרה את השריר ויוצר תנועה. זוהי קשת הרפלקס. ראינו שמי שמזהה את המגע הראשוני וגם מי שמוציא לפועל את התנועה – הם נוירונים של מערכת העצבים ההיקפית (קודם הנוירון החישתי ואז הנוירון התנועתי). אולם – כדי להבין שיש צורך בתנועה ולהחליט לבצע אותה – חייבת להיות מעורבות של מערכת העצבים המרכזית. אם כך, הנוירון התחושתי של מערכת העצבים ההיקפית חייב ליידיע את מערכת העצבים המרכזית שהתרחש מגע. יש לו שתי אפשרויות עיקריות כיצד והיכן "לספר" למערכת העצבים המרכזית מה הוא חש:

1. האפשרות שלמדנו: הנוירון יכול "לספר" למוח השדרה בלבד על מה שחש, באופן שיגרום להפקת תגובה מידית. במקרה כזה הנוירון התחושתי יעשה סינפסה עם נוירון תנועתי בחוט השדרה. הפעלה כזאת יוצרת תגובת רפלקס, תגובה מהירה ופשוטה.
2. אפשרות נוספת: הנוירון יכול "לספר" למערכת העצבים המרכזית על מה שהגוף חש, על ידי פנייה אל מוח הגולגולת (תזכורת: מערכת העצבים המרכזית = מוח השדרה + מוח הגולגולת). בשביל לעשות זאת, על הסיב להגיע עד הראש. נסביר את העיקרון של מעבר המידע, ונעשה זאת באמצעות דוגמה: באיור שלפניכם אפשר לראות מה קורה כשאנו מנסים לכוון את המים באמבטיה לטמפרטורה הרצויה. למטה אפשר לראות יד שמרגישה את המים (קולטנים רגישים לחום על-פני כף היד מאותתים בנוירון ההיקפי מן היד לכיוון מוח השדרה). מימין רואים את מערכת העצבים המרכזית.



Credit: OpenStax College. The Function of Nervous Tissue, [OpenStax-CNX Web site](https://openstax.org/r/cnx-web-site), Feb 24, 2014

פירוט השלבים בתמונה:

- ① קולטנים שנמצאים בקצות העצבים שעל גבי עור כף היד חשים בטמפרטורת המים, ומעוררים.
- ② פוטנציאל פעולה עובר לאורך האקסון של עצב תחושי, לעבר חוד השדרה.
- ③ עם הגעת האות לחוט השדרה, מתבצעת סינפסה.
- ④ הניירון הבתר-סינפטי מעביר את המידע אל מוח הגולגולת.
- ⑤ המידע במוח הגולגולת מגיע אל הקורטקס, שם הוא עובר עיבוד ומתקבלת החלטה לגבי אופן ההתנהגות ביחס לטמפרטורת המים.
- ⑥ נירון מוטורי (תנועתי) שיוצא מהקורטקס המוטורי הראשוני שולח אות להפעלת השרירים.
- ⑦ הניירון המוטורי העליון מקיים סינפסה עם נירון מוטורי תחתון, ומעביר לו את המידע לגבי הנעת השרירים.
- ⑧ הניירון המוטורי התחתון גורם להתכווצות השרירים המתאימים ביד, שיבצעו את פעולת כיוונון הטמפרטורה של המים במקלחת.

- הבהרה: כל האיברים באיור הם של אותו אדם, ואנחנו מתארים את זרימת המידע ביניהם, בזמן שהאדם מכוון את המים לטמפרטורה הרצויה.
- המידע החישי עובר במסלולים הכחולים, ואילו הפקודה לתנועה עוברת במסלולים האדומים (במציאות, כמובן, אין להם צבעים כאלה).



מתי כדאי לגוף להפעיל תגובת רפלקס ומתי כדאי לערב את המוח הגדול?



- רפלקס הוא מהיר ולכן הוא כדאי כאשר נשקפת סכנה לגוף ויש צורך לסגת באופן מיידי מן הגירוי.
- יתרון נוסף בשימוש ברפלקס הוא שלא צריך "להטריח" את המוח הגדול בעיבודים מסוימים, ואם מפעילים את התפקודים האלה בצורה רפלקסיבית הדבר מאפשר להפחית עומס מן המוח הגדול ולאפשר לו לבצע מגוון דברים אחרים. דוגמאות מצוינות לכך הן רפלקס ההליכה ורפלקס הלעיסה: שימוש ברפלקס זה מפחית עומס ממוחות הגולגולת ומפנה אותם לעיבודים אחרים שאפשר לעשות בזמן הליכה. למעשה, החלק היחיד בהליכה שהמוח הגדול משתתף בו – הוא ההחלטה מתי להתחיל ללכת ומתי להפסיק, וההחלטה לשנות כיוון או מהירות – המוח הגדול אינו משתתף בהליכה עצמה, היא רפלקסיבית, ולכן אפשר בקלות לעשות דברים כמו לשוחח תוך כדי הליכה.
- אז למה בכל זאת כדאי לפעמים להשתמש במוח? המוח הגדול מסוגל ליצור קשת רחבה מאוד של התנהגויות ותגובות, שיתאימו בדיוק למצב, ולעומת זאת, מוח השדרה מסוגל ליצור רק תגובות אוטומטיות מובנות ופשוטות. היכולת הזאת של המוח הגדול נובעת מכך שהוא מסוגל לבצע תהליכי עיבוד וחישוב, למשל השוואה של התחושה שהתקבלה למידע שאגור בזיכרון, מחשבה על ההשלכות שיכולות להיות להתנהגויות שונות וכולי. המוח מפרש את הקלט החישי ומתאים את התגובה למצב. מהו החיסרון? התהליך הרבה פחות מהיר מרפלקס, ולכן אם היינו צריכים לשלוח את כל הקלטים למוח הגדול, היה נדרש לנו יותר זמן להגיב לגירויים מסוכנים באופן שהיה מזיק לרקמות הגוף. למשל, אם בבואנו לכוון את טמפרטורת המים במקלחת ניגע פתאום בזרם מים רותחים, גופנו יבצע באמצעות רפלקס את התנועה הפשוטה והמהירה של הרחקת היד ממקור הסכנה (המים הרותחים) מהר מאוד, עוד בטרם יספיק המידע להגיע לעיבוד במוח הגדול. לעומת זאת, את הפעולה המסובכת יותר של כיוון הברזים, הדורשת עיבוד מורכב והפקה של תנועה מורכבת, הוא יבצע באמצעות המוח הגדול, כמתואר באיור לעיל.

- ראינו שתהליך כיוון טמפרטורת המים במקלחת דורש תנועות רצוניות שמערבות את המוח הגדול. מה יקרה אם במהלך הפונקציה יופיע זרם מים רותחים?
- תשובה:** המידע יגיע במהירות לחוט השדרה ויפעיל את רפלקס הרתיעה – באופן "אוטומטי"! מנגנון זה עוזר להגן על הגוף מפני כוויות.
- הנקודה הזו נועדה להבהיר שבכל מקרה כשהמידע מגיע למוח הגדול הוא מגיע גם לאיזורים יותר נמוכים, שמנטרים כל הזמן את הסיטואציה ומפעילים תנועה רפלקסיבית במידת הצורך.



- בחרו שיר שאתם יכולים לדקלם את מילותיו בקלות. כעת נסו לדקלם אותו תוך כדי שאתם מבצעים תנועות שונות:
- הליכה
 - מצמוץ מהיר
 - הוצאה והכנסה של הספרים מהתיק
 - השחלת חוט לקוף של מחט
 - טפיחה על הראש ביד ימין וליטוף הבטן במעגלים ביד שמאל.



בוודאי שמתם לב שככל שהפעולה יותר "טבעית" (הליכה למשל), כך יותר קל לדקלם. זה אומר באופן כללי שהתנועה דרשה פחות משאבי עיבוד מהמוח הגדול. לעומת זאת, אם ניסיתם להשחיל חוט למחט בוודאי חוויתם קושי מסוים. זאת כיוון שההשחלה דורשת שליטה מוטורית עדינה ותיאום בו-זמני עם חוש הראייה, כלומר עירוב מאסיבי יותר של המוח הגדול.

לסיכום אפשר להראות 30 שניות ראשונות מרחוב סומסום:
<https://www.youtube.com/watch?v=oGbJoxNZZU0>

בקרת תנועה וקואורדינציה

בחלק זה של השיעור נדבר על תנועות מורכבות שדורשות תיאום של מספר מערכות שרירים. התיאום הזה מושג באמצעות תיאום בין אזורי המוח שמפעילים את השרירים, וכמו כן הפעלה של איבר במוח הגולגולת הקרוי **המוח הקטן** (בלועזית צרבלום).



המוח הקטן (החלק הצבוע)

אפשר לפתוח עם סרטון קצר: <https://www.youtube.com/watch?v=C92F5KcxS1M> שבו קופיקו מלמד את אב המשפחה שלומקה לרכוב על אופניים (אפשר לחתוך את הדקה הראשונה).



כל מי שלמד לרכוב על אופניים מכיר את התחושה – בהתחלה זה מאוד מבלבל, וגם כשמצליחים זה דורש המון ריכוז. בהדרגה ככל שמשתפרים התנועה הופכת להיות יותר טבעית ומצריכה פחות חשיבה וריכוז (או כמו שאומרים בשפה המקצועית – פחות **משאבים קוגניטיביים**). לאחר תהליך הלמידה רכיבה על אופניים מצריכה פחות ופחות הפעלה של המוח הגדול, והוא פנוי לדברים אחרים. לכן כמו שראינו בסרטון – אפילו ששלומקה הצליח לרכוב, הוא לא הצליח לנטר את הסביבה כראוי ולשים לב שהוא מתפרץ לכביש. המוח של רוכב מנוסה פנוי יותר להפנות קשב לסביבה ומאפשר לרכוב בצורה בטוחה יותר.

מיומנות

אימון על תנועה יכול להוביל למיומנות גבוהה – כך למשל אצל ספורטאים ואמנים שמשתמשים בגוף שלהם, למשל גנים, רקדנים וכו'.

אם הזמן קצר – אפשר לבחור את אחד משני הנושאים הבאים – יד רובוטית או הפרעה של בקרת תנועה.



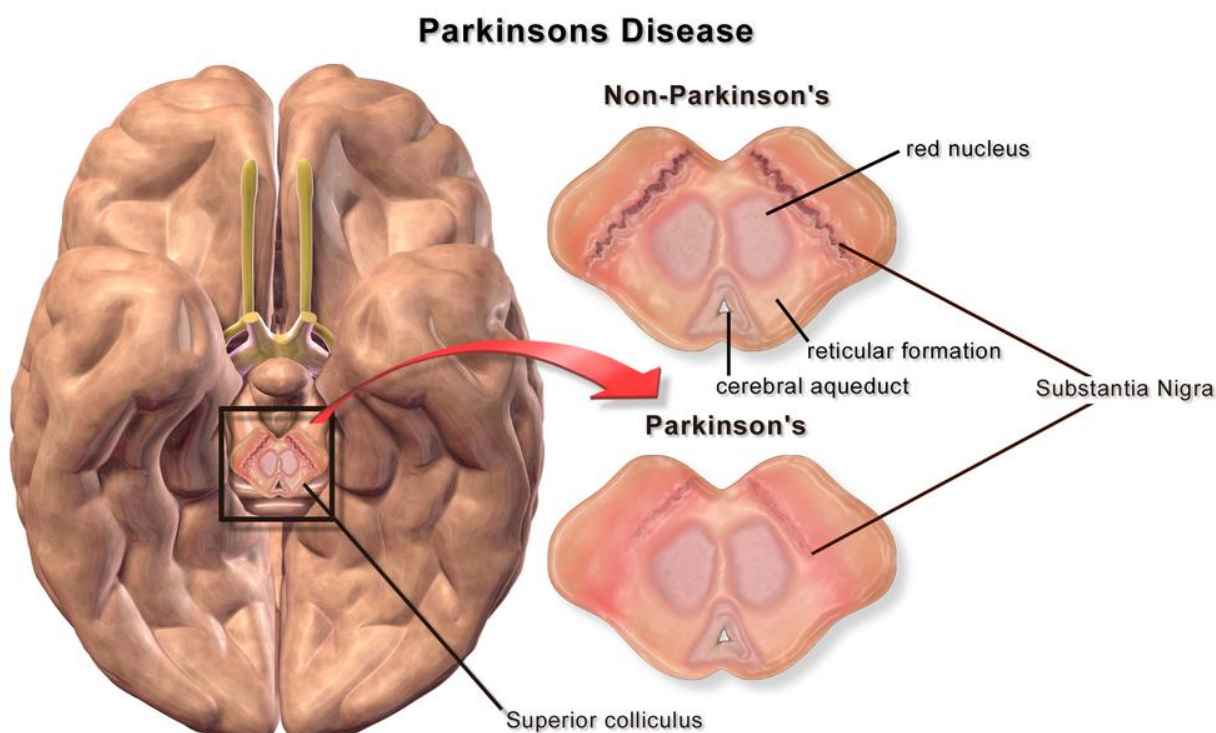
פרקינסון – מחלה של הפרעה בבקרת תנועה

מחלה כרונית פרוגרסיבית חשוכת מרפא, שבראשיתה נפגמים או מתים ניורונים דופאמינרגיים, כלומר ניורונים המייצרים חומר הקרוי דופאמין. חומר זה משמש למגוון תפקידים חשובים במוח, בין היתר בתהליך השליטה על תנועה.

תסמינים: רעד (רעידות בידים, בזרועות, ברגליים, בלסת ובפנים), נוקשות בגפיים ובגו, איטיות תנועה, אי-יציבות וקואורדינציה פגומה. למחלה גם היבטים נפשיים כמו: ירידה ביכולות הקוגניטיביות, דיכאון, חרדה והזיות.

השונות בין חולים היא גדולה, אבל באופן כללי ישנה התדרדרות בשליטה על התנועה עד שהחולה לבסוף נהיה נכה וסיעודי. המחלה בעלת מהלך מתמשך ומתקדם המחמיר עם הזמן. היא איננה מדבקת ואינה תורשתית.

מחלת הפרקינסון נגרמת כאשר ניורונים במוח באזור הקרוי סובסטנטיה ניגרה (Substantia Nigra) מתים או נפגמים. באופן תקין, ניורונים אלה מייצרים חומר כימי חשוב הנקרא דופאמין (Dopamin). דופאמין הוא חומר כימי שמשתחרר בסניפסות ומשפיע על תהליכים של בקרת תנועה, כלומר יצירה של פעולת שרירים תכליתית וחלקה. בהיעדר דופאמין נפגעת בקרת התנועה והחולים נותרים ללא יכולת להוביל או לשלוט בתנועותיהם באופן תקין.

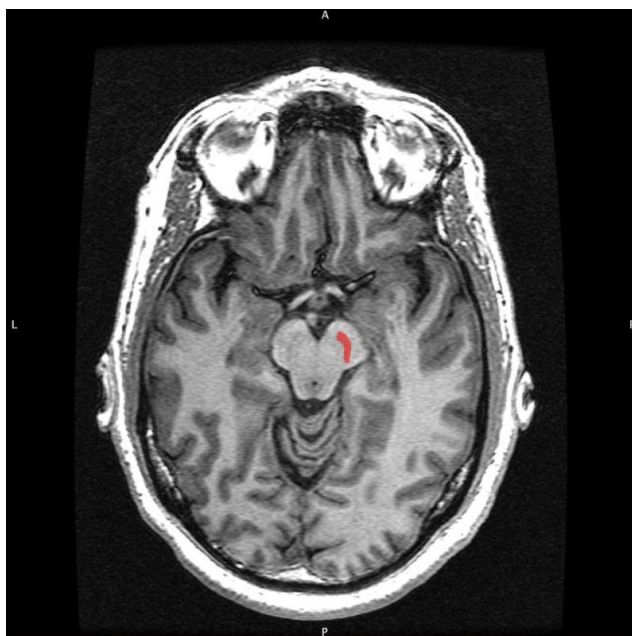


By BruceBlaus. When using this image in external sources it can be cited as:Blausen.com staff.
"Blausen gallery 2014". Wikiversity Journal of Medicine. DOI:10.15347/wjm/2014.010. ISSN 20018762.
(Own work) [\[CC BY 3.0\]](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/), via Wikimedia Commons

בתמונה רואים את האספקט התחתון של המוח (מוח במבט מלמטה). החלק שמופיע בתוך הריבוע השחור הוא חתך של גזע המוח, כלומר שם אמור להיות המשך של גזע המוח אבל הוא חתוך. בתוך החתך רואים את אזור הסובסטנטיה ניגרה. מימין ניתן לראות את האזור בהגדלה:

- למעלה מצב תקין אזור הסובסטנטיה ניגרה נראה כהה (כשמו – האזור השחור);
- למטה את אותו אזור אצל חולה פרקינסון. עקב מות התאים הדופאמינרגיים האזור איבד את צבעו.

לפניכם תמונת הדמיה שהתקבלה במכשיר MRI. זהו חתך רוחבי של המוח, של אדם ששוכב ופניו כלפי מעלה. אזור הסובסטנטיה ניגרה מסומן באדום. האזור הבהיר שהוא יושב בו הוא חתך של גזע המוח.



"Substantia Nigra" by Geoff B Hall - Own work. Licensed under CC0 via [Wikimedia Commons](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Substantia_Nigra.jpg)

הסיבה למות התאים הדופאמינרגיים אינה ידועה, אולם מחקרים ממשיכים להניב ממצאים חשובים המספקים רמזים חדשים על המחלה.

האבחנה אינה פשוטה, בדומה למרבית מחלות מערכת העצבים. עדיין לא קיימות בדיקות דם או בדיקות מעבדה שיכולות לאבחן את המחלה. הרופא צריך להתבונן בחולה לאורך זמן עד שיראה כי הוא סובל מרעד באופן עקבי וכי מצטרפים אליו סימפטומים קלאסיים נוספים (אחד או יותר).

4 סוגים של טיפולים בפרקינסון

ראשית יש לציין שאין טיפול שמרפא פרקינסון, אבל יש טיפולים שיכולים להקל את הסימפטומים.

הטיפול התרופתי מתבסס על מתן של החומר L-dopa שנכנס למוח ושם עובר תהליך כימי שהופך אותו לדופאמין. הגברת רמות הדופאמין במערכת העצבים המרכזית יכולה לפצות על החוסר בדופאמין שנגרם כתוצאה ממות הנוירונים הדופאמינרגיים, אבל כאמור אין בה כדי ליצור תאים חדשים ולרפא את המחלה. כמו כן, צריך לזכור שכל התערבות במערכת החומרים הכימיים במוח (למשל על-ידי מתן של תרופה שנכנסת למוח) גורמת לשינוי בדפוסי התקשורת בין נוירונים, וכך לשינוי בפעילות המוחית. מסיבה זו יש לתרופה תופעות לוואי שונות (תנועות בלתי רצוניות, בילבול ועוד) שקשורות לחוסר ויסות של מערכת העצבים. בדרך כלל הרופא צריך להתאים את המינון לכל חולה באופן אישי, כדי שתופעות הלוואי יהיו מעטות ככל הניתן, והמינון יספיק כדי להקל על תסמיני המחלה.

טיפול באמצעות ניתוח עשוי להתאים לחלק מהחולים. ישנם סוגים שונים של ניתוחים, אחד מהם הוא ניתוח להשתלת אלקטרודה במוח באחד ממוקדי השליטה על תנועה (S.T.N-Subthalamic Nucleus). לאחר שהאלקטרודה מושתלת, החולה יכול להפעיל אותה בעזרת התקן מיוחד, כלומר להזרים בעזרתה זרמים חשמליים במוח שמסייעים בויסות תנועה. בנוסף לאלקטרודה במוח משתילים לחולה קוצב קטן בדופן בית החזה, שאותו הוא יכול להפעיל בקלות עם מגנט כאשר הוא רוצה להסדיר את הפעילות המוחית ולהפחית רעידות. (הערה: הקוצב בעקרון לא חייב להיות מושתל בבית החזה, אבל זאת דרך טובה לדאוג שהוא לא ילך לאיבוד...).

הניתוח מבוצע בחדר הניתוח בהרדמה **מקומית** של החולה, כלומר לא הרדמה מלאה – החולה נמצא בהכרה במהלך הניתוח, ומשתף פעולה עם המנתח על מנת למקם את האלקטרודה במיקום אופטימלי. יש לציין כי החולה **לא מרגיש כל כאב** בזמן הניתוח מכיוון שבאזורים אלה בתוך המוח אין עצבים שחשבים כאב! המנתח בודק את הפעילות המוחית באזור וגם מבצע גירויים חשמליים שמפעילים נוירונים באזור בצורה ממוקדת, ועל-פי המדידות והגרייה המוחית מחליט היכן כדאי למקם את האלקטרודה. בשלב זה של הניתוח מבצע המנתח גירוי חשמלי במוקד ההפרעה **ומבקש מהחולה לדווח** על תופעות לזוי שנגרמו לו כתוצאה מהגירוי/או על השליטה שלו ברעד, כדי לוודא שאכן הושגה התוצאה הרצויה. לאחר מציאת המקום האופטימלי להשתלה מכניסים את האלקטרודה הקבועה וכן את הקוצב שמושתל בדופן בית החזה מתחת לעור, כך שהחולה יכול להפעיל אותו באמצעות מגנט חיצוני בהתאם לצורך.

סרטון: חולה מנגנת במהלך ניתוח מוח כדי לסייע למנתח להבין מהו המיקום האופטימלי להשתלת האלקטרודה: <http://www.nrg.co.il/online/29/ART2/707/980.html>



טיפול הרס רקמת מוח באמצעות גלי אולטרא-סאונד. זהו טיפול פרקינסון בשיטה **לא פולשנית**. בטיפול זה הרופא מזהה את המוקד המוחי שגורם לרעידות וצורב אותו בעזרת גלי אולטרא-סאונד ממוקדים, ללא ניתוח. צריבת האזור גורמת להפסקת הפעילות בו, ולהפחתה משמעותית של הרעידות.

סרטון:

<http://www.mako.co.il/news-channel2/Channel-2-Newscast/Article-6ae4bfc87d19c31004.htm>



טיפול מעניין נוסף פונה לבעיית הקפאון של חולי פרקינסון. המחלה, שפוגעת בויסות תנועה, פוגעת גם ביכולת ליזום תנועה, ואחד התסמינים הוא קפיאה במקום. התסמין הזה לרוב לא נפתר באמצעות תרופות. הטיפול הנ"ל מתבצע בעזרת חיישנים המורכבים על נעלי החולה ומוודדים את התנועה שלו, ועושים עבורו את פעולת ויסות התנועה שהוא מתקשה בה. הם פשוט אומרים לו כיצד לווסת את התנועה. ההצלחה של טיפול כזה מלמדת אותנו על המורכבות של פעולת המוח – כי היא חושפת את המורכבות של התנועה שהמוח מסוגל להפיק.

סרטון: <https://www.youtube.com/watch?v=2B-WY8-GmzQ>



לקריאה נוספת:



- <http://www.parkinson.org.il/About-Parkinsons-Disease>
- <http://www.tasmc.org.il/Operations/Pages/DBS.aspx>
- <http://www.haaretz.co.il/magazine/the-edge/premium-1.2514382>

הרחבה: תרופה לפרקינסון: משאבה שהושלתה במוח מזליפה תרופה על תאים פגועים.
<http://www.hayadan.org.il/parkinson050403>



יד רובוטית – שליטה על יד תותבת בעזרת כוח המחשבה

מוקדם יותר צפינו בבע"ח שאיבריהם נשלטו ע"י הזרמה של זרמים חשמליים דרך מערכת העצבים אל השרירים. במקרים הללו היה איבר תקין, אך הוא לא היה מחובר למערכת עצבים חיה ומתפקדת. במצב כזה חיקוי של מערכת עצבים מתפקדת ו"יורה" פוטנציאלי פעולה הובילה לתנועה של האיבר.

כעת נתייחס למצב הפוך: מערכת העצבים פועלת כשורה ומצליחה לייצר פוטנציאלי פעולה, אך האיבר פגום. במקרה כזה ניתן להרכיב לאדם איבר תותב, למשל יד תותבת. התותב יכול להיות מכשיר חשמלי, למעשה סוג של רובוט. הזרמים החשמליים ששולטים בהפעלה של האיבר הרובוטי – הם הזרמים החשמליים המוקלטים מהמוח!

נכים או קטועי גפיים מן הסתם אינם מסוגלים להזיז את האיבר הפגוע או החסר. אבל למרות זאת ייתכן שיוכלו להפעיל את האזורים המוחיים שיוזמים את התנועה. לשם כך הם צריכים לחשוב על הזזה של האיבר. כאשר הם עושים זאת, הם למעשה גורמים להפעלה של ניורונים במוח שנמצאים באזורים ששולטים על יוזמה של תנועה. אלו הם ניורונים שבגוף תקין משתתפים בתהליך ההפעלה של ניורונים תנועתיים של מערכת העצבים ההיקפית, מה שגורם לבסוף לתנועה ממש.



איך זה מרגיש לנסות להזיז איבר שלא קיים...? נסו "לכשכש בזנב" או "לנופף בכנפיים" (שאין לכם).

כאשר הניורונים במוח שיוזמים תנועה פועלים, פירוש הדבר שעובר בהם פוטנציאל פעולה. אם נוכל למדוד את הפוטנציאל הזה, נדע איזו פעולה האדם רצה לבצע. את המדידה אפשר לבצע באמצעות אלקטרודה המושתלת במוח. את המידע שמתקבל מהאלקטרודה ניתן לתרגם להפעלה של מכשיר דמוי רובוט, כך שהאדם יכול להפעיל את הרובוט בכוח המחשבה, על ידי הפעלה של ניורונים במוח.

צפו בסרטון ושימו לב במה כרוכה הפעלה של יד רובוטית בכוח המחשבה:

ראשית יש להשתיל במעמקי המוח אלקטרודות, באזור שבו נמצאים ניורונים ששולטים על יוזמה של הזזת היד. האלקטרודות צמודות לניורונים הללו ומקליטות את הפוטנציאל החשמלי סביבן. כאשר אלקטרודה קולטת שינוי בפוטנציאל החשמלי, הדבר מעיד על כך שניורון הסמוך לה התכוון להוציא לפועל תנועה כלשהי עם היד. המידע מהאלקטרודה נשלח ליד רובוטית (מכשיר חשמלי), והרובוט נע בהתאם לכוונות של האדם.

שימו לב שהיד לא חייבת להיות מחוברת לגוף, אבל במידה וזה נוח אפשר "ללבוש" אותה.

בשלבם הראשוניים צריך להתאמן הרבה על שליטה באיבר הרובוטי, עד שהמוח מתרגל וצובר מיומנות. זה תהליך מאוד דומה לאופן שבו תינוק לומד לשלוט על התנועות שלו, ולאופן שבו מבוגרים רוכשים מיומנות תנועה.

סרטון 1: https://www.youtube.com/watch?v=lZgeb_HDb48



סרטון 2: <http://gizmodo.com/holy-crap-this-guys-got-two-mind-controlled-robot-arms-1673271601>

לרובוט יכולה להיות צורה של יד, אבל בעקרון גם כל צורה אחרת. במילים אחרות, אם יש אלקטרודה במוח אפשר ללמוד להפעיל בעזרתה **בעקרון** כל מכשיר. ככל שההפעלה יותר מורכבת צריך יותר אלקטרודות ויותר אימון.

באותה מידה שלומדים להזיז יד רובוטית, אפשר להפעיל כל מכשיר חשמלי בכוח המחשבה. אילו טכנולוגיות אתם הייתם מתכננים (שהייתם מוכנים לעבור עבורן ניתוח להשתלת אלקטרודות בעומק המוח)?



עוד על נירופרוטזות (הרצאת TED): <https://www.youtube.com/watch?v=ZuATvhlcUU4>





אז כמה חושים יש לנו בעצם?

מטרות

- התלמידים יזהו רכיבים פחות מוכרים של מערכת החישה האנושית, יתנסו בהם ויסבירו כיצד הם תורמים ליצירת תמונת עולם ומשפרים את יכולת השרידות שלנו.
- התלמידים יכלילו את עקרונות מערכת הראייה שנלמדו למערכות חישה אחרות.
- התלמידים יסכמו כי כל הידוע לנו על העולם תלוי בייצוג ובעיבוד

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית (מבוא + סיכום) + למידה עצמית מקוונת

משך הזמן המוקצה: שעה

הערכה: בוחן (כניסה מתוך אתר האינטרנט, בנפרד מהפעילות המקוונת)

התייחסות לידע קודם (משיעורים קודמים באותו פרק)

- מערכת הראייה

השיעור מכיל פתיחה וסיום שנערכים באופן פרונטלי במליאה, והחלק המרכזי של השיעור ניתן להעברה כפעילות מקוונת לעבודה עצמאית, או במרכז במליאה.



מבוא

מערכת העצבים היא ה"מפקד" של הגוף. כדי לדעת אילו פקודות כדאי לתת, היא צריכה לאסוף כמה שיותר מידע על העולם. דוגמאות:

- כדי להפעיל את השרירים לתנועה בכיוון הנכון כדאי לאסוף מידע ראייתי לגבי תוואי השטח. כדי
- כדי לדעת אם כדאי לפקוד על הגוף לאכול דבר מה, כדאי לבחון את הריח שלו.
- ועוד

כלומר, כדי שהמוח יוכל לספק לגוף הנחיות הפעלה שיהיו בטיחותיות ומועילות, הוא צריך המון מידע על הסביבה. לכן מערכת העצבים ההיקפית מחברת את מערכת העצבים המרכזית למנגנונים של חישה.

כל מערכות החוש קולטות בקולטנים תכונות פיזיקליות (למשל גלי אור/גלי קול/לחץ/טמפרטורה) או כימיות (למשל מולקולות בעלות ריח/טעם) שקיימות בעולם. את המידע שקלטו הן מעבירות לעיבוד. העיבוד נועד לנסות לפרש מתוך המידע הזה תמונה שלמה שתקל על האורגניזם לבחור דרך פעולה שתאפשר לו שרידות מיטבית.

מקובל לחשוב שיש לנו 5 חושים: ראייה, שמיעה, טעם, ריח ומגע. עקרון החישה פועל באופן דומה בכולם: איברי החישה שלנו קולטים אותות מהסביבה וממירים אותם לאות חשמלי, כזה שהמוח יכול להבין. המידע מגיע אל המוח ועובר עיבוד. בעקבות העיבוד מתקבלת תחושת החוויה החושית (אנחנו רואים, אנחנו שומעים וכו').



בשיעור הקרוב נשאל את השאלה – האם באמת יש לנו רק 5 חושים? רמז: אם התשובה היתה "כן", לא היה על מה להעביר שיעור...

עברו לפעילות המקוונת וגלו את התשובה המלאה.

בשלב זה יש להפנות את התלמידים לפעילות המקוונת באתר. מסמך עם מתווה מפורט של הפעילות נמצא באתר.

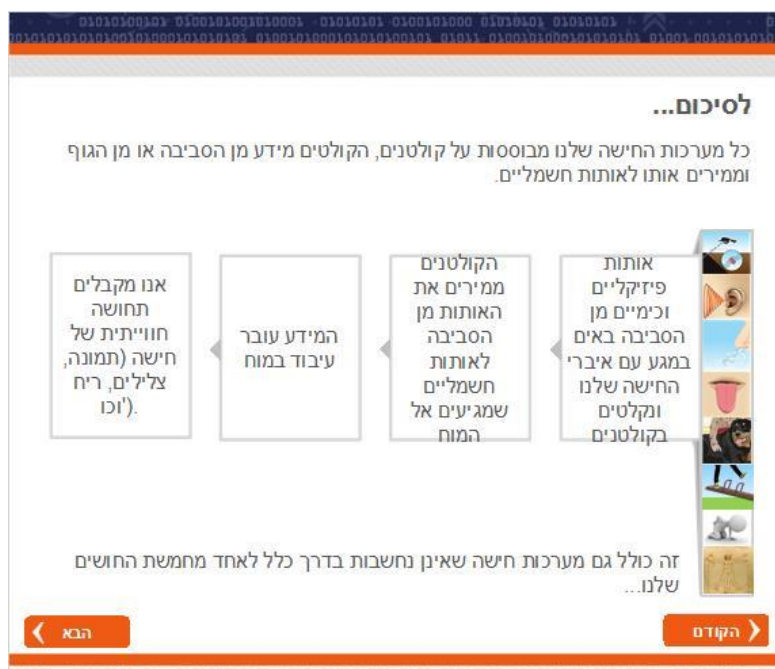


לאחר הפעילות המקוונת – המשך במליאה:



סיכום

בפעילות המקוונת ראינו שיש לנו יותר מ-5 חושים. כמה יש? קשה לומר.
 אבל מה שבאמת חשוב זה שבבין את העיקרון שלפיו פועלים כל החושים שלנו:



כעת כדאי למנות את החושים החדשים שהתלמידים נתקלו בהם (פרופורוספציה, איזון, כאב), ולוודא הבנה בקרב התלמידים.



בשיעורים הקרובים נצלול לתוך העולם המרתק של החישה. נלמד על חושים של בעלי חיים שונים ועל חושים של מכשירים חשמליים (יש דבר כזה!). בהמשך הפרק נלמד עוד על תהליכי הקליטה והעיבוד של החוש הכי מפותח שלנו, חוש הראייה.

חושים אחרים - בעלי חיים ומערכות טכנולוגיות

מטרות

- התלמידים יזהו רכיבים פחות מוכרים של מערכת החישה האנושית, יתנסו בהם ויסבירו כיצד הם תורמים ליצירת תמונת עולם ומשפרים את יכולת השרידות שלנו.
- התלמידים יחשפו להקבלה בין חושים בגוף האדם לחושים בבעלי-חיים, וכן להקבלה בין חישה במערכות ביולוגיות לחיישנים מלאכותיים.
- הצגת רעיונות לגבי הרחבת המנעד החושי – חושים של בעלי-חיים שונים, שימוש במכשירים כמערכות חוש תומכות לגוף האדם.

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית

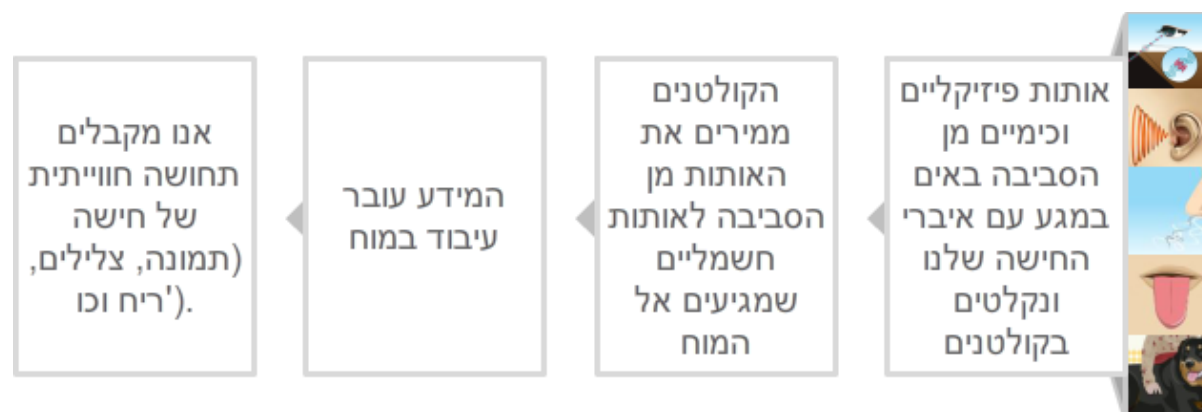
הערכת זמנים: שעה

דגשים למורה:

הרציונל: מערכת העצבים היא ה"מפקד" של הגוף, וכדי לדעת אילו פקודות כדאי לתת, היא צריכה לאסוף כמה שיותר מידע על העולם. את זה היא עושה באמצעות החישה. כל מערכות החוש קולטות בקולטנים (רצפטורים) תכונות פיזיקליות או כימיות שיש בעולם, ומנסות לפרש מתוכן תמונה שלמה שתאפשר לאורגניזם לבחור דרך פעולה שתאפשר לו שרידות מיטבית ניתן להשוות רכיבים אלה לרכיבים הנדסיים שאפשר לייחס להם אספקט של חישה.

מקובל לחשוב שיש לנו 5 חושים: ראייה, שמיעה, טעם, ריח ומגע אולם, כפי שראינו בפעילות המקוונת, יש לנו יותר חושים. חושים נוספים הם למשל: חוש הפרופריוספציה, חוש הכאב (שגם הוא מתחלק לחושים שונים), חוש האיזון ועוד.

העקרון שמאפיין את כל החושים הוא:





שאלה במידה והתלמידים למדו במדעים על אנרגיה:

התאימו בין הגירוי לחוש:

חוש הראייה	אנרגיה כימית
חוש השמיעה	אנרגיית חום/לחץ
חוש הריח וחוש הטעם	אנרגיה מכנית
חושי המישוש	אנרגיית אור

תשובה:

- חוש הראייה – אנרגיית אור
- חוש השמיעה – אנרגיית מכנית
- חושי הריח והטעם – אנרגיית כימית
- חושי המישוש – אנרגיית חום/לחץ



מה שקרוי בפינו "חוש המגע" כולל רשימה ארוכה של חושים בעלי מאפיינים שונים, למשל **החוש הקינסטטי** – תפיסת התנועות של הגוף, ו**חוש הקרביים** – תחושות שמתקבלות בקולטנים של איברים פנימיים. על גבי העור יש לנו קולטנים מסוגים שונים, שכל אחד מסוגל לזהות תכונה מסוימת של גירוי: **טמפרטורה, לחץ, רטט ועוד**. הגירויים האלה שונים זה מזה וגם הקולטנים שמזהים אותם שונים, ולכן אפשר לראות בכל אחד מהם חוש העומד לעצמו.

חושים של חיות וחקיוי הטבע

החושים הקיימים בגוף האדם הם לא החושים היחידים הקיימים בטבע. לרוב החיות יש חושים שאין לבני אדם, ונביא פה רק דוגמאות מעטות מתוך עושר החיישנים הקיימים.



ניתן לבחור רק בחלק מהדוגמאות שלהלן, כדי להשאיר זמן לנושא הבא.

החושים המצויים בגוף האדם אינם החושים היחידים המצויים בטבע. לחיות רבות יש חושים שאין לבני אדם, ונביא פה רק דוגמאות מעטות מתוך עושר החיישנים הקיימים:



- **חולב (mole)** – חש תנודות באדמה למרחק רב, ואף משתמש בכך כאמצעי תקשורת עיקרי עם בני מינו. מלבד זאת, לשם ניווט למרחקים ארוכים הוא משתמש ביכולתו לחוש שדות מגנטיים תת-קרקעיים.

(ויקיקומונס, התמונה צולמה על ידי Kenneth Catania, University Vanderbilt מוצגת לפי רישיון CC BY-SA (3.0)



(מקור:

<http://www.photolib.noaa.gov/htmls/reef1842.htm>

- כרישים וחתולי-ים – מייצרים שדה חשמלי ודוגמים את העיוות שלו במרחב, וכך מזהים את מיקומם של מזון וסכנות. הם עושים זאת בעזרת אלקטרורצפטורים ביולוגיים.**



(תמונה מתוך English language Wikipedia על ידי Gary Alpert ומוצגת לפי רשיון CC BY-SA 3.0)

- ג'וק – לתיקן יש מערכת חישה מיוחדת ברגליים, המאפשרת לו לחשב את הזווית ואת העוצמה של הצעד שהוא צריך להפעיל על משטח כדי ללכת. מערכת החישה הזאת משוכללת כל כך, שהתיקן יכול ללכת על כל משטח במהירות וביעילות!**

פרופ' איילי, זואולוג באוניברסיטת ת"א שהוא גם חוקר מוח, חוקר את ההליכה של הג'וק. הוא עושה שיתופי פעולה עם חוקרים מתחום ההנדסה שרוצים להשתמש במסקנות שלו לבניית רכב חלל. בחלל, קשה לא פעם לדעת מהו סוג הקרקע, ורכב חלל כזה יכול להתנועע ביעילות בכל מצב.

לקריאה נוספת:

http://biomimicrynews.blogspot.co.il/2011/02/blog-post_2396.html

ראו גם סרטון בנושא מודלים של חרקים בשימושים טכנולוגיים:

<https://youtu.be/0TNQX5NO4NM?t=1m35s>



- עטלף וסונאר – אקולוקציה (echolocation), התמצאות במרחב לפי שידור וקליטה של גלי קול. באוניברסיטאות שונות בארץ ישנם מדענים החוקרים את היכולת המדהימה הזאת של העטלפים.**

ניתן לצפות בסרטונים על מחקר זה בקישורים הבאים:

<http://www.weizmann.ac.il/neurobiology/labs/ulanovsky/media> -
<http://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-4489925,00.html> -
<https://www.youtube.com/watch?v=CMeCRLMPj6Y> -

הערה למורה לקראת הנושא הבא:



ראינו שבעולם יש מגוון אותות מסוגים שונים: אותות כימיים, פיזיקליים, מגנטיים וכו'. אבל המוח מקבל ו"מבין" רק אותות חשמליים, לכן כל חוש צריך לבצע **התמרה** (transduction) – תרגום של סוגי האנרגיה הפיזיקלית השונים לאותות חשמליים שיגיעו אל המוח. ההתמרה מתבצעת ברצפטורים. כשרצפטור מופעל, הוא מעביר את האות החשמלי שלו לנוירונים. משם ממשיך האות בדרכו לקורטקס, כשכל חוש שולח אותות לאזורי קליטה אחרים. כשאנו חשים במגע, אנו למעשה חשים אותו במוח ולא על העור. עם זאת, האותות החשמליים במוח שמתווכים בתחושת המגע נוצרו ע"י אותות חשמליים מרצפטורים הממוקמים על העור. לרצפטורים תפקיד מרכזי בקישור בין אירועים חיצוניים לחוויה הכרתית (לתחושה של מגע מסוים, של צבע מסוים, של ריח מסוים וכו' – לאספקט החושי של חושים, ל"איך זה מרגיש").

חיישנים במכשירים אלקטרוניים

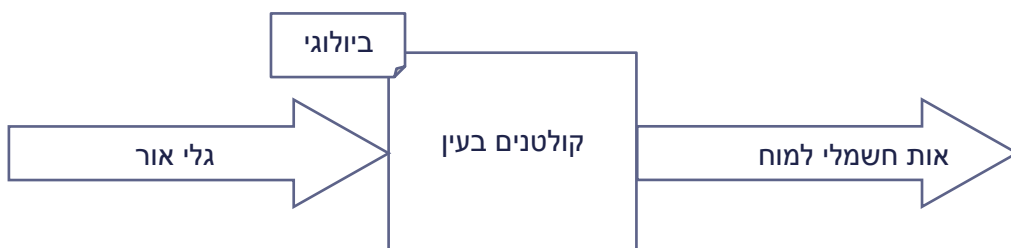
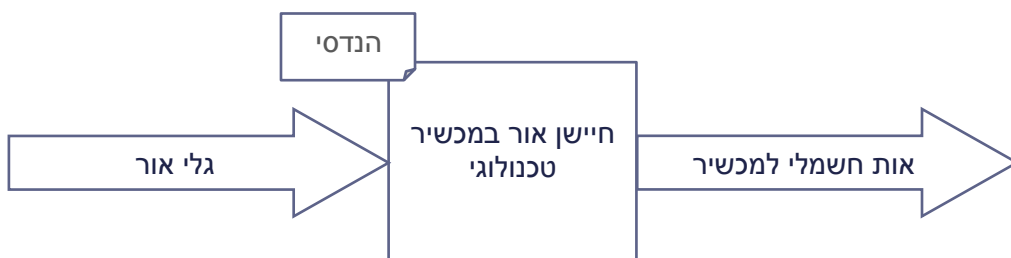
כדי שמערכת תהיה מודעת לסביבתה, היא צריכה לחוש אותה בדרך מסוימת. במילים אחרות, היא צריכה לקבל קלט מהסביבה. חישבו על פעולתה של מכונת כמערכת המודעת לסביבתה: כיצד מגיע מידע אודות תאונה הגורם לכריות האוויר להיפתח? כיצד מתקבלת אתראה על כך שבנהיגה לאחר ישנו עצם קרוב מדי?

חישה של סביבה נעשית באמצעות **חיישן** (Sensor). חיישן הוא רכיב הרגיש לגירוי פיסיקלי מסוים בסביבתו, וממיר גירוי לקלט אשר מוזן למערכת. במערכות טכנולוגיות, הקלט למערכת הוא בדרך כלל אות חשמלי. בדומה לחושים, שבעזרתם אנו קולטים מידע מהסביבה, כך החיישנים במערכות הטכנולוגיות מהווים אמצעי לאיסוף מידע מהסביבה.

את שתי ה"מערכות" - גם חיישנים בגופנו המחוברים למערכת העצבים וגם חיישנים במערכת אלקטרונית – ניתן לתאר בצורה הבאה:



לדוגמה, חיישני האור במערכת הנדסית ובעיני אדם:



שם החיישן יינתן לרוב על-פי סוג התופעה אותה הוא חש כגון: חיישן טמפרטורה, חיישן אור, חיישן מרחק, חיישן לחות, חיישן דופק וכדומה.

באמצעות חיישן כזה, ניתן לבנות מכונה שמגיבה לאור. למשל מכשיר שרגיש לאור שנדלק במקרה, ומצפצף אם האור דולק למעלה מ-30 שניות כדי להתריע שהמקרר פתוח זמן רב.



העלו רעיונות נוספים למכשיר שעושה שימוש בחיישן אור.



פעילות

לפניכם רשימה של מכשירים אלקטרוניים בעלי חיישנים. בחרו מכשיר מהרשימה ותארו אילו מאפיינים של הסביבה הוא קולט.

- א. מזגן
- ב. מערכת לגילוי עשן
- ג. מעלית
- ד. מכונית
- ה. מצלמות
- ו. מסכי מגע

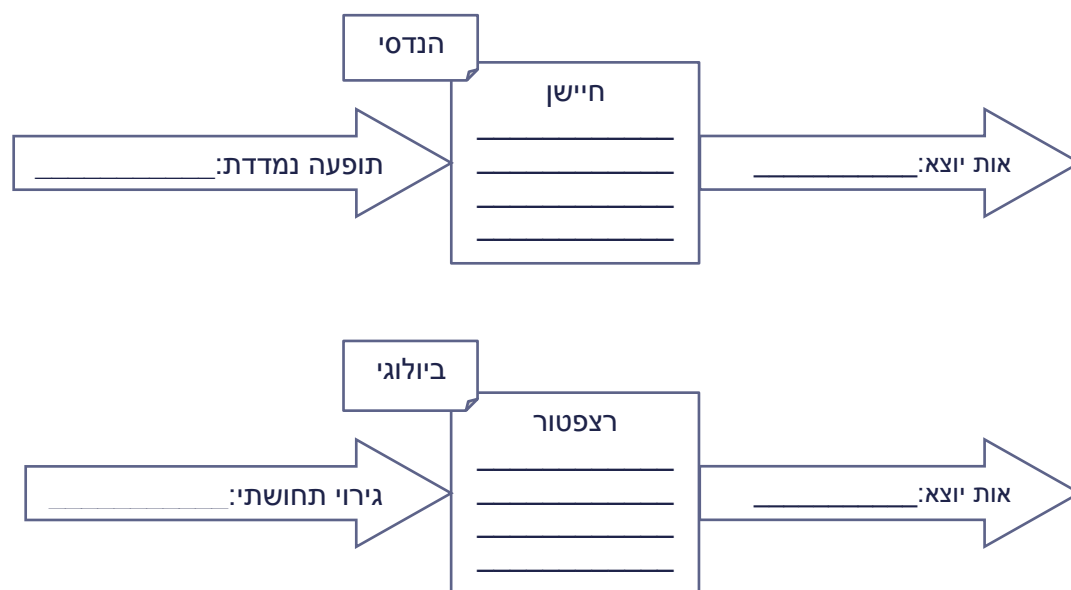
תשובות לדוגמה:

- א. מזגן – חיישני טמפרטורה, שבדרך כלל ממוקמים גם בשלט הרחוק, וגם בעוד מקום בחדר, מודדים את הטמפרטורה באזור שלידם, כדי שמערכת המשוב של המזגן תוכל לשמור על הטמפרטורה הרצויה.
- ב. מערכת לגילוי עשן – המערכת מבוססת על חיישן המודד את מידת היינון של האוויר, או חיישן אור המודד את מידת הפיזור האופטי של האוויר שנכנס לתוכו. את החיישנים ממוקמים בדרך כלל במקום גבוה, כי עשן נוטה לעלות למעלה. תפקידם של החיישנים לזהות שינויים אופייניים בתכונות האוויר שסביבם שקורים בהמצאות עשן.
- ג. מעלית – במעלית יש חיישן משקל, שנמצא בדרך כלל בכבל המעלית ותפקידו לוודא שהמשקל מתאים לפעולה התקינה של המעלית (יש מעליות שנכנסות למצב "שמירת אנרגיה" וחוזרות לפעולה רק כשהן מרגישות משקל במעלית). בנוסף, בדלתות המעלית יש גם חיישן אופטי וגם חיישן לחץ, המונעים את סגירתן על האנשים הנכנסים.
- ד. מכונית – במכונית מודרנית יש חיישנים רבים. במנוע – חיישנים ללחץ (למשל שמן), טמפרטורה (חום מנוע) ועוד חיישנים רבים. בנוסף, במערכת המיזוג – חיישן טמפרטורה; במערכת כריות האוויר – חיישן לחץ (המזהה מכות חזקות שהשלדה מקבלת); במכונות רבות יש חיישן מגע שמזהה שחגורות הבטיחות מחוברות וסגורות.
- ה. מצלמות – ברוב המצלמות יש לכל הפחות חיישן אור, המזהה אם צריך "פלאש" או לא. יש גם חיישן מתח חשמלי, המזהה עד כמה הסוללה טעונה. חיישן נוסף שיש במצלמות רבות הוא חיישן הטייה, המזהה עם הצילום הוא לרוחב או לגובה.
- ו. מסכי מגע – במסכי מגע יש כמובן חיישני מגע רבים, המפוזרים באופן אחיד בשטח המסך, והם המאפשרים למסך להבחין בנקודת המגע על פניו.



ביולוגי מול הנדסי

עליכם לבחור חיישן הנדסי שקיימת לו מקבילה בגוף האדם, ובהתאם להראות את האנלוגיה שבין שתי "המערכות" (הנדסית וביולוגית) על ידי **יצירת שני תרשימים במקביל** (בדומה לתרשימים שלמעלה):



רעיונות למורה:

- 1) קולטן חוש הריח וגלאי עשן – הגירוי הוא חלקיקים באוויר, הקולטן והחיישן מזהים את החלקיקים ושולחים אות חשמלי למוח / למכשיר בהתאם. העיבוד במוח / במכשיר יוביל לנקיטת תגובה לעשן (למשל, חיפוש מטף כיבוי או הפעלת אזעקה).
- 2) קולטן חוש השמיעה וחיישן גלי קול במכשיר סלולרי חכם – הגירוי הוא קלי קול. הקולטן והחיישן ממירים את גלי הקול לאות חשמלי למוח / למכשיר בהתאם. העיבוד במוח / באפליקציה לזיהוי קול יוביל לזיהוי הקול.
- 3) כנ"ל לגבי גלי אור, קולטני חוש הראייה וחיישן אור. עיבוד במוח או באפליקציית זיהוי תמונה.

כדאי לציין שכשמדובר בחיישנים של מכשירים, הם יכולים להיות הרבה יותר רגישים לאותות מהסביבה, וגם יכולים להגיב לאותות שהחושים שלנו לא מזהים (למשל גלי אור מחוץ לספקטרום האור הנראה). לעומת זאת, במקרים רבים היתרון של המערכות הביולוגיות הוא לא בחישה עצמה, אלא בחישוב – לכן אומרים שמבחינות רבות המוח הוא כיום מכונת העיבוד המשוכללת ביותר שקיימת.



תוספת שיכולה להתאים לכיתות ט'י'

סוגים נוספים של חיישנים שמתקיימים במכשירים ובמערכות ביולוגיות



בחרו שני סוגי חיישנים מהרשימה ושערו היכן חיישנים מקבילים להם עשויים להימצא בגוף האדם:

- מד לחות
- מד חומציות (pH)
- מד זעזועים
- חיישן עיוות (strain gauge)
- חיישן לחץ

תשובה למורה:

להלן מספר חיישנים שחשובים לשימור הפעילות התקינה וההגנה על הגוף:

- חיישני חומציות קיימים בכמה מקומות בגוף: בעורקי הצוואר יש חיישנים המודדים את הלחץ החלקי של חמצן בדם, בנוסף ישנם חיישנים המודדים את ריכוז החמצן ליד הלב, ולבסוף קיימים גם חיישנים בגזע המוח המודדים את כמות הפחמן הדו חמצני בנוזל המוח.
- חיישן עיוות קיים למשל בשרירים (כפי שניתן לראות בפעילות ההנדסית בנושא רפלקסים).
- חיישן לחץ קיים למשל בעורנו, כחלק מחוש המישוש, אך קיימים גם חיישני לחץ דם (ברו-רצפטור) בגופנו.

בגוף האדם פועלים חיישנים או מערכות חישה אשר עוקבים אחר מצבם של משתנים שונים או מצבו של הגוף בכללותו. חיישנים רבים קשורים למערכות החישה, אך ישנם גם חיישנים אחרים:

- חיישנים המעבירים מידע דרך המערכת ההורמונלית, שבאמצעות המוח מקבל מידע על מה שקורה בגוף באופן אחר: באמצעות חומרים המגיעים אליו. צורת העברת מידע זו היא איטית ביותר ביחס למידע המגיע באמצעות העצבים.
- חיישנים שמובילים מידע למוח, אך אנו לא חווים אותו באופן מודע. המידע מחיישנים אלה משמש את המוח לשליטה במצב האופטימלי של הגוף – מבחינת חומציות, סוכר, טמפרטורה, לחץ דם וכו'. למרות שאנחנו לא מודעים לכל החיישנים שמנטרים את גופנו,

ישנם חיישנים רבים כאלה. לדוגמה, חיישני חומציות קיימים בעורק הקרוטידי בצוואר, שם תפקידם לבדוק שיש מספיק חמצן בדם הזורם למוח. חיישנים אלה מחוברים למערכת העצבים ומשפיעים דרכה על קצב הנשימה ולחץ הדם. ישנם אפילו חיישני מתיקות הנמצאים במערכת העיכול, הזיהם כמעט לגמרי לאלה שבפקעיות הטעם שלנו, אך איננו מודעים למידע המתקבל מהם, והם משמשים אך ורק את המערכת האוטומטית של ספיגת הסוכר מהמעיים.

חיישנים אלה לא ייחשבו לחלק ממערכת החישה, שכן במערכת החישה נכללים רק מערכות שמאפשרות לנו **מודעות לתוצאות החישה**.

אם כך, נראה שאפשר לסכם חישה באופן קצר ופשוט: במקרים של חישה חיישני הגוף ממירים גודל פיסיקלי לאות חשמלי המועבר באמצעות העצבים אל המוח, שם הוא מעובד ומאפשר לנו "לחוש". מערכות חישה אחרות בגוף מספקות מידע אודות מגע, איזון ועוד, ומצטרפות למערכות (שלא שייכות למערכת החישה) שמסתמכות על חיישנים המפוזרים בגופנו.

חוש הראייה – מהעין למוח

מטרות:

- הדגמת עקרונות החישה בעזרת מערכת חוש הראייה.
- באמצעות תיאור של מבנה העין נעמיק את ההבנה לגבי אופן הפעולה של איבר חישה והתאמתו לחישה בתנאים מגוונים.
- ביסוס ההבנה של מעבר האות העצבי דרך תיאור מסלול העברת המידע מהעין למוח.
- דרך תופעת הכתם העיור יגלה התלימד סקרנות למבנה החלק הסנסורי של העין ויכיר את מורכבותו.

משך הזמן: 2 שעות

הכנה מקדימה: לצורך הדגמת הכתם העיור מצ"ב בסוף המערך דף להדפסה, מומלץ עבור כל זוג תלמידים.

מושגים: אישון, עדשה, קוצר ראייה, רוחק ראייה, רשתית, הכתם העיור, תצלובת הראייה, תלמוס, קורטקס.



אפשר להתחיל את השיעור במצגת תמונות יפות – למשל של נשיונל ג'אוגרפיק.

מבוא

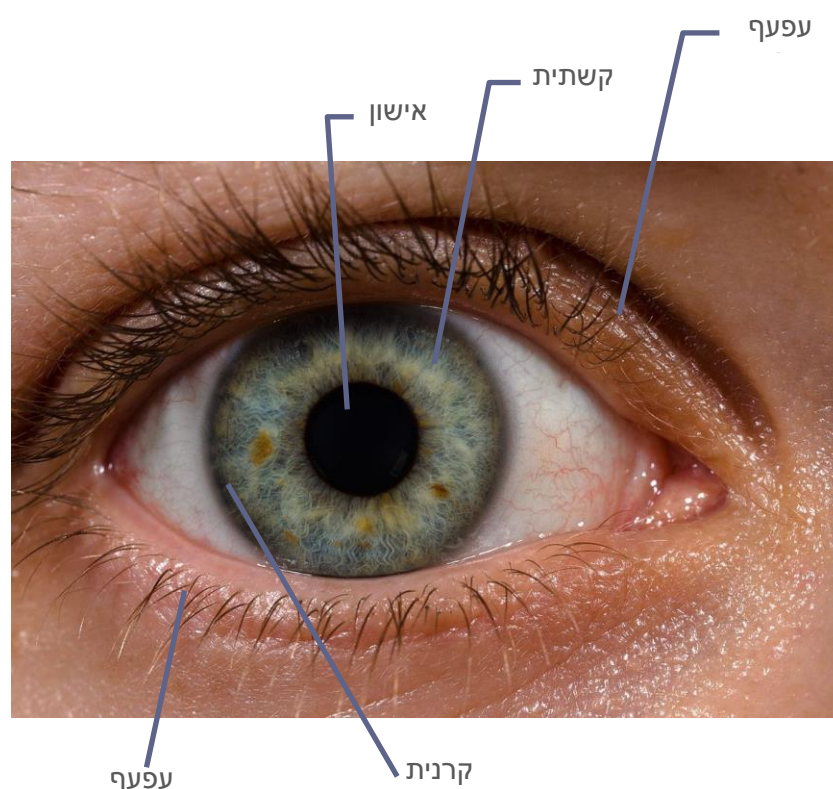
עד כה בפרק זה עסקנו בעקרונות החישה. כעת נתמקד במערכת חוש אחת – מערכת הראייה, ונתאר את מעבר המידע החישי מהאיבר הקולט, העין, ועד למוח.

נתחיל בהכרת מבנה העין ונעבור לתיאור המסלול שעובר המידע הראייתי במוח: דרך תצלובת הראייה והתלמוס ועד לקורטקס הראייתי הראשוני. תיאור מסלול העברת המידע יבסס ויעמיק את ההבנה של מעבר האות העצבי שהוצגה לראשונה בפרק "עצבים חשופים".

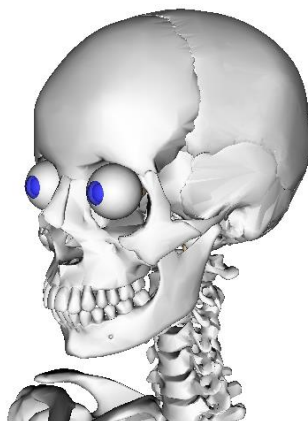
העין

איבר קטן אך חשוב ביותר, שהוא הכלי המתווך את החוש הכי מפותח שלנו, כלי מרכזי שעליו אנו מבססים במידה רבה את תמונת העולם שלנו.

עיניים יכולות להיות שונות במראה החיצוני שלהן, אך לכולן אותו מבנה בסיסי:



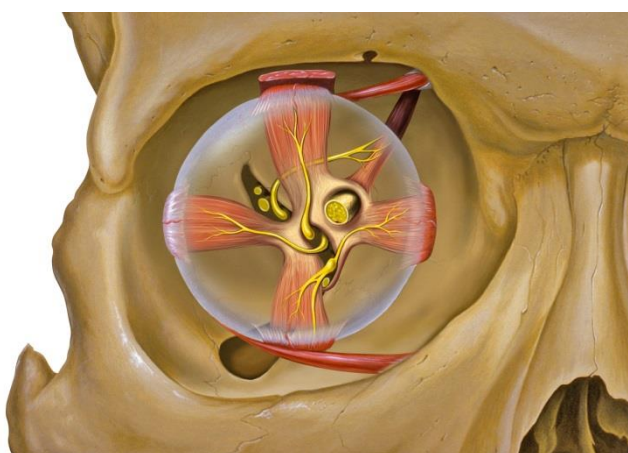
חשוב לציין שהעין היא מבנה כדורי לחלוטין, שתמונה הקודמת מציגה רק חלק קטן ממנו. כך נראה גלגל העין בתוך ארובת העין:



By Images was generated by Anatomography, Life Science Databases(LSDB). [\[CC BY-SA 2.1\]](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.1/) via Wikimedia Commons

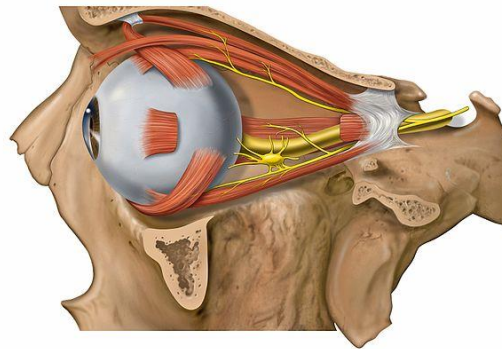
כאמור, העין היא איבר חשוב ולכן יש סביבה רכיבים שונים שמגנים עליה ומשפרים את תפקודה:

- (א) ארובת העין – עצמות המגינות על גלגל העין מפני פגיעות.
- (ב) שרירי העין – מאפשרים את התנועה המהירה והמדויקת של העיניים, המאפשרת להביט לכיוונים שונים ולשנות את כיוון המבט במהירות וביעילות.



"Eye orbit anterior" by Patrick J. Lynch, medical illustrator - Patrick J. Lynch, medical illustrator. Licensed under CC BY 2.5 via Wikimedia Commons

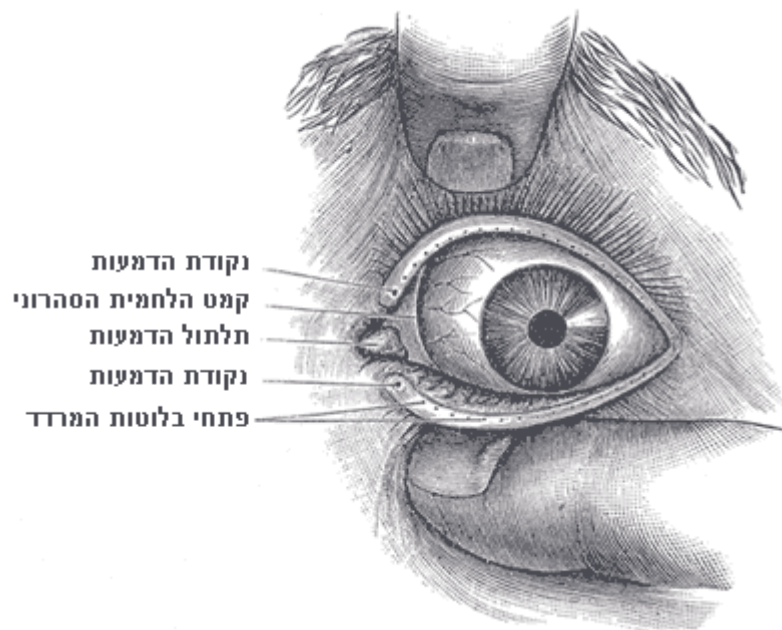
בתמונה לעיל רואים את ארובת העין (המבנה הגרמי (עצם) שבתוכו נתונה העין) וכן את השרירים (הסיבים האדומים), שמאפשרים המון דרגות חופש לתנועת העין. האדם מסתכל לפנים, רואים את עין ימין.



By Patrick J. Lynch, medical illustrator (Patrick J. Lynch, medical illustrator) [CC BY 2.5], via Wikimedia Commons

בתמונה לעיל רואים את אותם מבנים כמו בתמונה הקודמת, אבל הפעם בפרופיל – האדם מסתכל שמאלה, רואים את עין שמאל.

(ג) עפעפיים ובלוטת הדמעות – שומרים מפני יובש ונזקים.



בתמונה לעיל רואים את העפעפיים (עפעף עליון ועפעף תחתון).

העפעפיים וכן הריסים המחוברים אליהם מסייעים בהגנה על העין מפני רוח, כניסת אבק וכולי. בלוטת הדמעות (לא נראית בתמונה) נמצאת מתחת לעפעף העליון ומפרישה דמעות כל הזמן. הדמעות נמרחות על פני העין בזמן המצמוץ ומספקות סיכוך והזנה לעין. הדמעות מתנקזות דרך נקודות הדמעות ודרך צינוריות מגיעות לשק הדמעות ובהמשך לחלל האף. כאשר בוכים מיוצרת כמות גדולה של דמעות, אשר לא כולה מספיקה להתפנות, ואז דמעות נוזלות החוצה מהעין. במקביל, הכמות שכן מתפנה, נוזלת דרך האף.

הרחבה מעניינת בנושא בכי ודמעות



ניזכר בקצרה בתפקיד העין:

בעין יש קולטנים שרגישים לאור. כאשר פוגעת בהם קרן אור הם מתרגמים את המידע לאות עצבי. האות העצבי עובר עיבוד במוח וכך מתקבלת חוויית הראיה.

אנימציה: <http://go.ynet.co.il/InteractiveClass/Projects.aspx?Project=3006&Cat=1063>



באמצעות תיאור של מבנה העין נעמיק את ההבנה לגבי איבר חישה והתאמתו לחישה בתנאים מגוונים.

המבנה של העין מאפשר קליטת אור בצורה משוכללת ויעילה, שמתאימה לתנאי תאורה שונים ולראייה למרחקים שונים.

נתמקד ב-3 פונקציות שהעין האנושית מסוגלת לבצע בזכות המבנה שלה:

1. ויסות האור החודר לעין – האישון
2. חדות הראייה – העדשה
3. קליטת האור – הרשתית

1. ויסות האור החודר לעין

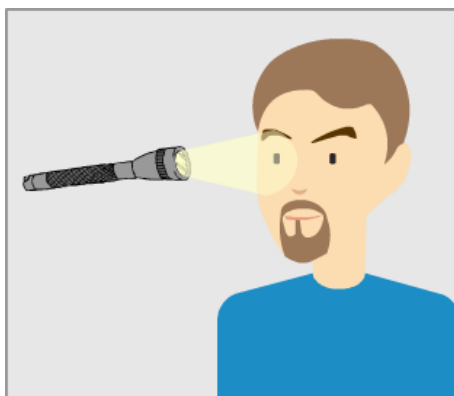
מדוע אנחנו מסוגלים כשאנחנו יוצאים מן הקולנוע?
לפני שהתלמידים ישיבו על השאלה נכיר את רפלקס האישון.



נתחלק לזוגות, כל אחד יביט אל עיני בן זוגו, נחשיך את הכיתה ולאחר 10 שניות נדליק את האור. אפשר לחזור על ההתנסות.

התלמידים נדרשים לתאר במילים או בסרטוט את השינויים שהם ראו בעיני בן הזוג בעקבות שינויי האור.

לחלופין, אפשר לערוך את ההתנסות באמצעות פנסים: **כל מה שצריך לעשות הוא להאיר על עין אחת בפנס עם אלומה ממוקדת. אפשר להסביר לתלמידים, אם צריך, שהבדיקה אינה מסוכנת ואינה מזיקה, פרט לחוסר נוחות כל בעקבות הסנוור (כמובן לא לבצע עם פנסים חזקים במיוחד, ובשום אופן לא עם לייזר!!!).**



אז למה מסתנוורים כשעוברים במהירות מסביבה חשוכה לסביבה מוארת?

במרכז החלק הצבעוני בעין (**הקשתית, IRIS**) ישנו אזור שחור שנקרא **אישון (PUPIL)**. האישון הוא למעשה חור שדרכו נכנס האור אל תוך גלגל העין. התרחבות האישון היא למעשה גדילה של החור בעין, כך שנכנס דרכו יותר אור.

כאשר תנאי התאורה משתנים, העין מתאימה את עצמה לכך בעזרת הרחבה או צמצום של האישון. המנגנון שמאפשר לאישון להתכווץ ולהתרחב נועד לאפשר לעין להתמודד עם תנאי תאורה שונים, ולאפשר לנו לראות ביום וגם בלילה – בחושך האישון גדל ומאפשר כניסה מירבית של מעט האור הקיים, ואילו במצב מואר האישון מצטמצם לגודל שמאפשר כניסת אור שמספיקה לצורך ראייה. (שימו לב: לא כל החיות בעלות העיניים רואות גם ביום וגם בלילה!).

לצמצום האישון בתגובה לאור חזק, קוראים **רפלקס האור של האישון**.

באיזה מהנושאים הקודמים הזכרנו את תופעת כיווץ והרחבת האישונים?

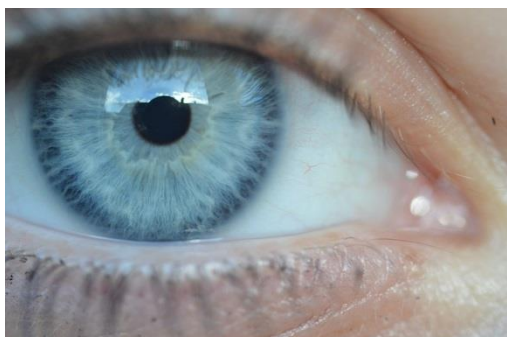


תשובה: הזכרנו זאת בשיעור הכרת מערכת העצבים, כשדיברנו על מערכת העצבים האוטונומית (החלק במערכת העצבים ההיקפית שפעיל במצבי fight or flight ובמצבי רגיעה). כפי שראינו, במצבי חירום מערכת העצבים האוטונומית מגיבה במהירות באיברים שונים, ומייצרת התנהגות שמתאימה ללחימה או לבריחה, בין היתר הרחבת אישונים (כדי לראות כמה שיותר). מכאן אנו למדים שמצב האישון יהיה **בהתאם למצבים של לחץ או מנוחה, בשילוב עם מצב התאורה** (ובשילוב עוד גורמים רבים שלא ניכנס אליהם).

שאלת הבנה: הביטו בשתי התמונות הבאות.



1. באיזו מביניהן האישון מתאים לתנאי תאורה חשוכים? (**תשובה: בתמונה הימנית**)
2. האם האישון בתמונה הימנית יכול להימצא בתנאי תאורה גבוהים? (**תשובה: כן, בין היתר במצב לחץ**).



"Dilated pupil.gk" by grendellkhan and Lady Byron - Own work. Also available from my flickr.. [Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)



בדיקת אישון העין מוכרת מסדרות טלוויזיה ומסרטים, בדרך כלל בהקשר של מצב חירום שבו המטופל מחוסר הכרה... התייחסות קצרה לנושא תוכלו למצוא בתיבת ההעשרה שבהמשך המערך.



אופן ביצוע הבדיקה, והסיבה לביצועה על ידי נוירולוגים:

<http://brainconnection.brainhq.com/testing-the-brain-what-neurological-exams-can-tell-us-about-ourselves>



העשרה

- צבע העיניים:
 - http://www.goleango.com/show_calculator_heb.php?cat_id=10&art_id=116
 - http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A6%D7%91%D7%A2_%D7%A2%D7%99%D7%A0%D7%99%D7%99%D7%9D
- אישונים רחבים – סמל יופי בעולם העתיק:
 - http://en.wikipedia.org/wiki/Atropa_belladonna#Cosmetics

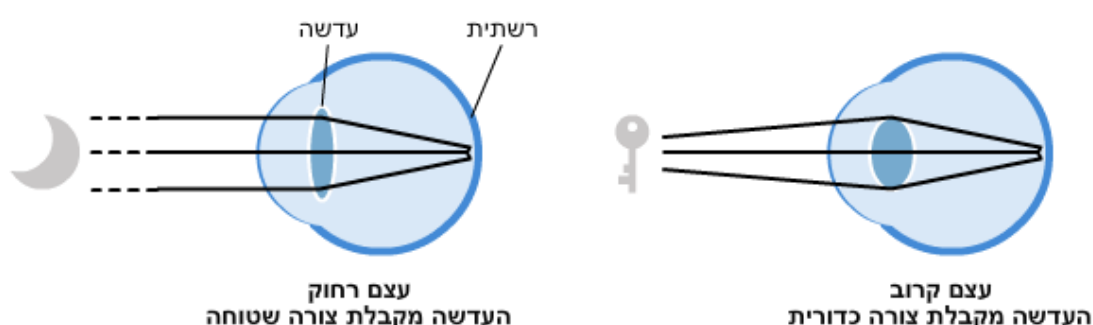
הצמח "אטרופה בלה-דונה" מכיל חומר הפועל כחסם של הניורטרנסמיטור אצטיל כולין. אם מטפטפים מן החומר הזה על העין הוא מונע את פעולת הניורטרנסמיטור אצטילכולין, שגורם לכיווץ האישון (מיוזיס). כתוצאה מכך מתקבל האפקט ההפוך של הרחבת האישון (מידריאזיס). בעולם העתיק נשים נהגו להרחיב את אישוניהן כיוון שהדבר היה נחשב כסמל יופי (מי שהיה בבדיקת עיניים יודע שרופא העיניים לעתים מזליף חומר דומה וכתוצאה מכך אחר הבדיקה קשה לנו למקד מבט ואנו רואים מטושטש... אולי מדובר בעקרון ההכבדה!). משמעות השם "בלה-דונה" באיטלקית הוא אישה יפה.
- מדוע הרופא בודק אישונים: יש סיבות רבות מאוד לבדוק את התגובה של האישון לאור, תמיד חשוב להבין את סיפור המסגרת כדי להגיע לאבחנה.
 - לפניכם כמה דוגמאות: (1) במצבים מסוימים נראה אישונים קטנים מאוד, המכונים גם אישוני סיכה. מצב זה אופייני באנשים שצרכו חומרים דמויי אופיום ועשויים להימצא מחוסרי הכרה.
 - (2) אישונים שאינם מגיבים לאור – הדבר יכול לבוע ממוות מוחי (מצב שבו הלב עשוי להמשיך לפעול לפרק זמן, אך המוח חדל מלתפקד). סיבה נוספת יכולה להיות עיוורון, אז לא יגיע אות סנסורי שיגרום לתגובה המוטורית.
 - (3) אישונים בצורה לא שווה בין שתי העיניים ושאינם מגיבים לאור (באדם בהכרה) יכולים להופיע בסיבוך עצבי של מחלת העגבת. אישונים אלה קרויים גם "אישוני ארגיל רוברטסון".

2. חדות הראייה

ראיית 6/6 – מה זה אומר?

מי לא שמע את המושג "רואים 6/6"? אנו יודעים שהכוונה היא שהראייה טובה, אך לא כולם יודעים שהכוונה היא שהצלחנו לראות מ-6 מטרים מה שמצופה מאדם עם ראייה טובה. דוגמה לציון לא תקין הוא למשל 6/24, שמשמעו שהאדם הצליח לראות מ-6 מטרים רק את מה שאדם עם ראיית 6/6 היה רואה ממרחק 24 מטר.

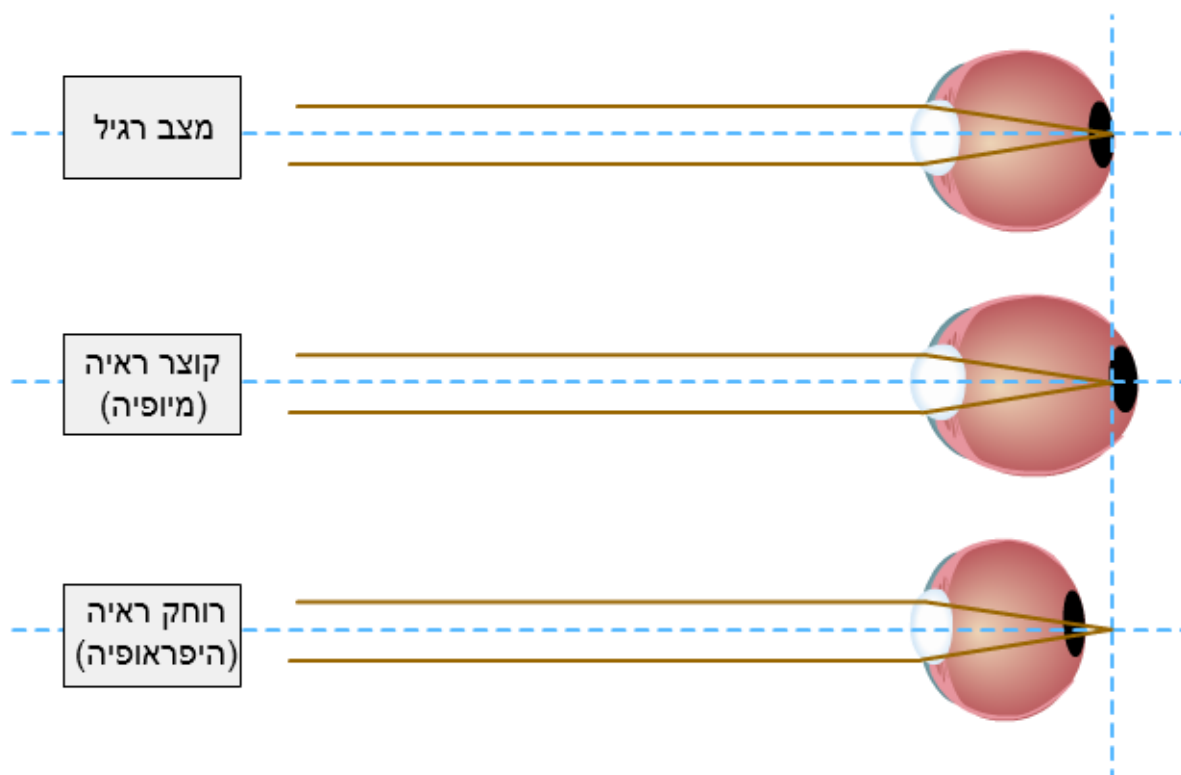
כדי להבין את ההסבר הפיזיולוגי לתופעה כזו, נתאר את המסלול של האור מרגע כניסתו לעין דרך חור האישון:



האיור מציגה חתך צידי של עין שמסתכלת שמאלה.

האור המוחזר מעצמים שונים נכנס לעין דרך חור האישון, ומתמקד בחלק הפנימי האחורי של גלגל העין. שימו לב כיצד העדשה מתאימה את עצמה באופן שונה למיקוד עצמים רחוקים (ירח) לעומת עצמים קרובים (עלה).

כדי שהתמונה תהיה חדה, המיקום של מיקוד קרני האור צריך להתקבל על הרשתית, החלק המסומן בשחור בדופן הפנימי האחורי של גלגל העין. בעיות של קוצר ראייה או רוחק ראייה מתרחשות כאשר המיקוד של קרני האור לא נופל במקום המתאים.



קוצר ראייה מתבטא בכך שעצמים קרובים נראים בבירור, בעוד שעצמים רחוקים נראים מטושטשים. יש לך מגוון סיבות, אך בכולן האור שנכנס אל העין נשבר והדמות שנוצרת אינה ברשתית אלא מעט לפני (כפי שמופיע באיור המצורף). מצב הפוך בו הדמות היא אחרי הרשתית נקרא **רוחק ראייה (היפראופיה)**.

פשוט וגאוני - עקרון הפעולה של משקפיים: מרכז או פיזור של קרני האור!

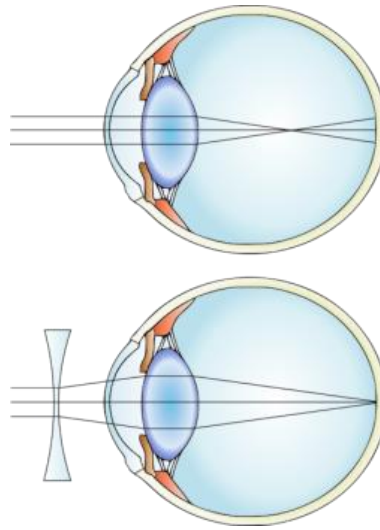
סרטון שמראה כיצד עדשה ממקדת קרני אור:
https://www.youtube.com/watch?v=GbxWK6bwt_A



שאלת הבנה, למי שיועד קצת אופטיקה: ידוע כי עדשה קעורה מפזרת את אלומת האור, ועדשה קמורה מרכזת את אלומת האור. לפי מידע זה, איזו עדשת משקפיים תתקן קוצר ראייה ואיזו עדשה תתקן רוחק ראייה? קמורה/קעורה

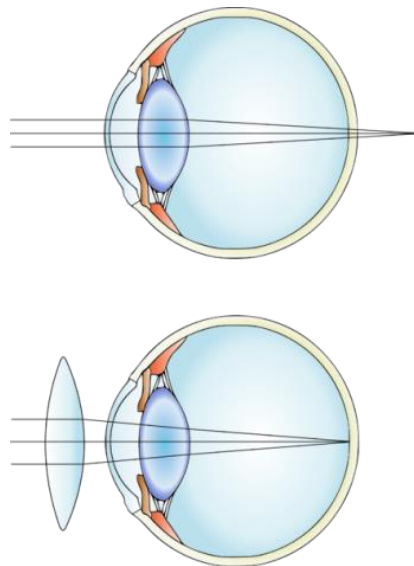
תשובה: קוצר ראייה – עדשה מפזרת קעורה, ואילו ברוחק ראייה עדשה ממקדת קמורה (כפי שמודגם בתרשים המצורף).

קוצר ראייה:



By Gumenyuk I.S. (Original artwork made especially for Wikipedia) [CC BY-SA 3.0], via Wikimedia Commons

רוחק ראייה:



By Gumenyuk I.S. (Own work) [CC BY-SA 4.0], via Wikimedia Commons

3. קליטת האור

האור שניכנס דרך האישון חוצה את החומר השקוף הממלא את גלגל העין ופוגע בשכבת תאים הפרוסה על גבי הדופן הפנימי של גלגל העין, הנקראת **רשתית (RETINA)**.

הרשתית מכילה כמות עצומה של **קולטני אור** שקולטים את האור וממירים את המידע ל"שפה שהמוח מבין" – אותות חשמליים, או בשפת מדעי המוח: פוטנציאלי פעולה.

האותות החשמליים עוברים **בעצב הראייה** – צרור אקסונים של נוירונים – ונכנסים למוח.

תופעת הכתם העיוור: התחלנו את השיעור בכך שטענו שהעין היא איבר מתוחכם ומופלא, אך ההדגמה הבאה תגלה לנו שאילו היה אפשר לתכנן את מבנה הרשתית מחדש אולי היינו עושים בו כמה שינויים...



מציאת הכתם: ראשית נחלק את התלמידים לזוגות כל זוג מקבל דף A4 לבן שבצדו השמאלי מצויר X ובצדו הימני נקודה (ראו איור לדוגמה למטה). על אחד מבני הזוג (הנבדק) לכסות את עין שמאל ולהתמקד ב-X בעינו הימנית. על הבודק להחזיק את הדף במרחק של חצי מטר מן הנבדק ולקרוב אותו אט-אט. הנבדק מתמקד ב-X בלי להזיז את עינו הפקוחה, אך מבחין בנקודה בפריפריה של שדה הראייה. כשהדף במרחק מסוים מן הנבדק הנקודה נעלמת וכשממשיכים לקרב את הדף אל פניו היא מופיעה בשנית.

הנחיות לתלמידים: התחלקו לזוגות, כשכל זוג מקבל דף עם שני סימונים. על אחד מבני הזוג להחזיק את הדף, ועל השני להביט בו. הוראות לתלמידים המחזיקים: עליכם להחזיק את הדף כך שקל ל"מביטים" לראות את הסימונים שעליו, הכוכבית צריכה להיות מול המביטים, והנקודה לימנים. התחילו מלהחזיק את הדף כחצי מטר מן ה"מביט/ה", וקרבו את הדף לאט-לאט.

הנחיות לתלמידים המביטים: כסו בעזרת ידכם את עין שמאל, ובעין ימין התמקדו בכוכב שעל הדף, ושימו לב שאתם רואים את הנקודה בראייה ההיקפית שלכם. הנקודה אינה צריכה להיות בהכרח ברורה, אבל אתם צריכים לראות אותה. הישארו ממוקדים בכוכב כשחבריכם ה"מחזיקים" מקרבים את הדף אליכם. במרחק מסוים תיעלם הנקודה.

- ברגע שהנקודה נעלמת – ציינו זאת, והעריכו את המרחק שלכם מן הדף.
- מה קורה עם הנקודה כשחבריכם ממשיכים לקרב את הדף?

החליפו תפקידים וחזרו על התהליך.

- האם לשניכם נעלמה הנקודה?
- האם זה קרה באותו המרחק?





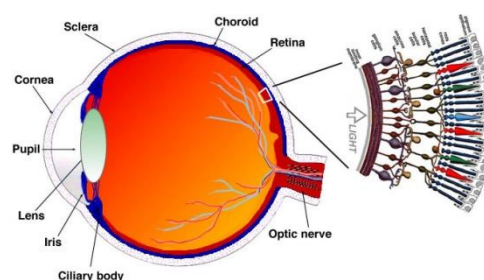
בסוף מסמך זה מצורף דף מתאים עם הסימונים המדוברים.

מבחן זה מאפשר לנו להבין שיש אזור מסוים בשדה הראייה בכל אחת מן העיניים שלנו שאינו מתפקד. בעצם אם חושבים על זה בכל רגע נתון היינו צריכים לראות בשדה הראייה שלנו שני כתמים שחורים (אחד בכל עין).

כדי להבין את התופעה המוזרה שנקראת בשם הכתם העיוור, יש להעמיק מעט במבנה הרשתית.

כאמור, הרשתית היא שכבת תאים דקה המצויה בחלק האחורי של גלגל העין. תפקידה הוא קליטת והמרת האור לאותות עצביים.

לרשתית יש מבנה בעל 3 שכבות:



מקור תמונה: <http://webvision.med.utah.edu/imageswv/Sagschem.jpeg>

בצד ימין של התמונה רואים חתך ברשתית, שבו מופיעות 3 השכבות.

ניקח בחשבון שכדי לייצא את המידע לכיוון המוח צריך מערך של חוטים שיוצא מהרשתית, בהם זורם המידע העצבי אודות הופעה של אור. הסיבים שיוצאים מהרשתית ויוצרים בהמשך את **עצב הראייה** – נמצאים דווקא בשיכבה הפנימית של הרשתית, הפונה אל מרכז הכדור. כדי לצאת מהעין חייב עצב הראייה לחצות את שכבות הרשתית. בנקודה זו אין כלל קולטני אור ולכן זו **נקודה בה אנו לא רואים** או בשמה השני – **הכתם העיוור!**

מקרה הכתם העיוור מלמד אותנו שהעין היא מכשיר. כמו כל מכשיר יש לה מבנה שמשרת את התיפקוד שלה, ושמקנה לה שורה של יתרונות וגם כמה חסרונות.

שאלת השאלות: מדוע אנחנו לא חווים את הכתם העיוור בחיי היומיום?
 תשובה: משום שהמוח משלים את התמונה בעזרת מידע על אור בסביבת הכתם העיוור. המוח מניח שהאזור העיוור מכיל דברים שדומים לסביבה שלו.
 הדבר מלמד אותנו שעל אף שהעין חשובה באיסוף המידע החושי, מי שבאמת מייצר את החוויה החושית הוא העיבוד המוחי. במציאות יש לנו כתם עיוור אך בחוויה אין לנו אותו, וזה נקבע ע"י המוח.



סרטון לסיכום ההתייחסות לעין - כיצד התפתח מבנה כה מורכב ומשוכלל?
<http://ed.ted.com/lessons/the-evolution-of-the-human-eye-joshua-harvey>

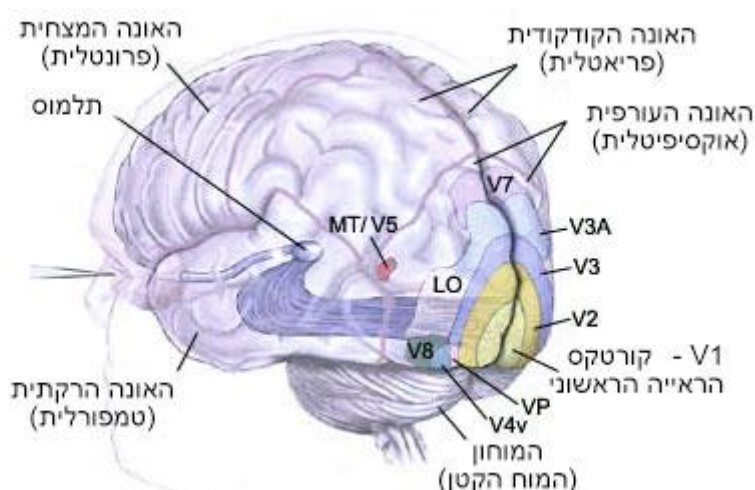
מסלול הראייה

הרשתית ממירה את המידע הראייתי למידע עצבי – אותות חשמליים שנעים לאורך הניורונים של עצב הראייה. **עצב הראייה** הוא אוסף של אקסונים ששייכים לניורונים מהרשתית. זוהי אלומת סיבים שדרכם עובר המידע העצבי מהעין למוח.



מבחינה נוירואנטומית, עצב הראייה נחשב ל חלק מהמוח.

נתאר כעת את מסלול זרימת האות העצבי במוח. מבט כללי על המסלול לפני שאנחנו נכנסים לפרטים:



Copyleft: http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cr/a_02_cr_vis/a_02_cr_vis.html

בתמונה: מסלול הראייה – מבט על המוח מאחור ומעט מן הצד. בחלק השמאלי אפשר לראות את האף ואת גלגלי העיניים. מן העיניים יוצא עצב הראייה, ומגיע אל התלמוס (אל גרעין ה-LGN שבתלמוס, המופיע בתרשים). משם המידע עובר בסיבים (כחולים) את האונה העורפית, ומגיע אל קורטקס הראייה הראשוני (מסומן בתרשים כ-V1). עיקר העיבוד הראייתי מתקיים בקורטקס.

כדי להבין לעומק את העברת המידע נתחיל בתיאור המושג **שדה ראייה**.

שדה ראייה = אזור בעולם שנמצא בתחום הקליטה של העין, כלומר שהעין קולטת אור שמגיע ממנו.

הרשתית, שקולטת את האור מהסביבה וממירה אותו לאות עצבי, מאורגנת כך שכל נקודה בה קולטת אור מנקודה בשדה היוזאלי הכללי. אזורים סמוכים על הרשתית קולטים אור מאזורים סמוכים בעולם.

דוגמאות:



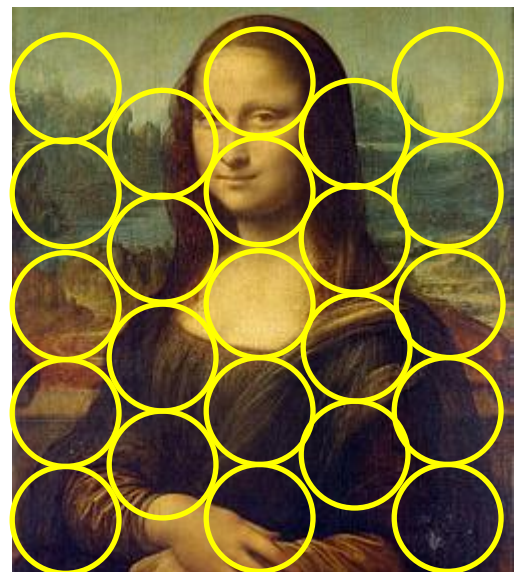
(1) כאשר אנו מסתכלים על האיור הבא:

אזור מסוים ברשתית קולט את החלק הכחול ואזור סמוך לו קולט את החלק הצהוב.

(2) כאשר אנו מסתכלים על התמונה הבאה:



אזורים שונים ברשתית קולטים חלקים בודדים קטנים מהתמונה:

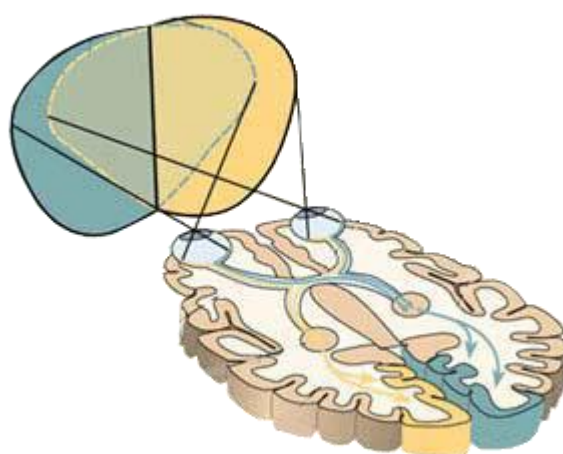




במציאות, שדות הראייה חופפים, כך שאין מרווחים בין שדה לשדה. כמו כן, השדות קטנים בהרבה ממה שמוצג בתמונה.

לסיכום – ניתן לומר שחלקים קטנים ברשתית קולטים מידע מחלקים שונים בעולם, ולכל חלק כזה אנו קוראים שדה ראייה.

כל אחת מהעיניים רואה כמעט את אותו שדה הראייה כללי:

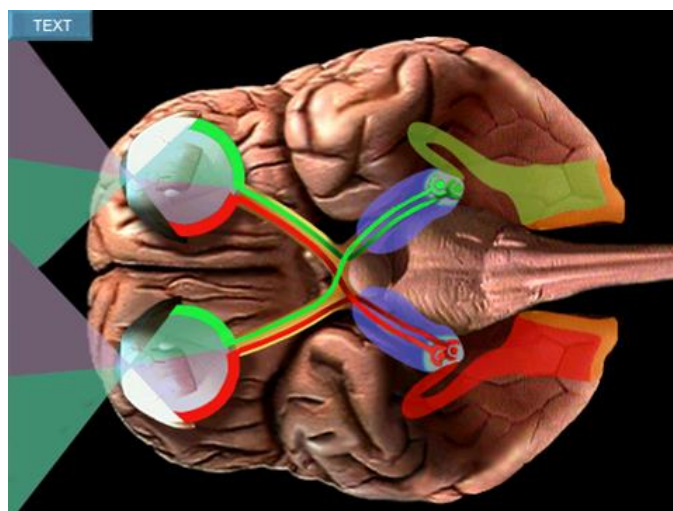


Copyleft: http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cr/a_02_cr_vis/a_02_cr_vis.html

בתמונה רואים חתך של המוח ואת העיניים בקדמת הראש. לפני העיניים רואים את שדה הראייה. לשדה הראייה חלק ימני (צהוב) וחלק שמאלי (ירוק). שתי העיניים קולטות גם את השדה הימני וגם את השדה השמאלי, ניתן לראות אזור החפיפה בין העיניים. אולם, בשוליים ישנם אזורים ששייכים רק לשדה הראייה של אחת העיניים.

אם כך, כל עין קולטת מידע גם משדה הראייה הימני וגם משדה הראייה השמאלי. המידע מכל נקודה בשדה הראייה נקלט על ידי קבוצה קטנה של נוירונים ועובר באקסונים אל המוח.

בתמונה לעיל ניתן להבחין באזור שבו מצטלבים הסיבים, זוהי **תצלובת הראייה (או בלועזית – הכיזמה האופטית)**. באזור זה ישנה הצטלבות של האקסונים שמובילים מידע משדה הראייה שלה אל הצד השני; כלומר עבור עין ימין כל האקסונים שנושאים מידע שהגיע משדה הראייה הימני עוברים לצד השני בתצלובת הראייה, ולהיפך.



Source: http://www.floiminter.net/?page_id=176

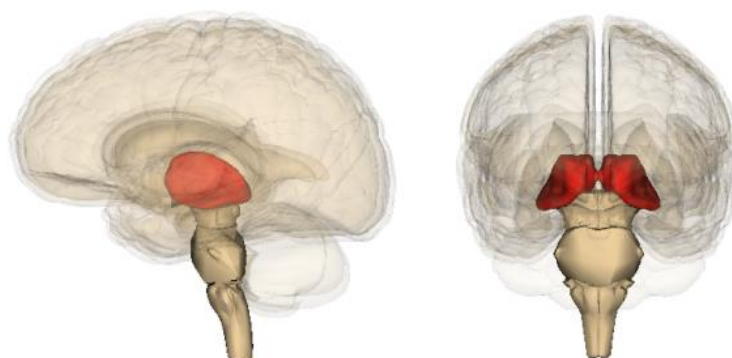
איור דומה לקודם, אולם הפעם במקום חתך של המוח אנו רואים מבט על החלק התחתון שלו. העיניים ממוקמות מתחת לקדמת המוח. לכל עין שדה ראייה ימני (הפעם ירוק) ושמאלי (סגול). שימו לב: החלק הימני של שדה הראייה נופל על החלק השמאלי של הרשתית, ולהפך. מכל עין יוצאים אקסונים המכילים מידע על החלק הימני של שדה הראייה (ירוק) ואקסונים אחרים המכילים מידע על החלק השמאלי של שדה הראייה (אדומים).

בסופו של דבר כל האקסונים שמביאים מידע משדה הראייה הימני מגיעים לצד שמאל של המוח, וכל האקסונים שמביאים מידע מצד שמאל מגיעים לצד ימין של המוח.

כשעסקנו במוטוריקה (פרק "לזוז בלי לחשוב"), הדגשנו שההמיספרה הימנית שולטת על צד שמאל של הגוף ולהיפך. כעת אנו מדברים על חישה (סנסוריקה), והדבר באופן עקרוני ברוב המקרים דומה. בכל אופן, שימו לב שבמערכת הראייה קורה דבר קצת אחר: לא עין ימין מעבירה מידע להמיספרה שמאל, אלא **החלק הימני של שדה הראייה מעביר מידע להמיספרה שמאל**. הכוונה היא שמכל אחת מהעיניים החלק הימני של שדה הראייה מגיע לעיבוד בצד השמאלי של המוח, ולהיפך. כל הנושא הזה יילמד בהרחבה בהמשך, ואין צורך להיכנס להסבר זה כעת.



התחנה הבאה במסלול היא התלמוס.



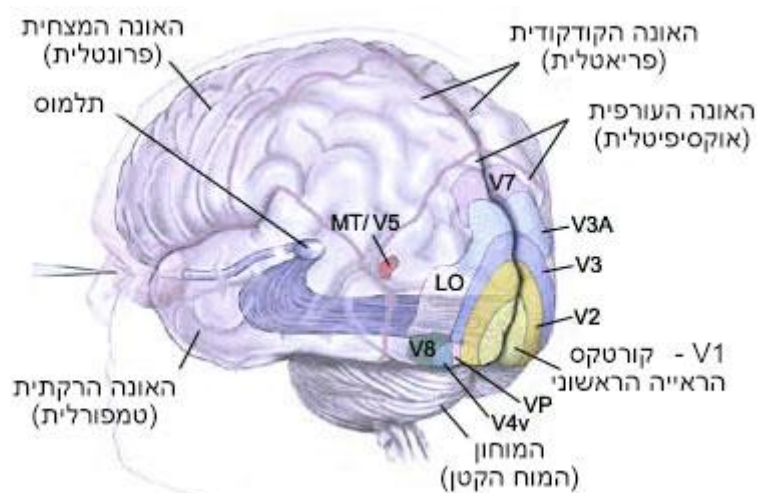
Images are generated by Life Science Databases(LSDB). - from Anatomography, website "Thalamus image" maintained by Life Science Databases(LSDB). You can get this image through URL.

מתפרסם לפי רישיון CC BY-SA 2.1 דרך ויקישיתוף.

בתמונה הימנית: מוח מסתכל ישירות אלינו. **בתמונה השמאלית:** מוח מסתכל שמאלה (אפשר לזהות לפי המיקום של הצרבלום מאחור). התלמוס צבוע באדום (הוא לא באמת אדום במציאות).

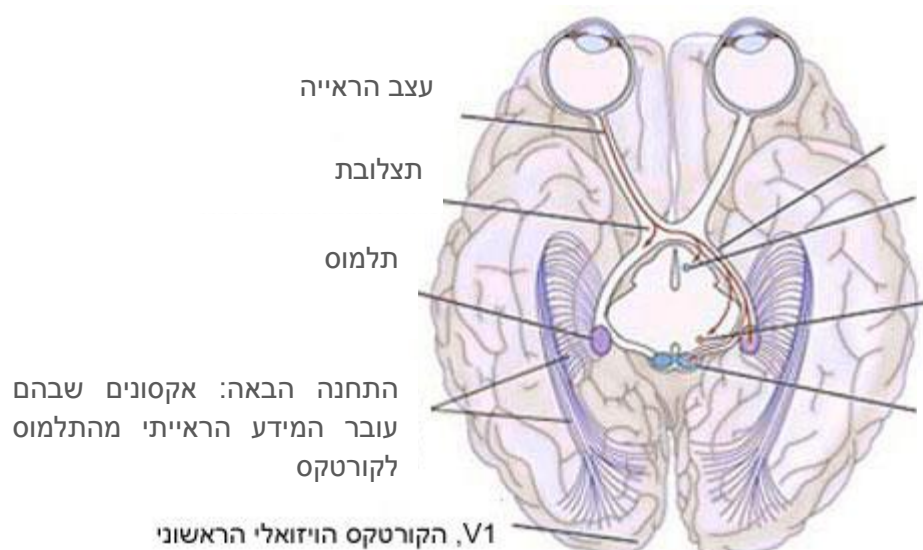
התלמוס הוא **תחנת ממסר** חשובה במוח. הוא מקבל מידע מהחושים, ומוסר מידע לקורטקס. בנוסף, הוא מתווך תהליכים שקורים בחלקים שונים של הקורטקס. באופן כללי אנחנו קוראים לו "תחנת ממסר" כי הוא מקבל קלטים מהמון מקומות, לכן יש לו יכולת להתחשב בהרבה תהליכים שקורים בו-זמנית, והוא שולח קלטים להמון מקומות, כך שהוא משפיע באופן נרחב מאוד על פעילות המוח.

בשלב זה אפשר לחזור לתמונה מתחילת השיעור ולהזכיר מאיפה המידע הגיע ולכן הוא הולך:



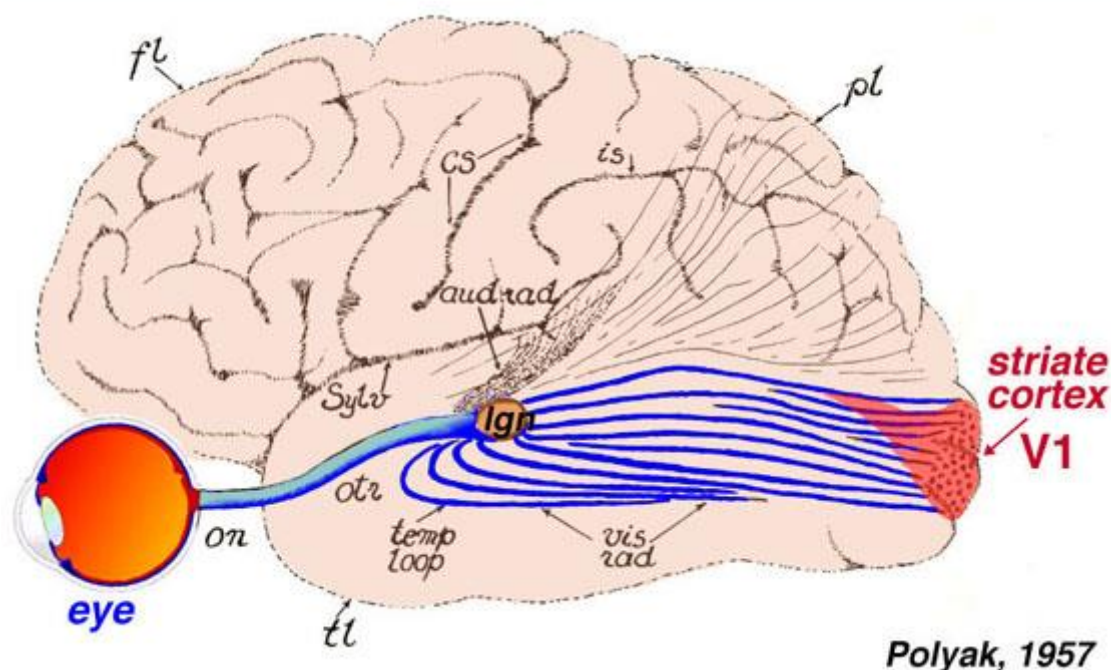
Copyleft: http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cr/a_02_cr_vis/a_02_cr_vis.html

תמונה נוספת:



Copyleft: http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cr/a_02_cr_vis/a_02_cr_vis.html

מהתלמוס, המידע הראייתי נמסר אל **קורטקס העיבוד הראייתי הראשוני, שנקרא גם V1** (PRIMARY VISUAL CORTEX). השם V1 הוא קיצור של V1, כלומר התחנה היוזאולית הראשונה בקורטקס:



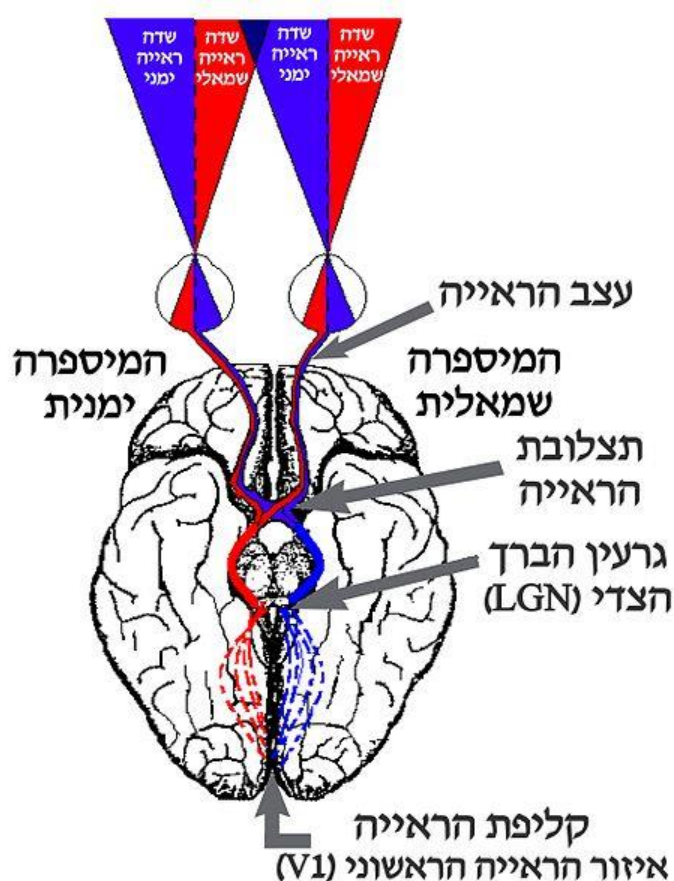
Source: <http://webvision.med.utah.edu/book/part-ix-psychophysics-of-vision/the-primary-visual-cortex/>
Copyright © 2015 Webvision: Attribution, Noncommercial, No Derivative Works Creative Commons license.

בתמונה לעיל רואים מוח שמביט שמאלה. המסלולים שמצויירים עוברים בעומק המוח. מהעין מוביל העצב האופטי מידע אל התלמוס (מופיע בתמונה כ-LGN, שזה החלק הספציפי בתלמוס שקולט את המידע הזה, אבל זה לא חשוב לעניינו). מהתלמוס המידע רץ אחורה ל-V1.



נחמד להצביע על העובדה שלמרות שהעיניים נמצאות בקדמת המוח, העיבוד הראייתי הראשוני מתרחש דווקא בחלק האחורי של המוח.

תמונה נוספת שמתארת את מעבר המידע. הפעם רואים את המוח במבט תחתון, במנח של אדם המישייר מבטו לפניו ואנו מסתכלים עליו מלמטה.



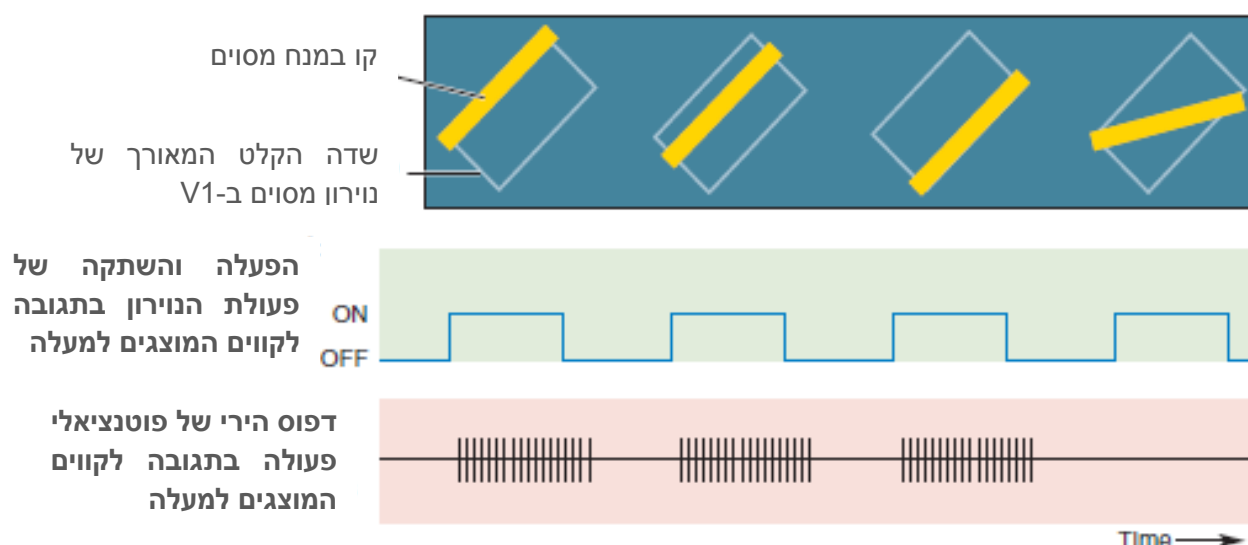
"Constudeyepath1" Original uploader was Yoavabadi at he.wikipedia - Transferred from he.wikipedia
מתפרסם לפי רישיון CC BY-SA 3.0 דרך ויקימדיה

הקורטס הראייתי הראשוני, V1

המידע הראייתי עובר מהעין דרך תצלובת הראייה והתלמוס ומגיע אל הקורטקס. בקורטקס המידע עובר בין תחנות עיבוד שונות, שכל אחת מהן מומחית בעיבוד אלמנטים מסוימים של הראייה: אזור המזהה צבעים, אזור המזהה פרצופים, אזור המזהה תנועה וכו'. אנו נתחיל כעת בתיאור של V1, שמזהה אלמנטים פשוטים מאוד של שדה הראייה – קווים.

עיבוד ראשוני של המידע החזותי מתבצע על ידי תאים ב-V1

בניגוד לתאי הרשתית, **שדה הקלט** שלהם **עגול** והם מגיבים לנקודות, לתאים באזור הראייה הראשוני יש שדה קלט **מוארך**, ולכן הם מגיבים בצורה הטובה ביותר לגירויים חזותיים ארוכים, כמו **קווים**. פירוש הדבר שכל תא "רואה" אזור במרחב שיש לו צורה של קו. תאים שונים רגישים לקווים במקומות ובמנחים שונים, כך שכל סוגי הקווים וכל המיקומים האפשריים שלהם יכולים לקבל ייצוג במוח.



בתמונה רואים קווים במנחים שונים, ואת תגובתו של נוירון מסוים ב-V1 להופעתם. כל עוד מופיע קו אור בתוך שדה הראייה של הנוירון, הוא יורה פוטנציאלי פעולה. אם מופיע קו אור בשדה הראייה, אך הוא אינו במנח המתאים, הנוירון לא יורה. ב-V1 יש נוירונים רבים וכל אחד מהם רגיש למנח מסוים.

ניסוי מוכר מאוד בהקשר הזה (סרטון 1, ראו בהמשך) הוא ניסוי שעשו המדענים דייוויד הובל וטורסטן וויזל (Hubel D.H. & Wiesel T.).

היובל וויזל החדירו לתוך קורטקס V1 של חתול אלקטרודה דקיקה (מיקרו-אלקטרודה), שיכולה להקליט את הפעילות החשמלית של תא המצוי בקרבתה. פעילותו של תא פשוט ב-V1 הוקלטה בעת שהחתול צפה בקו אור שהוקרן על מסך לפניו. בתוך כמה עשרות מילישניות המידע הראייתי (תמונת הקו) הגיע אל הקורטקס הראייתי הראשוני, ונוירון בקרבת האלקטרודה ירה פוטנציאלי פעולה. לצורך זיהוי קל של ירי פוטנציאל פעולה, התגובה העצבית של הנוירון הומרה לגלי קול, כך שרצף פוטנציאלי הפעולה נשמע כ"מטח יריות". בשלב הראשון של הניסוי אותר וסומן שדה הקלט המעורר של הנוירון שהוקלט, ובכל פעם כשהוקרן גירוי של קו אור באוריינטציה ספציפית, הנוירון הגיב בפרץ פוטנציאלי פעולה.



רטון 1: <http://www.youtube.com/watch?v=8VdFf3egwfg> (עד 3:08)

הדרכה למורה – מה רואים בסרטון בכל רגע:

- **00:00** מציגים קו אור לחתול שיש לו אלקטרודה מושתלת ב-V1 שמודדת פוטנציאל חשמלי ומזהה פוטנציאלי פעולה. הקולות ששומעים מבטאים ירי של פוטנציאלי פעולה. הערה: הירי עצמו לא עושה את הקולות, אלא מכשיר שמחובר לאלקטרודה ומשמיע קול בכל פעם שנרשם פוטנציאל פעולה.
- **00:22** החוקר מסמן את הקו כדי שנזכור איפה הוא היה כשהנירון הגיב (שדה הקלט של הנירון). עכשיו החוקר יזיז את הקו ונבדוק אם הנירון ימשיך להגיב.
- **00:34** הקו יצא מחוץ לשדה הקלט של הנירון, והוא הפסיק לירות פוטנציאלי פעולה.
- **00:44** יציאה מגבולות שדה הקלט של הנירון מהצד השני.
- **00:56** החוקר מסמן במשולשים את האזורים שבהם הנירון לא יורה, מחוץ לשדה הקלט שלו.
- **01:31** ניסיון להציג לנירון קווים במנחים שונים – הנירון לא יורה.
- **02:18** ניסיון להציג אור בשטח גדול – הנירון לא מזהה קו ולכן לא יורה.
- **02:37** הנירון יורה כאשר בשדה הקלט שלו יש אור ומסביבו חושך – זהו קו!

ישנם ב-V1 ניורונים שרגישים לדברים נוספים פרט למנח הקו, למשל לתנועת הקו בכיוון מסוים. ניורון כזה יירה כאשר יופיע בשדה הראייה שלו קו במנח מסוים שגם נע לכיוון מסוים. דוגמה נוספת היא ניורונים שרגישים לקצוות הקו, והם יירו כאשר קצה של קו במנח מסוים יופיע בשדה הראייה שלהם.



רטון 2: <https://youtu.be/8VdFf3egwfg?t=3m33s> (3:33-4:48)

המשך הדרכה למורה – מה רואים בסרטון בכל רגע:

- **03:33** מציגים לחתול קו אור וממשיכים להקליט מנירון ב-V1 (הפעם נירון אחר). נירון זה רגיש לקו שנמצא בתנועה.
- **03:44** הנירון לא רגיש לקווים בכל המנחים
- **04:04** החוקר מסמן את תחילת שדה הקלט של הנירון.
- **04:09** החוקר מסמן את הקצה השני של שדה הקלט. תנועה בתוך שדה הקלט מעוררת פוטנציאלי פעולה בנירון. מחוץ לשדה הקלט לא.
- אפשר להפסיק ב-4:48

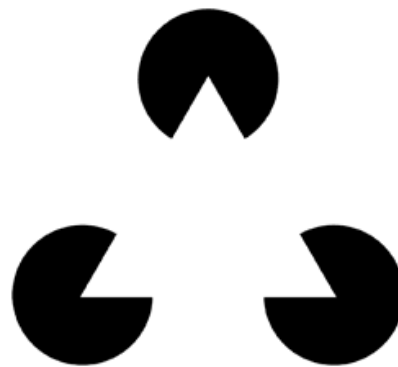
בניסויים הללו החתול רואה את הקו עם העיניים, כרגיל. כל מיני ניורונים במוח החתול מגיבים, אבל החוקרים הקליטו רק בנירון אחד בכל פעם, ולכן אנחנו מזהים רק את הירי שלו ולומדים רק עליו. כשהחוקרים הזיזו את הקו למנח אחר, היו ניורונים אחרים שירו כי הם רגישים דווקא למנח הזה – אך כאמור לא ניתן לירי שלהם ביטוי בניסוי שבסרטון.



המידע על התאים ב-V1 מלמד אותנו על האופן שבו המוח מתמודד עם הכמויות הגדולות של המידע שהוא מקבל מחוש הראייה; ראשית הוא מתחיל לזהות דפוסים של קווים במנחים שונים – זה הבסיס להרכבה מאוחרת יותר של צורות ודפוסים של כל הדברים שאנחנו רואים.



הביטו בתרשים, אילו צורות רואים?



ראיתם משולש?

כיצד זה ייתכן? הרי אין שם באמת משולש, רק צורות "פֶּאקְמֶן" על רקע לבן! זה עתה למדנו שהנוירונים ב-V1 רגישים לאוריינטציה של קווים, ואולם אם נסתכל היטב, נראה כי המשולש אינו תחום בקו כלל! למעשה, אין משולש הפוך בתרשים, המוח שלנו "המציא" אותו. הוא השלים אותו על סמך הצורות האחרות. כלומר: ראינו צורה, על אף שאין קו המקיף אותה. אם כך, כיצד עמודות האוריינטציה, המכילות נוירונים הרגישים לאוריינטציה של קווי מתאר, ייצגו את הצורה הזאת? אם אין צורה, כיצד נוצר ייצוג שלה בקורטקס?

התשובה היא כי מדובר בתהליכי עיבוד מידע ראייתי גבוהים יותר, ולא בעיבוד הקווים ברמת אזור V1. בהמשך הפרק נלמד על עיבודים גבוהים של מערכת הראייה ועל עוד תופעות מעניינות בהן המוח בודה פרטים כדי לתת לנו תמונת מציאות מועילה.

לקריאה נוספת: <http://mada.org.il/brain/triangle.html>





תפיסת עומק

מטרות

- התלמידים יזהו את שלבי העיבוד הראייתי הביוניים במערכת העצבים
- התלמידים יסבירו את השימוש שעושה המוח בהיוריסטיקות וברמזים ליצירת תמונת עולם תלת-מימדית מתוך הקלט הדו-מימדי שמגיע לרשתית

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית בשילוב התנסויות

משך הזמן המוקצה: שעה

ידע קודם: אופן יצירת התמונה על הרשתית (מסעיפים קודמים בפרק זה)

הקדמה

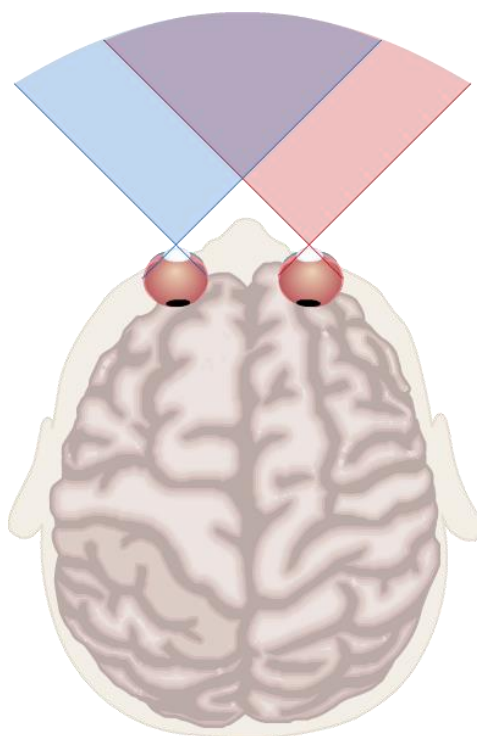
התמונה המתקבלת על הרשתית היא תמונה דו-מימדית. עם זאת, אנו תופסים את העולם בתלת-מימד. לשם יישור קו, כדאי לציין בקצרה את משמעות הביטוי תלת-מימד: ראייה בשלושה מימדים, שהם אורך, רוחב ועומק. אנחנו נתרכז ביצירת המימד השלישי, העומק, **שלא מופיע בתמונה, אלא נוצר כפרשנות שלה.**

מי מפיח במציאות הנתפסת מימד נוסף של עומק? המוח כמובן. הוא עושה זאת בתהליכי עיבוד שנשענים על רמזים. כבר בגיל צעיר מאוד אנחנו לומדים לזהות רמזים שמעידים על הנפח והמבנה התלת-מימדי של אובייקטים במרחב, וכן על המנח והמיקום שלהם. בשיעור זה נלמד להכיר כמה מהרמזים הללו, ונראה כיצד הם מבלבלים אותנו באשליות ראייה מגניבות.

רמזי עומק דו-עיניים (רמזים שמתקבלים מראייה בשתי העיניים בו-זמנית)

פער בין-רשתי (Retinal disparity)

נובע מראייה דו-עינית ומהחפיפה בין שדות הראייה של העיניים. הדבר הבסיסי שמאפשר למוח לנתח מימד ראייתי של עומק, הוא העובדה שאנחנו בעלי שתי עיניים, שרואות **כמעט** את אותו שדה ראייתי – אבל לא בדיוק אותו שדה.



מעבר לכך שרוב שדה הראייה חופף בין שתי העיניים, כל עין רואה כל נקודה **בשדה הראייה** בזווית מעט שונה מהעין השנייה. ככל שהנקודה קרובה יותר לצופה, כך גדל השוני באופן שבו כל עין רואה את אותה נקודה.



נסו לקרב את האצבע אל האף בהדרגה. בשלב מסוים תראו אותה פעמיים. בהנחה שלא צמחה לכם אצבע נוספת, עלינו לחפש הסבר אחר: זה נובע מכך שהמידע שכל עין מקבלת שונה באופן משמעותי, עד שהמוח מתקשה לפרש את האצבע כאובייקט אחד.

חוויית העומק מתקבלת עבור כל המרחקים של האצבע מהפנים, עד המרחק הקריטי שבו רואים שתי אצבעות במקום אחד. במילים אחרות - חוויית העומק קורית כל זמן שלא חווים 2 אובייקטים נפרדים. כיצד זה קורה? כשנסתכלים על האצבע בכל מרחק שהוא, המוח למעשה תמיד מזהה 2 אובייקטים - אחד בכל עין. אבל המוח "יודע" שהוא מקבל קלט כפול, כלומר שכמעט תמיד כל 2 אובייקטים כאלה הם בעצם אובייקט אחד במציאות. כעת הוא יכול לעבד את זה לכדי חוויה של אובייקט אחד, והוא גם משתמש בהיסט שבין התמונות כדי לקבוע עד כמה האובייקט הזה מרוחק. העיבוד לחוויית אובייקט שנמצא בעומק התמונה יכול להתבצע בהינתן היסט בטווח מסוים. בתוך הטווח הזה תתקבל חוויה של עומק: מעט היסט = הרבה עומק, הרבה היסט = מעט עומק. מחוץ לטווח הזה לא תתקבל חוויה של עומק, אלא של 2 אובייקטים נפרדים.

תהליכי עיבוד בקורטקס משתמשים בהיסט הקלט משתי העיניים כדי ליצור תחושת עומק. כיצד? ראשית ישנם אזורים בקורטקס אשר מעבדים את המידע מכל עין בנפרד. בהמשך אזורים אחרים מגיבים לפער בין המידע שהתקבל מכל עין ועין. במילים אחרות, באזורים האלה יש נירונים שלא מגיבים ספציפית לדבר זה או אחר שמופיע בשדה הראייה, אלא רק למידת ההיסט בין התמונות משתי העיניים. כך נירונים אלה מעבדים את הפער הבין-רשת, כלומר את ההיסט בין התמונות שמתקבלות משתי העיניים. באזור זה יש נירונים שונים שמגיבים לפערים שונים בתמונות משתי העיניים: יש נירונים שירים חזק כאשר הפער קטן ואחרים שירים חזק כאשר הפער גדול. נירון שמגיב בירי חזק כאשר יש היסט קטן בין שדות הקלט שמתקבלים משתי העיניים, משתתף בתהליך עיבוד שיוצר חוויה של הרבה עומק, שבסופו מתקבלת תחושה שהעצם רחוק. לעומתו, נירון שירים חזק כאשר שתי העיניים מקבלות קלט בהיסט גדול משתתף בתהליך עיבוד שיוצר חוויה של מעט עומק, שבסופו מתקבלת תחושה שהעצם יחסית קרוב (אבל עדיין נמצא בעומק מסוים).

לסיכום:

- ככל שההיסט בין התמונות שמתקבלות משתי העיניים קטן – המוח יוצר תחושה של יותר עומק (חווייה של אובייקט כרחוק).
- כאשר האובייקט קרוב מאוד ההיסט בין התמונות כה גדול, שהמוח מפסיק ליצור תחושה של עומק. במקום זה מתקבלת חוויה של שני אובייקטים נפרדים (למשל שתי אצבעות במקום אצבע אחת).

סרטים בתלת-מימד

טכנולוגיית התלת-מימד משתמשת בעקרון הפער הבין-רשת. זוהי דוגמה יפה למציאת פיתרון הנדסי לניצול של עיקרון מדעי, במקרה הזה לצרכים בידוריים. נתחיל בהצגה של ה"סבא-רבא" של יצירת סרטים בתלת-מימד: הסטראוסקופ.

הסבר ודוגמאות:

<http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A1%D7%98%D7%A8%D7%99%D7%90%D7%95%D7%A1%D7%A7%D7%95%D7%A4%D7%99%D7%94>



מדוע טכנולוגיית משקפי התלת-מימד החלה את דרכה עם שימוש בעדשה אחת כחולה ואחת אדומה?



רמז: להלן דוגמה לתמונה שעליה מסתכלים באמצעות משקפיים כאלה:



אפשר להכין משקפי תלת-מימד עם צלופן כחול ואדום, או אפילו להציב לפני העיניים צלופנים (אחד מול כל עין), ולבחון את המצבים הבאים:



- תמונות תלת-מימד שונות.
- מה יקרה אם נחליף את המיקום של צבעי העדשות, האם עדיין נראה את התמונה בתלת-מימד? התשובה היא שלא, משום שהמנח של התמונה האדומה ביחס לתמונה הכחולה מתאים לזוויות שבהן העיניים שלנו רגילות לראות. החלפה של העדשות תגרום לכל עין לראות את התמונה ביחס לעין השניה בצורה שלא מתקיימת במציאות (עין ימין תראה שדה ראייה שמאלי יותר מאשר עין שמאל, וזה לא יאפשר "לפצח את המנגנון" של ראיית עומק).

סטראוגרם

מדובר בתמונות שמציגות במבט ראשון סתם רקע עם דפוס בלתי מזוהה, אך במבט ממושך מתגלה דמות תלת-מימדית.

דוגמה:



הסבר על התופעה:

[HTTP://NEWS.NANA10.CO.IL/ARTICLE/?ARTICLEID=169445&SID=126](http://news.nana10.co.il/article/?articleid=169445&sid=126)



הסברים נוספים וטיפים למי שלא מצליח לראות את התמונה...:

<http://www.snark.co.il/stereograms/stereograms.htm>



בניית סטראוגרם

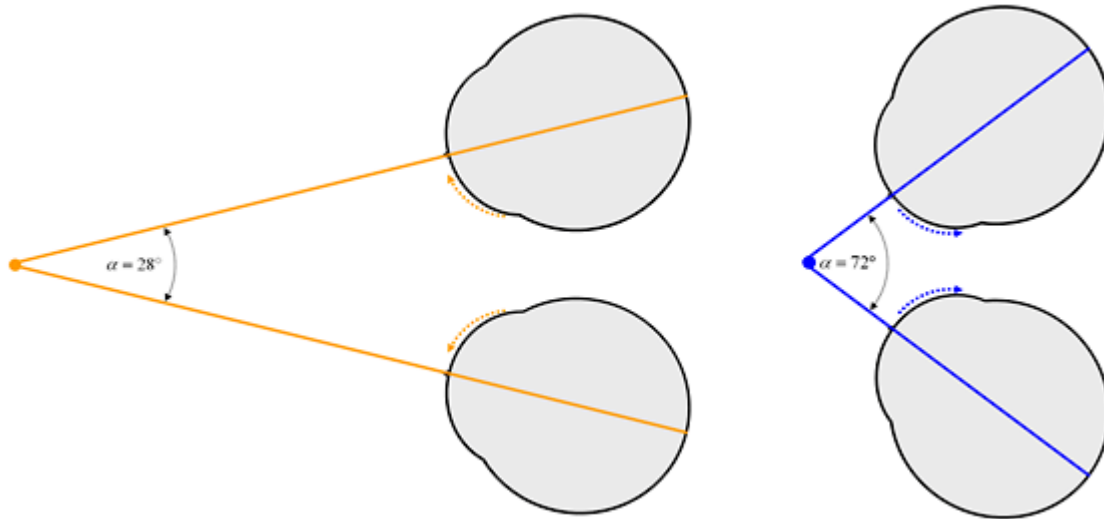
ניתן ליצור סטראוגרם באתר [easy stereogram builder](http://www.easy-stereogram-builder.com).

מופיעים 3 מלבנים. לחיצה על המלבן השמאלי (PATTERN) תאפשר לבחור רקע/טקסטורה לסטראוגרם מתוך מאגר או תמונה מהמחשב. במלבן האמצעי (MASK) ניתן להוסיף טקסט או צורה כלשהי. לחיצה על המלבן הימני תסיים את הכנת הסטראוגרם.

התכנסות והתבדרות של העיניים (convergence and divergence)

רמז דו-עיני נוסף לעומק. כאשר מסתכלים על חפץ קרוב, העיניים מתכנסות למרכז ופוזלות מעט פנימה (התכנסות). לעומת זאת, כאשר מסתכלים לרחוק, ישנו תהליך הפוך מהתכנסות, שנקרא התבדרות, בו העיניים מסובבות קצת לצדדים.

המוח מעבד את הפעולות הללו ומפרש את הנוכחות שלהן כסימן לכך שההתמקדות היא על חפץ קרוב או רחוק. המוח משתמש במידע הזה כדי ליצור חוויה של עומק.



התמקדות באובייקט רחוק

התמקדות באובייקט קרוב

כדאי לשים לב: כשהמוח משתמש ברמזי עומק דו-עיניים, הוא למעשה **מסיק** את קיומו של העומק מדברים שלא קיימים בתמונה עצמה – אלא למשל מעצם ההפרש בין שני שדות הראייה של העיניים, או ממידע פרופוריוספטיבי על מנח העיניים זו ביחד לזו. זהות האובייקטים שמופיעים בתמונה אינה משחקת כאן תפקיד.

רמזי עומק חד-עיניים

ומה לגבי ראייה עם עין אחת? נסו לעצום עין אחת, ובחנו האם איבדתם את כל רמזי העומק. בוודאי הרגשתם שלא הרבה השתנה... דברים שנראו רחוקים בשתי העיניים, נראים רחוקים גם במבט עם עין אחת. הסיבה לכך היא שלמדנו לאסוף רמזים סביבתיים שמעידים על עומק. זה לא דבר שלומדים בבית-הספר באופן פורמלי, אלא משהו שלמדנו באופן ספונטני כבר כתינוקות – הרמזים לגבי עומק תמיד אפיינו דברים רחוקים, שהיינו צריכים להתאמץ יותר כדי להגיע אליהם. מהם אותם רמזים?

הסבר כולל על רמזי עומק:

http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%AA%D7%A4%D7%99%D7%A1%D7%AA_%D7%A2%D7%95%D7%9E%D7%A7





צילום: distractify.com

שלושת הרכבים באותו גודל. לפי רמזי הכביש והמדרכה שלצידו, אנחנו מפרשים את הרכב הימני כרחוק יותר. אז למה הוא גם נראה לנו גדול יותר? כי המוח מקזז את העובדה שכל רכב מטיל את אותו גודל על הרשתית, עם העובדה שהרכב הימני רחוק יותר. אם הרכב רחוק ועדיין יוצר על הרשתית היטל בגודל של רכב קרוב, ההסבר היחיד לכך בעולם האמיתי – שהוא אכן גדול יותר. לכן המוח יוצר **חוויה** של רכב ימני גדול ביחס לרכב שמאלי קטן.

ראייה ללא רמזי עומק

ענקים וגמדים



נדמה כי המצולמים בתמונות הללו ננסים, או שהחפצים ענקיים במיוחד. כמובן שזוהי אשליה. התמונה צולמה במדבר מלח הנפרש לפנינו עד האופק. במציאות, האנשים הקטנטנים בתמונה פשוט התרחקו כמה מאות מטרים מהצלם, ולכן הם נראים קטנים.

ומאחורי הקלעים...: הצלם צריך לשכב על הרצפה כדי לתפוס את האובייקטים הקרובים והרחוקים על אותו מישור:



משימה: נסו למצוא רמזי עומק נוספים שחסרים בתמונה. תשובות אפשריות:

- חסר צל המוטל על הקרקע תחת האדם הרחוק (משום שהשמש במרכז השמיים).
- חסרים עצמים נוספים במרחב שיתנו קנה מידה לגבי עומק. אם למשל היו עצים פזורים במרחב, היינו רואים שהגדלים שלהם מתאימים לגדלים של האנשים, והדבר היה מהווה רמז לעומק.
- נסו לצייר עצים גדולים ליד חפצים שנראים גדולים, עצים קטנים ליד אנשים שנראים קטנים, ועצים בינוניים בהדרגה ביניהם – האם האשליה עדיין מתקיימת?

אשליית צלילית (silhouette illusion)

אשליית החתול המסתובב: <https://www.youtube.com/watch?v=8N1CZjOYYxw>



חלק מהתלמידים בכיתה יראו את החתול מסתובב לימין, וחלק יראו את אותו חתול ממש מסתובב לשמאל. חלק אולי אפילו יצליחו לראות אותו משנה כיוון (קשה מאוד!). כדי להסביר את האשליה, נתבונן במספר מקרים דומים ופשוטים יותר.

לאן מביט הסוס?

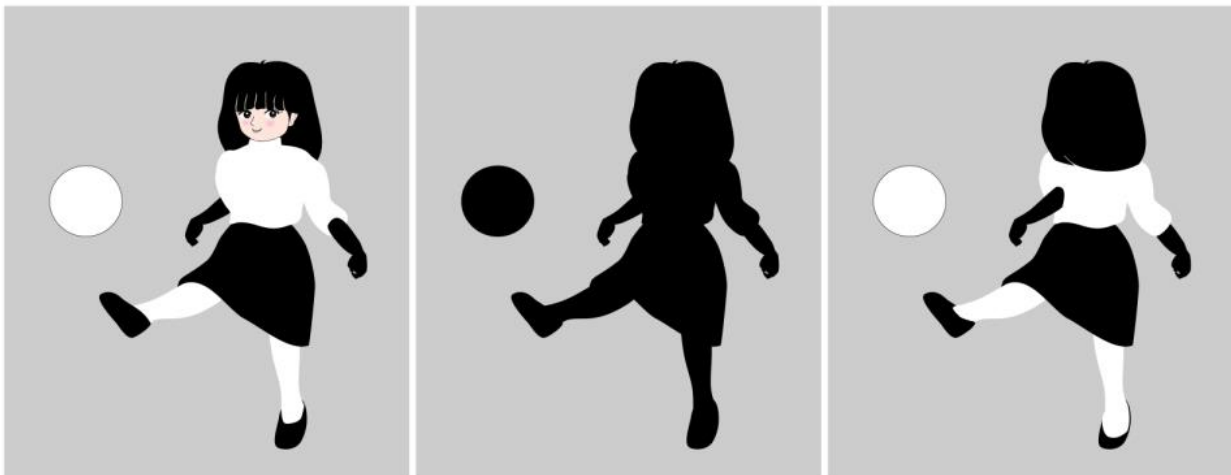


לפעמים נראה כי הסוס מביט אלינו, ולפעמים כאילו הוא מביט אל האופק ומפנה לנו את העורף.

לאן הילדה מסתכלת?

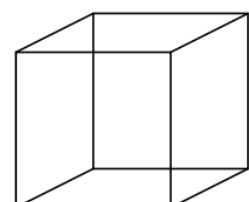


הנה שתי האפשרויות לתשובה:



הסבר האשליה: האשליה נובעת מהיעדר רמזי עומק, מה שיוצר במקרה הזה דו-משמעות ויזואלית. כאשר אנו צופים בצלילית בלבד, קשה לנו לעתים להכריע לגבי המנח של האובייקט במרחב. במציאות אנחנו נעזרים ברמזים כמו לבוש, צל המוטל על גבי אובייקט וכו' כדי לתפוס את המנח ולפעמים גם את התנועה שלו.

דוגמה נוספת לעקרון דומה ניתן לראות בקוביית נקר (Necker cube). גם פה אין רמזי עומק, ולכן קודקוד שנראה כעמוק ביותר יכול להיראות גם כבולט ביותר:



כאשר מציגים את האשליות הללו, בדרך כלל אנחנו בטוחים שמה שאנחנו רואים הוא "הנכון" (לפני שאנחנו שומעים אחרים שרואים דווקא את האופציה השניה). כדאי להציג בפני התלמידים את שתי הפרשנויות השונות של הגירוי, ולעודד אותם לנסות לראות "בכוח" את האפשרות השניה (לעיתים קל יותר לעשות זאת על ידי מצמוץ חד פעמי).



לסיום (או בבית) אפשר לצפות בסרטונים הבאים שמראים את אשליית הרקדנית המסתובבת. זה למעשה בדיוק אותו עקרון של החתול המסתובב שהוצג קודם לכן, רק שפה מראים בצורה מאוד ברורה את החילוף. זה יכול לעודד את מי שלא הצליח, ובבית אפשר לנסות שוב עם החתול:



<https://www.youtube.com/watch?v=aBWHJUSpBpk>

הערה: זו אשליה שלוקח זמן לתפוס אותה, וכדאי להיות עם היד על הדופק ולהגביל את זמן הצפייה, משום שזה עלול לקחת יותר מידי זמן על חשבון דברים אחרים.

אשליית הירח הזורח

לכל אורך הפרק אנחנו מציגים אשליות שלא מתקיימות במציאות, והנה הזדמנות להציג אשליה טבעית למהדרין.

שני אתרים שמציגים הסברים טובים לתופעה:



<http://www.hayadan.org.il/the-end-of-moon-ilusion-120100>

<http://davidson.weizmann.ac.il/online/askexpert/astrophysics/%D7%9E%D7%93%D7%95%D7%A2-%D7%9C%D7%A2%D7%99%D7%AA%D7%99%D7%9D-%D7%94%D7%99%D7%A8%D7%97-%D7%A0%D7%A8%D7%90%D7%94-%D7%92%D7%93%D7%95%D7%9C-%D7%99%D7%95%D7%AA%D7%A8-%D7%90%D7%9C%D7%99%D7%A9%D7%A2>

ראיה עם רמזי עומק שקריים - אשליית חדר איימס

<https://youtu.be/Ttd0YjXF0no>



הסבר לאשליה: החדר עצמו מעוות. הוא בנוי כך שהזוויות שלו נראות ישרות כמו של חדר רגיל כאשר צופים מנקודת המבט המסוימת של חלון ההצצה, שדרכה גם מצולם הסרטון. בעת עיבוד ראייתי של סצנה כלשהי, אנחנו מסתמכים על מבנים וגדלים מוכרים שנמצאים בסביבה כדי ללמד אותנו על מידת העומק. באשליית חדר איימס יש שני רמזים, שהאחד גובר על השני ליצירת האשליה: הרמז הראשון הוא מבנה החדר, שנראה סטנדרטי ויחסית קטן, על-פי הזוויות שבין הקירות, **שנראות כזוויות ישרות**. הרמז השני הוא הבדלי הגודל בין האנשים: הרמז אמור לאותת לנו שהאדם הקטן אינו באמת ננס, אלא שהוא נמצא די רחוק. במקרה הזה התחושה שלנו לגבי מבנה החדר חזקה יותר, אנחנו לוקחים בחשבון שאכן מדובר בחדרון רגיל, ונשארים עם הרושם שישנם בחדר ענק וננס. כמו באשליות רבות אחרות, קשה מאוד להתנתק מהרושם הזה, אפילו שאנחנו יודעים שהתפיסה שלנו נוגדת את המציאות.

רעיון לשיעורי בית:



1. מצאו אשליה שלא הופיעה בשיעור. הסבירו כיצד מתקבלת האשליה, ומה זה מלמד אותנו על אופן עיבוד המידע החושי במוח. נסו להסביר איזה יתרון מקנה אופן העיבוד הזה לאדם.
2. מצאו כיצד חיות אחרות משתמשות ברמזים מהסביבה כדי ליצור תפיסה ויזואלית שמקנה להן יתרון.

קישורים נוספים:



עוד על גרפיקה תלת-מימדית ויישומים במחקר מחשב ובתעשייה:

<http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A8%D7%A4%D7%99%D7%A7%D7%AA%D7%9C%D7%AA-%D7%9E%D7%9E%D7%93%D7%99%D7%AA>

תפיסת צבע

מטרות:

- התייחסות לשלבי עיבוד ראייתיים מגוונים שקשורים לתופעה של תפיסת צבע.
- העמקה בתכונות הרשתית וכיצד הן תורמות לתפיסה של צבע ואובייקטים.

הערכת זמנים:

2 שעות

מושגים

שדה קלט, קרינה, ספקטרום האור הנראה, התיאוריה הטריכרומטית, עיוורון צבעים (פריפריאלי וקורטיקלי), קביעות הצבע, קוואליה.

התייחסות לידע קודם (משיעורים קודמים באותו פרק):

- אישון, רשתית
- קולטני אור
- מדוכים, קנים

חומר רלוונטי ודגשים למורה:

לקריאה: קרלסון נ', הפיזיולוגיה של ההתנהגות כרך א', מהדורה 9, האוניברסיטה הפתוחה, עמ' 218-223.

מבוא

בשיעורים הקודמים למדנו על עקרונות החישה והדגמנו אותם באמצעות מערכת הראייה. בשני השיעורים הקרובים נתאר תהליך עיבוד מרתק על שלביו השונים – עיבוד צבע. נתחיל מתיאור צבע כאות פיזיקלי (קרינה, גל), נבין כיצד קולטני העין מבחינים בצבע ונסיים בתיאור תהליכי עיבוד גבוהים של צבע המתרחשים בקורטקס.

האור כגל



רטון: <https://www.youtube.com/watch?v=UZ5UGnU7oOI>

האור מתפשט בחלל בצורה של גל.

כל גל ניתן לאפיון במונחים של אורך גל:

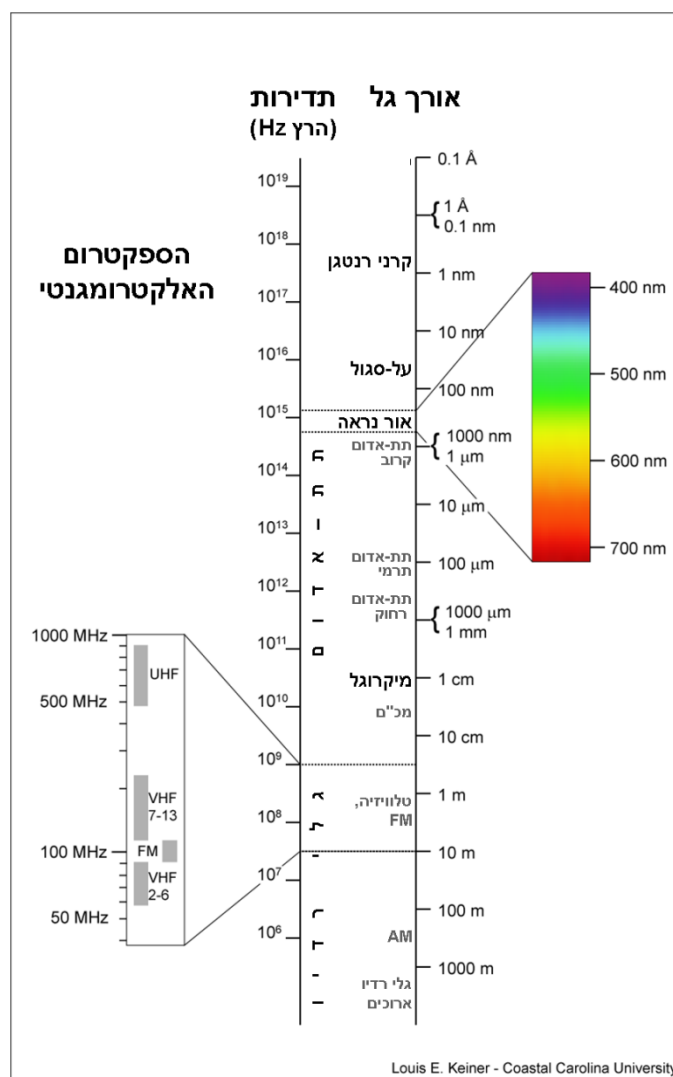


אורכו של הגל הוא תכונה אחת של קרינה, מתוך כמה תכונות פיזיקליות. לתכונות הפיזיקליות הללו ישנה השפעה על התחושה הסובייקטיבית, כאשר העיניים שלנו קולטות את הקרינה הזו. בהקשר של שיעור זה, אור באורכי גל שונים מתפרש על ידי המוח כאור בצבעים שונים.

ספקטרום האור הנראה

לא כל הגלים (הקרינות) הקיימים בעולם, מתפרשים על ידי המוח כצבע. למעשה, את מרבית אורכי הגלים המוח בכלל לא קולט. את אורכי הגל של קרינות נוח למדוד בנו-מטר (1 נ"מ = 10^{-9} מטר = 0.000000001 מטר). בעוד שקרינת השמש כוללת אורכי גל בתחום רחב של 300 נ"מ עד 3000 נ"מ, העין האנושית מגיבה רק לתחום צר מאוד של אורכי גל, בין 380 נ"מ עד 780 נ"מ. טווח זה קרוי **ספקטרום האור הנראה**, משום שזה הטווח שאותו אנו מסוגלים לראות.

מחוץ לגבולות האלה העין לא מזהה את הקרינה. זו הסיבה, למשל, שאיננו רואים את גלי הרדיו שגורמים לרדיו שלנו לשדר – באופן עקרוני הם דומים בתכונותיהם לגלי האור הנראה, רק שאורך הגל שלהם ארוך יותר והם לא מעוררים את הקולטנים בעין. כאמור, אורכי הגל השונים שהעין כן קולטת, נתפסים כצבעים שונים.



בתמונה רואים ספקטרום רחב של קרינה. שימו לב עד כמה מצומצם ספקטרום האור הנראה ביחס לכל טווח הקרינה הקיים.



אילו מכשירים סביבנו פולטים קרינה? האם גלי הקרינה שהם פולטים ארוכים או קצרים מהגלים בספקטרום האור הנראה?



להרחבה: תחומי הספקטרום הצמודים לתחום האור הנראה: אולטרה-סגול (UV - ultra-violet) ותת-אדום (infra-red - IR).



מכשירים יכולים "לראות" קרינה מחוץ לטווח האור הנראה: הפעילו את המצלמה במכשיר הסלולרי החכם שלכם. כעת קחו שלט (של מזגן / טלוויזיה / מכשיר אחר). מקמו את השלט מאחורי עדשת המצלמה כשהוא מופנה אליה ולחצו על אחד המקשים בו. האם הבחנתם בנקודת אור שנדלקת? האם אתם מבחינים בה במבט ישיר בשלט, ללא המצלמה?

הסבר: פעולת השלט מבוססת על קרן באורך גל ארוך מזה שאנו מסוגלים לראות, קרינה הקרויה תת-אדומה ("אור אינפרא-אדום"). למכשירים חשמליים יש אפשרות לקלוט קרינה מחוץ לטווח האור הנראה, כך שהם יכולים להיות רגישים לקרינה שיוצאת מהשלט. באופן זה מתאפשרת שליטה על המכשיר באמצעות שלט – המכשיר מקבל פקודות באמצעות אור בלתי נראה. מצלמת הטלפון החכם קולטת קרינה מהסביבה, ובניגוד לעין האנושית היא רגישה גם לקרינה באורך גל ארוך, תת-אדום. בנוסף, המצלמה מתוכנתת להציג לנו על גבי צג המכשיר אור בתדרים שאנו מסוגלים לראות, ולכן המסך מחליף את גלי האור הארוכים מהשלט בגלי אור קצרים יותר, הנמצאים בטווח האור הנראה.



חידה: למה כדאי לבסס את פעולתו של שלט על אור באורך גל שמחוץ לספקטרום האור הנראה?

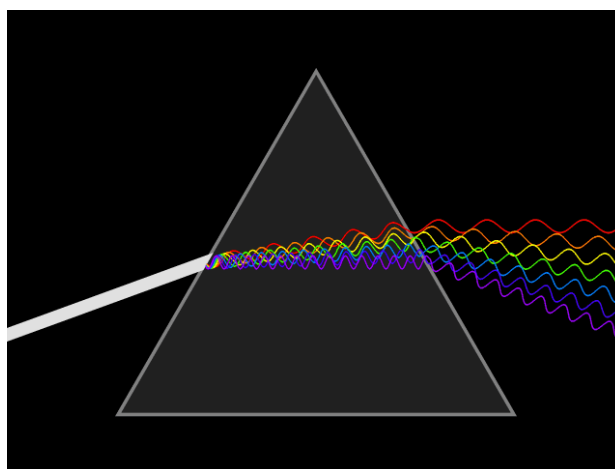
תשובה: אם השלט היה עובד על אור נראה, הרי שהמכשיר היה צריך להיות רגיש לאור נראה. זה עלול ליצור בעיה, כי בדרך כלל המכשירים נמצאים בסביבה מוארת, ויכולים היו להיות חשופים ל"רעשי אור": כל אור שנדלק או משתנה בסביבה היה משפיע על הפעלת המכשיר החשמלי. תארו לעצמכם שהטלוויזיה היתה מעבירה ערוץ בכל פעם שהייתם מדליקים את האור בחדר...



לקריאה נוספת: <https://www.mada.org.il/activities/athome/sensor/IR>

אור לבן

אור לבן מורכב מקשת הצבעים המלאה של ספקטרום האור הנראה, כלומר מאלומת אור שמכילה גלים בכל האורכים בטווח האור הנראה. כהוכחה לכך, ניתן לפרק את האור הלבן לצבעים השונים – למשל בעזרת פריזמה, ובהמשך לאחד בחזרה את כל אלומות האור הצבעוניות לאור לבן בחזרה. הפירוק הוא למעשה מיון של הגלים לפי אורכם, באמצעות שבירה שלהם. כל גל נשבר באופן שאופייני לאורכו, וכך מתקבל המיון לפי אורכים.



"Light dispersion conceptual waves". Licensed under Public Domain via Wikimedia Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_dispersion_conceptual_waves.gif#/media/File:Light_dispersion_conceptual_waves.gif

ברשתית ישנם 2 סוגים של קולטני אור: **קנים ומדוכים**. הקנים רגישים לאור בעוצמות תאורה נמוכות יותר ומשמשים בעיקר לראיה בלילה, ואילו המדוכים רגישים לאורכים מסויימים של גלי אור – כלומר **המדוכים רגישים לצבעים**.



שימו לב, התרגום לאנגלית מעט מבלבל: באנגלית סוגי הקולטנים קרויים CONES ו-RODS. למרות הדמיון בשם, ה-CONES הם דווקא המדוכים ולא הקנים.



הרחבה – נספח 1: קולטני אור מסוגים שונים מפרשים את הקרינה בצורה שונה.

ראיית צבע – כיצד נוצרת תפיסה של צבעים?



ישנן 2 תיאוריות המאגדות לתיאוריה שלישית שכוללת את שתיהן יחד. אנו נציג את אחת התיאוריות, והשתיים האחרות מצורפות בנספח 2 כהרחבה.

התיאוריה הטריכרומטית

טרי = שלושה, כרומו = צבע.

ב-1802 (לפני יותר מ-200 שנה) תומאס יאנג, פיזיקאי ופיזיולוג בריטי, הציע את **התיאוריה הטריכרומטית** (תיאוריית שלושת-הצבעים), לפיה העין מכילה גלאי צבע מ-3 סוגים, שכל אחד מהם מזהה רק צבע אחד: כחול, אדום או ירוק. הגלאים האלה הם סוג מסוים של קולטני האור ברשתית, הקרויים **מדוכים**.

כפי שלמדנו זה עתה, אור לבן מורכב מקשת הצבעים המלאה, כלומר הוא אלומה של גלי אור בעלי אורכים שונים. לפי התיאוריה הטריכרומטית, המדוכים ברשתית פשוט "מסננים" את הגלים ברוב האורכים, וקולטים גלי אור רק באורכים שאופייניים לאחד מ-3 צבעים: כחול, אדום או ירוק.

כשמגיעה לרשתית תמונה המכילה למשל אורכי גל של כ-450 נ"מ, רק גלאי הצבע הכחול יגיבו, ותתקבל תפיסה של דבר מה כחול. כך גם לגבי אורכי הגל המתאימים לאדום ולירוק.



אם יש לנו קולטנים ל-3 צבעים (אדום, ירוק וכחול), כיצד אנו תופסים את יתר הצבעים?

סרטון: איך רואים צבע? <http://ed.ted.com/lessons/how-we-see-color-colm-kelleher>

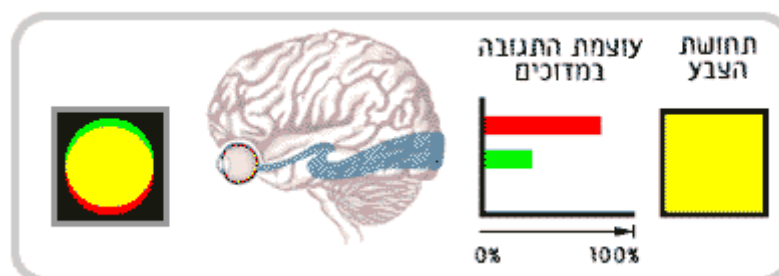
(אפשר להוסיף כתוביות בעברית)

למשל, כיצד אנו רואים צהוב?

תפיסה של צבע צהוב יכולה להתקבל ב-2 דרכים:

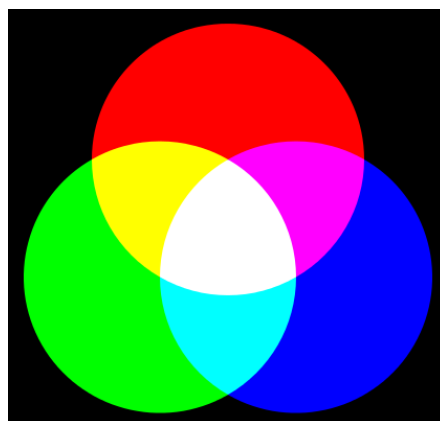
- אם יגיעו לעינינו קרני אור באורך גל אופייני לצבע צהוב (בסביבות 580 נ"מ).
- אם יגיעו לעינינו בבת אחת קרני אור ירוקות ואדומות (ביחסי עוצמה מסוימים ביניהן).

כיצד זה ייתכן? הסיבה לכך היא שאין לנו גלאים לצבע צהוב (כזכור, רק לאדום-ירוק-כחול). המוח מזהה את הצבע הצהוב כאשר ישנה הפעלה בו-זמנית של מדוכי אדום ומדוכי ירוק ברשתית. אורך הגל האמיתי של צבע צהוב מפעיל גם את מדוכי האדום וגם את מדוכי הירוק ביחד, ויוצר במוח תחושה של צהוב.



מתוך: <http://science.cet.ac.il/science/colors/color2.asp>

דבר דומה קורה לגבי תפיסה של יתר הצבעים שאינם צבעי יסוד: טורקיז, מג'נטה וכו', וכמובן – לבן! בעזרת שילוב של אורות בצבעים כחול, אדום וירוק נוצרים כל הצבעים שאנחנו מסוגלים לראות.



By Quark67 (Own work) [GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons



אין לנו בעין מדוכים שקולטים לבן. אם כך, כיצד אנו מזהים צבע לבן?

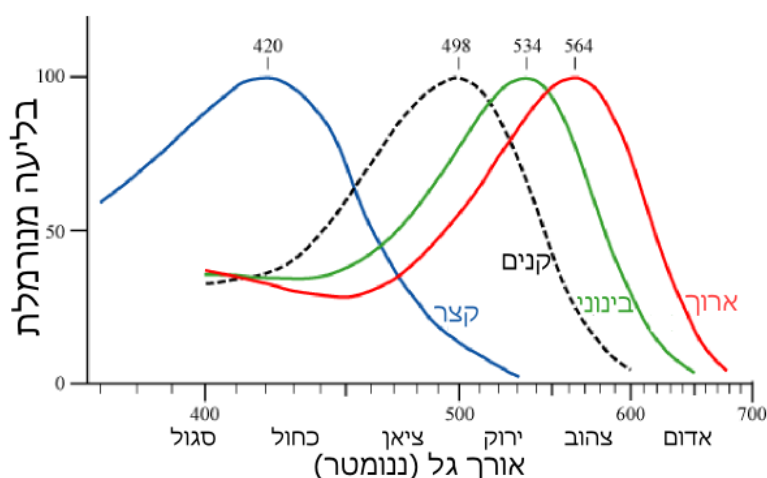
תשובה: בקרן של אור לבן יש שילוב של כל אורכי הגלים. כל מדוך ברשתית קולט את אורכי הגל שמאפיינים את הצבע שאליו הוא רגיש, והמוח עושה אינטגרציה של הצבעים ומפרש את הצבע כלבן.



ערבוב הצבעים שהוסבר כאן עניינו ערבוב של קרני אור צבעוניות. כשמדובר בערבוב של פיגמנטים (כמו בצבעי גואש למשל), תוצאות הערבוב שונות. למתעניינים, ההבדל מוסבר היטב בספר של קרלסון, סמוך לתמונה; או [בויקיפדיה, בקישור הבא](#).

כעת להסבר מעמיק יותר:

נעזר בגרף שלמטה, שמראה את תגובת המדוכים (והקנים) לאור באורכי גל שונים. בעזרת גרף זה ניתן להבין טוב יותר את דוגמת הירוק והאדום שנותנים ביחד צבע צהוב, ולהבין למה הוא נראה לנו בדיוק כמו צהוב מונוכרומטי (אורך גל יחיד, ולא ערבוב של צבעים). הסיבה לכך שאנחנו רואים ערבוב צבעים כצבע חדש תלויה בכך שישנה **חפיפה** בין אורכי הגל שהמדוכים השונים מגיבים אליהם. למשל, באורך גל שבו הכחול בשיא הרגישות שלו, גם הירוק וגם האדום אינם באפס רגישות, ועדיין מגיבים לאור. נחזור לדוגמת הצבע הצהוב, שנמצא בין 565 ל-590 nm (גוון שונה של צהוב מתאים לכל אורך גל בתחום זה). לפי הגרף קל לראות שזהו תחום שגם המדוכים הרגישים לירוק וגם המדוכים הרגישים לאדום מגיבים אליו. כלומר אם נראה אור מונוכרומטי צהוב בעצם שני סוגי המדוכים יגיבו. עבור אורכי גל שונים של צהוב (גווני צהוב שונים) יתקבל כמובן יחס שונה בין שני המדוכים.



Cone response he [CC BY-SA 3.0](#)

תגובת הגלאים השונים לאור בעין האנושית. בגרף ניתן לראות שלסוגי המדוכים השונים, ולקנים בעין האנושית יש תגובה שונה לאורכי גל שונים של אור. ניתן לראות בבירור שקיימת חפיפה בין התגובות של סוגי המדוכים השונים, אך גם שלכל סוג מדוכים יש תגובה חזקה באורך גל אחר.

נבצע ניסוי דמיוני: נבחר גוון של צהוב מונוכרומטי (כאמור, באורך גל בתחום 565-590nm), ובחן מה היחסים בין התגובות של המדוכים הרגישים לירוק ולאדום. מה יקרה אם נכבה את הצהוב המונוכרומטי ונעזור את שני המדוכים באותו היחס, אבל עכשיו בעזרת אדום מונוכרומטי (למשל ב-564 ננומטר) וירוק מונוכרומטי (למשל ב-534 ננומטר) בעוצמות המתאימות? המדוכים יהיו מעוררים **בדיוק באותו אופן** כמו בקרה של הצהוב המונוכרומטי, ובעצם **לא נוכל להבחין בין המקרים**.

כלומר כשהעין משדרת שהיא רואה צהוב, ישנם מספר צירופים של אורכי גל שונים שיכולים לגרום לעירור זה. לכל האפשרויות האלה אנחנו קוראים צהוב, ומבחינתנו אין הבדל ביניהם.

לתכונות אלה של העין ועיבוד הצבע במוח יש השלכות טכנולוגיות:



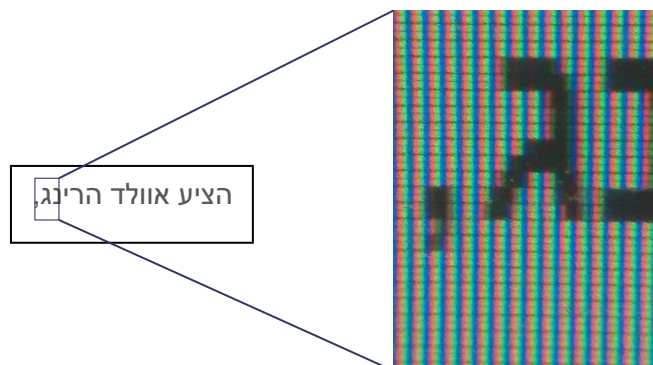
מסך המחשב (וכך גם מסך הטלוויזיה) מורכב, כידוע, מפיקסלים. בלתי אפשרי ליצור פיקסלים המכילים מקורות אור בכל צבע (יש המון צבעים וגוונים!), ולכן המהנדסים ניצלו את העובדה שיש לנו שלושה סוגי קולטנים ותכננו את המסכים כך שכל פיקסל מורכב בעצם רק משלושה צבעים: אדום, ירוק וכחול. למרות זאת ניתן לראות מגוון גדול מאד של צבעים על מסך המחשב. קל לראות זאת בעזרת תוכנות מחשב רבות, אך אנחנו נתמקד בתוכנת הצייר. במסך הראשי של תוכנת הצייר ישנו כפתור "עריכת צבעים", וכשלוחצים עליו מתקבל מסך בחירת צבעים. בתחתית המסך ישנן אפשרויות בחירה לאדום-ירוק-כחול, ובראש המסך יש טבלת צבעים.

- א. בחרו 255 באדום, ו-0 בשאר הצבעים, ויתקבל צבע אדום. בחרו 255 בירוק ו-0 בשאר הצבעים ויתקבל ירוק, בחרו 255 בכחול ו-0 בשאר הצבעים ויתקבל כחול.
- ב. כעת כמובן ניתן לשחק בערכים ולראות מה קורה עבור שילובים שונים, נסו לבדוק מה קורה עבור ערובים שונים (כגון כחול וירוק בעוצמה 127 כל אחד ואחר כך בעוצמה 255 כל אחד, אדום וכחול בעוצמה 200 כל אחד, ושלושת הצבעים בעוצמה 85 כל אחד).
- ג. בלוח הצבעים (פלטת הצבעים) בחרו צבע בלחיצת עכבר, כעת הערכים בתחתית המסך ישתנו בהתאם. לחצו על צבעים שונים ובדקו: האם הצבע האדום שבחרתם מורכב רק מפיקסלים אדומים? האם כך לגבי הצבע הכחול והירוק?
- ד. לחצו על הצבע הצהוב הגבוה ביותר בטבלת הצבעים. מהם הצבעים המרכיבים אותו (תשובה: ירוק ואדום, כמו בניסוי המחשבתי שלמעלה).
- ה. באתר <http://academo.org/demos/wavelength-to-colour-relationship> יש אפשרות לראות מהו היחס המומלץ לאדום ירוק וכחול (RGB- red green blue) כך שיתקבל על המסך הצבע המתאים לאורכי הגל השונים. ניתן להזיז את הסליידר האופקי כדי לראות מהם הצבעים המתאימים לאורכי הגל השונים.



להשלמת התמונה ניתן כעת לבדוק ישירות את מסך המחשב: בעזרת עדשת מקרו שניתן להתקין על הטלפונים החכמים¹, ניתן לצפות ישירות בתכונה זאת של מסכים, ואף לצלם אותה. נתמקד בעזרת הגדלה על מילה על רקע לבן (ראו דוגמה למטה, שצולמה בשיטה זו ממסך עליו הופיע טקסט זה) נוכל לראות בקלות שאותיות המילה נשאות שחורות בהגדלה (שכן צבע שחור על המסך משמעו שאין אף פיקסל דלוק) אך הרקע הלבן נראה בבירור כפיקסלים צבעוניים המסודרים בטורים מחזוריים בצבעי אדום ירוק וכחול.

¹ עדשת מקרו אוניברסלית לטלפונים חכמים ניתנת לרכישה בזול באינטרנט.



דוגמה לתמונה שצולמה בעזרת עדשת מקרו, בה רואים תקריב (זום אין) של מסך לבן עם מילים שחורות. בהגדלה כזאת ניתן בקלות להבחין בקיומם של פיקסלים אדומים כחולים וירוקים המסודרים בטורים.

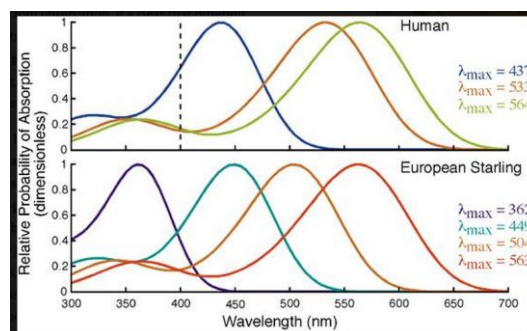


הידעתם? חיות שונות רואות צבעים שונים! ראינו שלבני-אדם יש 3 סוגי מדוכים שקולטים 3 צבעים, אבל אין הדבר מחייב לגבי חיות אחרות!

ראו השוואה בין הראייה שלנו לראייתם של בעלי חיים אחרים, בקישור הבא:

<http://science.cet.ac.il/science/colors/color11.asp>

להלן גרפים שמשווים בין טווחי הקליטה של מדוכים באדם (גרף עליון) לעומת ציפור זרזיר (גרף תחתון):



אזכור: WebExhibits: CC by-nc-nd:

אפשר לראות קודם כל שלציפורים מן הסוג המסוים שמוצג בתמונה יש 4 סוגים של מדוכים, מה שכנראה מאפשר להן ליצור תפיסה של צבעים שאנשים אינם תופסים. כמו כן, טווח הקליטה של המדוכים בציפורים גדול יותר, כך שהן יכולות לראות "צבעים" שאנשים עיוורים כלפיהם (במקרה המוצג כאן, אורכי גל קצרים יותר, כלומר "צבעים" על-סגולים).



חשוב להזכיר כי ישנן תיאוריות נוספות לגבי תפיסת צבע. על כך בהרחבה למורה, נספח 2.

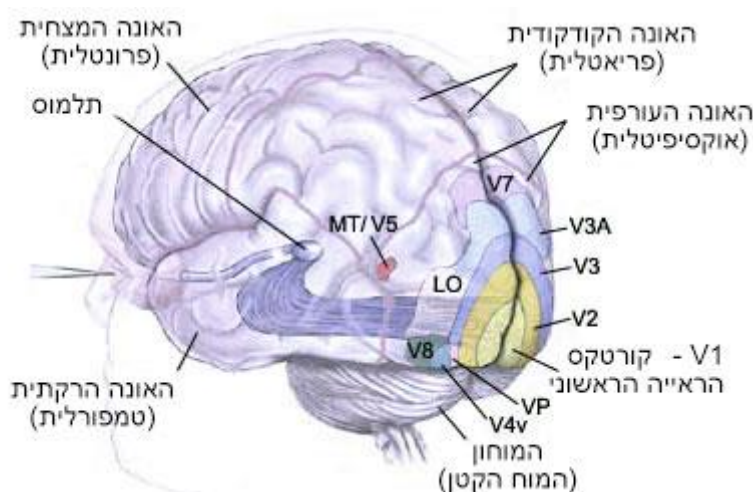
עיוורון צבעים



מה יכול להיות המקור הביולוגי לעיוורון צבעים?

תשובה: סביר להניח שיהיו תלמידים שיאמרו שעיוורון צבעים יכול להיגרם מתקלה במדוכים, אבל – חשוב להוביל אותם גם לכך שהראייה אינה מסתיימת ברמת הרשתית, אלא הראייה מתקבלת לאחר תהליך עיבוד, וגם תקלות בהמשך הדרך, כלומר במוח, עשויות לפגוע ביכולת לתפוס צבע.

תזכורת לגבי המסלול אותו עובר האות העצבי מהעין: הקולטנים ברשתית קולטים את האות וממירים אותו לאות עצבי. האות העצבי עובר דרך עצב הראייה אל התלמוס ומשם אל הקורטקס. הקורטקס המידע עובר מתחנה לתחנה ועובר סוגים שונים של עיבוד.



Copyleft: http://thebrain.mcgill.ca/flash/a/a_02/a_02_cr/a_02_cr_vis/a_02_cr_vis.html

עיוורון צבעים פריפריאלי, שמקורו במדוכים: נגרם משיבוש באחד או יותר משלושת סוגי המדוכים. בדרך כלל הוא גנטי ואינו ניתן לתיקון. עיוורון צבעים הוא למעשה משפחה של לקויות, הוא יכול להיגרם כתוצאה מדברים שונים, וגם להתבטא בצורות שונות. הערה לגבי השם: עיוורון צבעים כזה נקרא "פריפריאלי" משום שהרשתית ממוקמת בפריפריה, ביחס למערכת העצבים המרכזית.



על סוגים שונים של עיוורון צבעים, ועל מבחנים שונים לאבחון עיוורון צבעים, היכנסו לאתר:

http://www.clalit.co.il/he/your_health/family/eyes/Pages/colourblindness.aspx

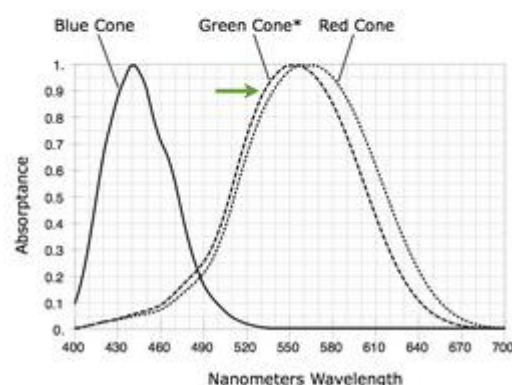
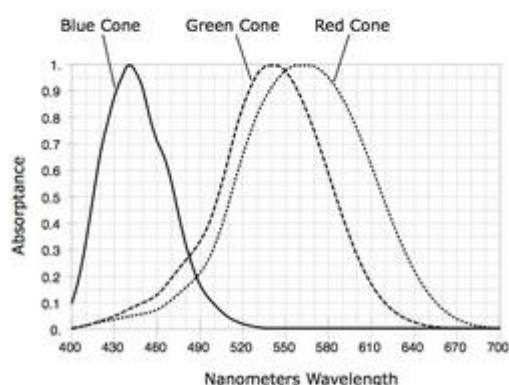


מבחן (שלוקח בערך 5 דקות) שמאפשר בדיקה עצמית של היכולת להבחין בין גוונים של כל אחד מהתלמידים לצבעים השונים בעקבות משימת סידור גוונים:

ניתן למצוא ב- http://www.colormunki.com/game/huetest_kiosk



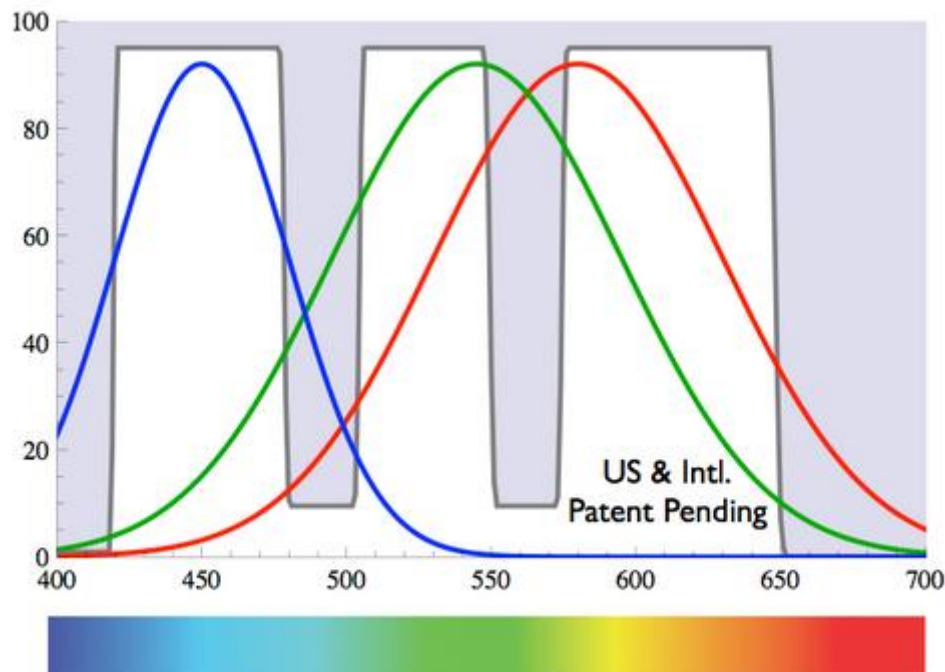
העשרה: משקפיים לעיוור צבעים



מקור: <http://enchroma.com/technology>

המשקפיים מתאימים לאנשים שסובלים מעיוורון צבעים שנובע מכך שמדוכי האדום ומדוכי הירוק שלהם רגישים לאורכי גל מאוד דומים (תמונה ימנית: למעלה – איך הם רואים את העולם, למטה – טווחי הרגישות החופפים מאוד של מדוכי אדום וירוק ; תמונה שמאלית: מצב תקין). פירוש הדבר שכמעט כל אורך גל שמעורר את המדוכים האדומים, יעורר גם את הירוקים, ולהיפך – לכן הכל נראה בגוון צהבהב.

עדשות המשקפיים מכילות פילטר מיוחד שמסוגל לסנן גלים מסוימים. הוא מסנן את אורכי הגל שבהם קיימת חפיפה גדולה בהפעלה של אדום וירוק. הדבר מאפשר הפרדה טובה יותר בין אדום לירוק.



מקור: <http://enchroma.com/technology>

בתמונה רואים את טווחי הרגישות של המדוכים השונים וכן את תכונות הפילטר (בלבן). אורכי הגל שעוברים דרך המשקפיים הם אלו שמאחוריהם מופיע רקע לבן.



מבחן מקוון, המאפשר לבדוק אם אתם עיוורי צבעים, ואם כן – באיזה סוג של עיוורון מדובר:

<http://enchroma.com/test>

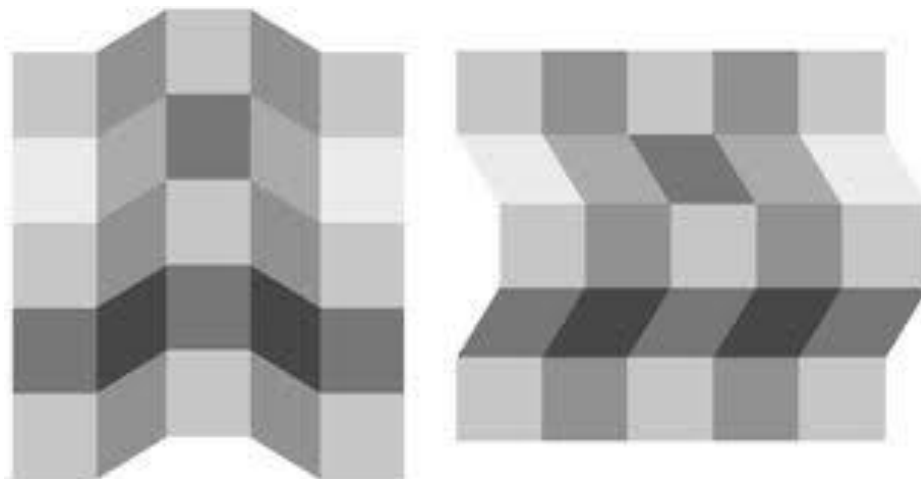
עיוורון צבעים קורטיקלי, שמקורו בקורטקס (ולא בעין): מתברר כי בקליפת המוח (הקורטקס, "החומר האפור" שבמוח) החזותית שלנו יש אזורים שהרס שלהם גורם להיעלמותו של כל צבע - צבעי העצמים, צבעי הרקע ואף צבעי החלום; עיוורון צבעים כזה (המופיע בדרך-כלל בעקבות אירוע מוחי או תאונה) מכונה "אֶכְרוֹמְטוֹפְסִיָּה קוֹרְטִיקָלִית" (עוד על תופעה זו, ראו בפעילות המקוונת "ליקויים תפיסתיים"). אכן, תחושת הצבע היא פועל יוצא של פעילות מוחית באזורים חזותיים מסוימים של קליפת המוח הגדול, ובעיקר באזור המכונה V4.

איזה צבע זה בכלל?!

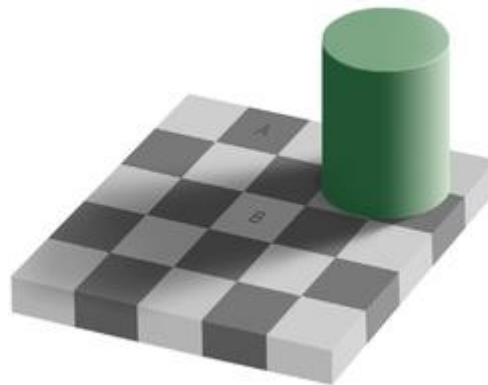
להלן הדגמה של מספר תופעות מעניינות:



התבוננו ראשית בתרשים למטה. בדקו את צבע שתי המשבצות שנמצאות מעל ומתחת לכל אחת מהמשבצות בשורה המרכזית – האם הן בעלות אותו הצבע? בדקו זאת באיור השמאלי ובאיור הימני. ניתן לבדוק ולהיווכח כי זהו אותו הצבע. מדוע הוא נתפש אם כן כשונה?



התבוננו בתרשים למטה, במשבצות A ו-B. האם הן באותו הצבע? התשובה היא – כן. מדוע אם כן הן נתפשות כבעלות צבעים שונים?



By Original by Edward H. Adelson, this file by Gustavb [Copyrighted free use], via Wikimedia Commons



ניתן להתקין תוכנה שמציינת את מספר הצבע המדויק שעל המסך. ניתן ל"הוכיח" באופן זה שהצבעים אכן זהים על-אף שהם נתפשים כשונים.

1. הורידו את התוכנה בקישור הבא:

<http://www.paciellogroup.com/resources/contrastanalyser>

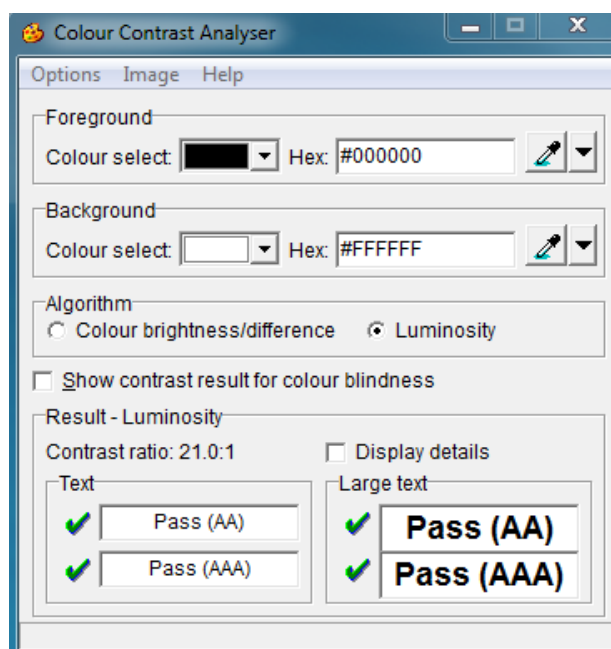
2. פתחו את קובץ הארכיב (מכוון)

3. לחצו על קובץ ההפעלה (אין צורך להתקין את התוכנה):

Colour_Contrast_Analyser.exe

4. בצדו הימני של החלון שנפתח נמצאים שני כפתורי בחירת צבעים (ראו איור). לחיצה על כל אחד מהם תהפוך את סמן העכבר ל"גלאי צבע", ובלחיצת עכבר יופיע הצבע עליו אתם עומדים. כך תוכלו להשוות את צבע כל אחת מהמשבצות – ולהיווכח שמדובר באותו צבע (כלומר באותו הרכב פיקסלים על המסך / מקרן, או באותם אורכי גל המגיעים אל עינינו)!

נסו להשוות גם בין שתי משבצות שנראות זהות – למשל משבצת B ומשבצת בהירה אחרת – ותיווכחו שהצבעים שונים!



היכנסו לקישור הבא לאשליה דומה:

<http://www.lottolab.org/illusiondemos/Demo%2014.html>

המשבצות במרכז הפאות נתפשות כצבעים שונים. הצביעו עם חץ העכבר על בפינה הימנית-עליונה להפעלת המיסוך (mask), והיווכחו כי הן באותו הצבע. כיצד קורה הדבר?

היכנסו לקישור הבא - <http://www.lottolab.org/illusiondemos/Demo%2012.html>. שימו לב כי על אף התאורה השונה בשני החלקים של התמונה, הצבעים שומרים על זהותם.

שימו לב גם כי ברגע שמסתירים מידע מסביב למשבצות (הפעלת המיסוך), הן מתגלות כאפורות. המשבצות ה"כחולות" בצד שמאל, וה"צהובות" בצד ימין, הן אפורות. הכיצד זה כך?

סיכום ביניים של התופעות שזה עתה נחשפנו אליהן: צבעים שנראים שונים מאוד עשויים להסתבר כזהים, ואילו צבעים שנראים יחסית דומים עשויים להסתבר כשונים מאוד.

הסבר התופעה: הקשר (context)

התשובה לשאלות לעיל קשורה בעיקרון של **עיבוד גבוה** של צבע. תפישת צבע במערכת הראייה הינה תלוית הקשר, כלומר האופן שבו מעובדת תפישת צבע של חלק מסוים בתמונה תלוי במידע הנוסף אשר נמצא

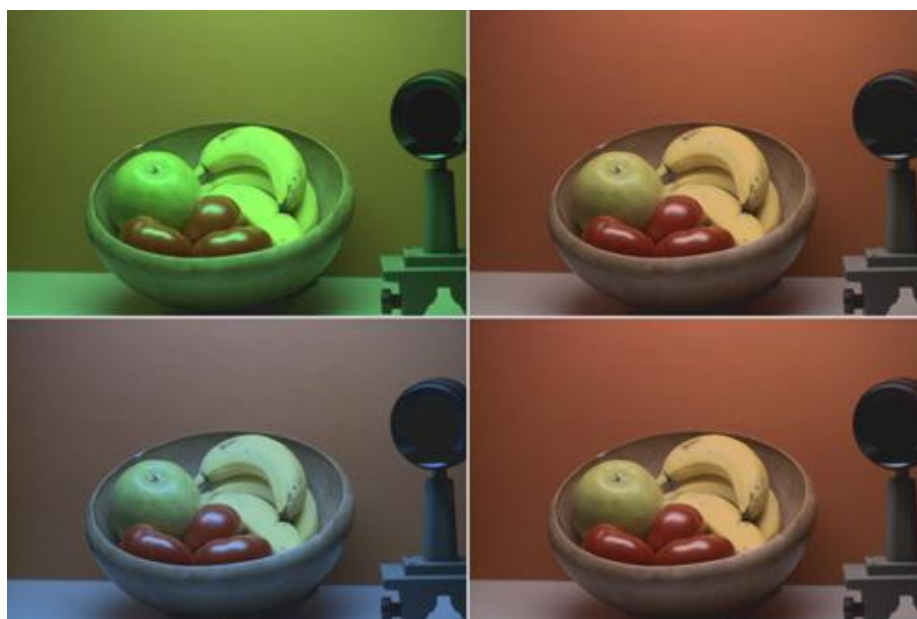
בסביבה - בהקשר - של אותו חלק בתמונה. המידע הנוסף בסביבה של אותו חלק או אובייקט, יכול לעזור למערכת הראייה "להסיק" לגבי מקור האור המשותף של התמונה, יחסי אור וצל בין האובייקטים וכד'. עקרון נוסף בתהליך התפישה, הוא העובדה כי תהליך התפישה משלב ידע מוקדם, מולד ונרכש, לגבי חוקיות וכללים בעולם. תהליך התפישה אינו תהליך פסיבי, התלוי אך ורק בקלט המתקבל ברשתית, אלא הוא תהליך **אקטיבי** המשלב ידע קודם וגלום במערכת הראייה.

נדגים את ההשפעה של הקשר בתפישה בעזרת תכונה מסקרנת של מערכת הראייה אשר נקראת **קביעות צבע**.

קביעות צבע (Color constancy)

קביעות צבע היא האפקט בו הצבע הנתפש של משטח נשאר קבוע על-אף שינויים במקור האור החיצוני. חישוב למשל על תפישת אובייקט מסוים בשעות שונות של היממה - בעת שקיעת השמש האור מורכב כידוע מהרבה יותר אורכי גל בתחום האדום מאשר בשיא היום (היזכרו בשקיעה...), ועל-אף הבדל גדול זה אנחנו תופשים את צבע הדשא, הכביש, הבגדים של האנשים הסובבים אותנו, וכד', כקבועים. כלומר באופן מאוד מפתיע, שינויים משמעותיים במקור האור לא בהכרח משפיעים על תפישת הצבע שלנו.

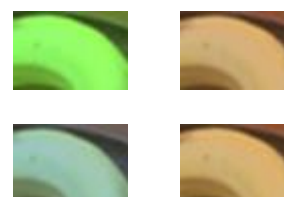
התבוננו באיור מטה. בכל הצילומים הפירות נראים באותם צבעים: הבננות צהובות, התפוח ירוק והעגבניות אדומות. ואולם, הצבע של כל פרי שונה משמעותית בכל אחד מהתצלומים.



קביעות צבע

Source: <http://www.cs.sfu.ca/~colour/research/colour-constancy.html>

הנה למשל הצבעים השונים של הבננות, כאשר אנחנו מתמקדים בחלק קטן שלהן (ועל ידי כך מתעלמים מהסביבה ומההקשר):



ניתן לראות שמחוץ להקשר, לא בכל התמונות נראות הבנות כזהות.

כיצד נוצרת קביעות צבע?

ישנן מספר תיאוריות בספרות אשר מציעות תשובה לשאלה². המשותף לכל התיאוריות, ומה שחשוב לדיוננו, הוא כי מערכת הראייה משתמשת בהקשר בעת הערכת צבע המשטח. כלומר הערכת הצבע של אובייקט על-ידי מערכת הראייה תלויה בקלט שמתקבל מהסביבה של האובייקט. המוח מנתח את תנאי התאורה של זירת ההתרחשות ומקזז אותה מכל יתר הצבעים. כך, למשל, בתאורה זרחנית ירוקה (שמאל למעלה) הבגנה נראית לנו צהובה ולא זרחנית ירוקה, כפי שמסתבר כאשר מוציאים את הצבע מההקשר.



צרו בעצמכם את אשליית תפיסת הצבע: קחו שני ריבועים בצבע זהה. צרו עבור כל אחד מהם סביבה (רקע) שונה של צבעים. כעת תוכלו להיווכח בכך שמערכת הראייה שלכם תופסת את שני הריבועים הזהים כבעלי צבעים שונים. כלומר המשטחים אשר צבעם האמיתי זהה, יחוו כעת כבעלי צבעים שונים.

כעת צרו את התחבולה בכיוון ההפוך (יותר קשה): קחו שני ריבועים בגוונים דומים אך לא זהים, ונסו ליצור לכל אחד מהם סביבה שתגרום להם להראות כצבעים זהים.

כדוגמה לחלק זה ניתן גם להביא את הוויכוח הסוער שהתקיים באינטרנט על צבעי שמלה שצולמה (האם צבעיה כחול ושחור או לבן וזהב) [https://en.wikipedia.org/wiki/The_dress_\(viral_phenomenon\)](https://en.wikipedia.org/wiki/The_dress_(viral_phenomenon))

היכן במוח נוצרת תופעת קביעות הצבע?

תופעה מורכבת כקביעות צבע, אשר מכילה חישובים רבים של המוח, מקורה בשלב עיבוד גבוהים המתבצעים באזורים שונים בקורטקס - לשם מגיע המידע לאחר שעבר עיבוד פשוט (למשל סיווג לפי קווים באזור V1).



לקריאה נוספת: http://en.wikipedia.org/wiki/Cerebral_achromatopsia

איך מסבירים מה זה "אדום" למי שאינו מסוגל לראות צבעים?

כפי שלמדנו בפרק, צבע הוא תחושה שהמוח שלנו יוצר, כפרשנות לאורך הגל של הגירוי שנקלט. כאן נפתחת הזדמנות לעורר דיון פילוסופי אודות משמעות החישה, דרך העיקרון של חישת צבע. הידיעה שלנו ש"משהו הוא אדום" היא חזקה כל כך, עד שקשה לנו לקבל את העובדה שמבחינה פיזיקלית "אין דבר כזה אדום", אלא יש רק אור באורכי-גל שונים. התהליך הפיזיולוגי של עיבוד צבע אינו מסוגל להסביר לנו בדרך אינטואיטיבית, לפחות בינתיים, את החוויה של ראיית צבע.

לתחושה או לחוויה של חישה קוראים בשפה המקצועית **קוואליה**. קוואליה היא החוויה הסובייקטיבית הבלתי-ניתנת לתיאור במילים. היא הדבר שאנחנו בטוחים שיש לעצמנו אבל לא יכולים להיות לגמרי בטוחים שיש למישהו אחר.

² See: 'Color constancy', David H. Foster



את הדיון כדאי לפתוח בסיפור על המדענית מרי (ניסוי מחשבתי הוצע במקור על ידי פרנק ג'קסון):

"מרי היא מדענית מבריקה, ומסיבה כלשהי, נאלצת לחקור את העולם מתוך חדר צבוע בשחור ולבן, דרך מסך טלוויזיה המשדר בשחור ולבן ללא צבעים. היא מתמחה בניורופיזיולוגיה של הראייה, ומשיגה, כך אנו מניחים, את כל המידע הפיזיקלי שאפשר לדעת לגבי מה שקורה במוחנו כשאנחנו רואים עגבניות או את השמים, מכירה את השימוש שלנו במונחים אדום וכחול, וכך הלאה. היא מגלה לדוגמה, בדיוק אילו אורכי גל המוחזרים מן השמים מעוררים את הרשתית, ובדיוק כיצד מערכת העצבים המרכזית מכווצת את מיתרי הקול ומעבירה אוויר מן הריאות כדי לבטא את המשפט 'השמים כחולים' [...]. מה יקרה כשמרי תשתחרר מחדרה השחור-לבן, או כשיינתן לה מסך טלוויזיה צבעוני? האם היא תלמד משהו **חדש** או לא?"

כדאי לפתוח את השאלה לדיון בכיתה. הנקודות המרכזיות לדיון:

- האם מרי תלמד משהו חדש כשהיא תראה לראשונה בצבע?
- השאלה המרכזית בסיפור על מרי היא **האם חוויה של צבע מוסיפה משהו על הבנה של תהליך עיבוד הצבע**. זוהי שאלה עקרונית במדעי המוח. באופן עקרוני מדעני מוח יוצאים מנקודת הנחה שכלל החוויה האנושית מעובדת במוח האנושי, ואם נבין את כל התהליכים שמתרחשים במוח על בוריים, נגיע להבנה של החוויה האנושית. השאלה האם **עצם החוויה** מוסיף משהו מעבר להסברים הבינומיים והפיזיולוגיים שקורים במוח, היא בעצם השאלה האם מדעי המוח יכולים אי-פעם להגיע לפתרון של חידת המוח, ובמובנים מסוימים זו גם השאלה האם יש רוחניות מעבר לחומר (בדמות הנפש, למשל).
- אם נבין לגמרי כיצד פועלת מצלמה, ונשיג את כל החלקים המרכיבים אותה – כנראה שנוכל לייצר מכשיר שמצליח לצלם. מה יקרה אם נגיע להבנה מלאה של תהליך עיבוד הצבע במוח, ונצליח להרכיב רקמה או מכשיר שמחקה באופן מושלם את מערכת הראייה האנושית – האם הדבר שייצרנו יחוש חוויה של צבע?

לקריאה נוספת:

http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%94%D7%97%D7%93%D7%A8_%D7%A9%D7%9C_%D7%9E%D7%A8%D7%99

כמובן שכדאי להדגיש שאין בדיון זה תשובות נכונות / לא נכונות (אך אולי ביום מן הימים תהיינה...).



דברים מעניינים נוספים שממש כדאי להעביר, בכיתה או בבית:

- האם אפשר לשמוע צבעים? סרטון של TED:
http://www.ted.com/talks/neil_harbisson_i_listen_to_color#t-319877
- מאמר בנושא הגדרת שמות של צבעים ומה הופך גוונים שונים להיחשב כאותו צבע:
<http://www.calcalist.co.il/local/articles/0,7340,L-3524269,00.html>

מקורות והפניות לחומר קריאה חיצוני:

הפיזיולוגיה של ההתנהגות: כרך א', קרלסון, האוניברסיטה הפתוחה. פרק 6, ראה.

הסבר נוסף לגבי החזרת אור וצבעים ניתן למצוא באתר אלקטרואופטיקה של רשת אורט:
<http://c3.ort.org.il/Apps/WW/page.aspx?ws=c95853ea-7439-4431-b760-fa7e35c2dc61&page=3e98e78a-2822-41a6-a11b-f76b8cd85ab4&fol=f5ab46de-e695-415e-b94a-a6165379c754>

ניסויים שאפשר לבצע בכיתה מתוך הספר הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים: מבוא לתקשורת חזותית-נסויים ופרייקטים (78-1043818), תשס"ו 2005, מט"ח.
<http://www.school.kotat.co.il/KotatApp/Viewer.aspx?nBookID=93550820#18.3667.5.fitwidth>

- ניסוי מס' 1, עמ' 26-9, רגישות העין לתנועה.
- ניסוי מס' 4, עמ' 59-47, ייצוג והרכבה של צבע.
- יש עוד הרבה ניסויים ופרייקטים שמוצעים בספר, שווה להעיף מבט.

ערך רשתית באתר אנציקלופדיה Ynet: <http://www.ynet.co.il/yaan/0,7340,L-96275-OTYyNzVfMTU2NDk0ODI2XzE0ODY4NzlwMAAeqeq-FreeYaan,00.html>

<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:AhpIpbq4UwJ:energy.gov.il/Subjects/EnergyConservation/ECexpert/Documents/NaturalLightingPrincipals/02ch16p.doc+&cd=2&hl=iw&ct=clnk&gl=il>

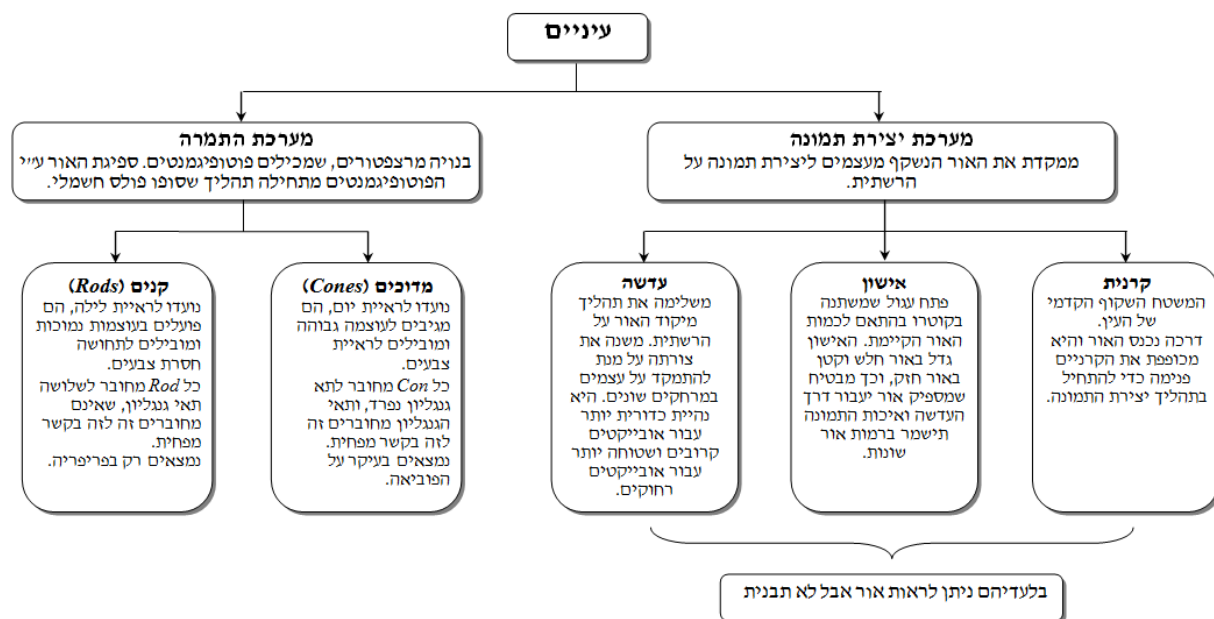
הסבר נוסף לתופעת דמויות הגרר ניתן למצוא בספר: יונתן גושן-גוטשטיין ודן זכאי (2006). פסיכולוגיה קוגניטיבית - כרך ב – זיכרון. רעננה: האוניברסיטה הפתוחה.

התנסות נחמדה של שילוב צבעים (רץ בעזרת Adobe Shockwave player):
<http://science.cet.ac.il/science/colors/color2.asp>

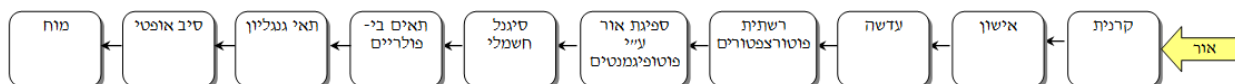


דברים שלא כדאי לוותר עליהם (לפחות למורים):

תרשים שעוזר להבין את איברי מערכת הראיה שדיברנו עליהם עד כה:



תרשים המתאר את זרימת המידע שדיברנו עליה עד כה:



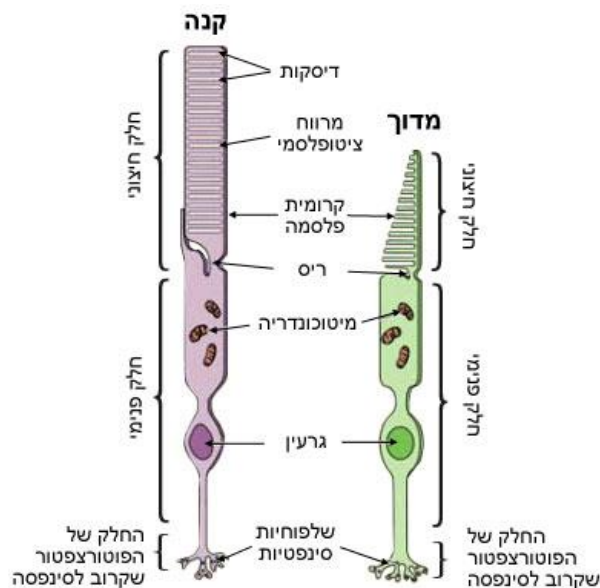
שני התרשימים לקוחים מתוך האתר:

http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:6nFzwZKJWEkJ:ataryafe.com/ima/ge/users/65064/ftp/my_files/psy_lessons/%25D7%25A4%25D7%25A8%25D7%25A7%25204.doc+&cd=9&hl=iw&ct=clnk&q=il

נספחים

נספח 1: קולטני אור מסוגים שונים מפרשים את הקרינה בצורה שונה

מלבד התדרים השונים של האור (כלומר אורכי הגל השונים), יש לאור גם עוצמות שונות – האור יכול להיות חזק או מעומעם. טווח העוצמות הוא מאד רחב: ביום שמש מגיעה העוצמה עד ליותר מ-100,000 **לוקס**, ובליילה העוצמה שעדיין מאפשרת לעיני האדם להבחין בעצמים, היא בסדר גודל של אלפית - 1/1,000 הלוקס. משמעות הדבר היא שהעין האנושית חשה בטווח עוצמות שהיחס ביניהן הוא אחד למאה מיליון! מה שמאפשר זאת הוא העובדה שמערכת הראייה מכילה שני "איברים" שונים, בעלי מבנים שונים ותפקוד שונה, ששניהם אמורים על קליטת האור. שני הסוגים של קולטני האור הם הקנים והמדוכים:



Copyright: http://thebrain.mcgill.ca/flash/d/d_02/d_02_m/d_02_m_vis/d_02_m_vis.html

הקנים והמדוכים הם דוגמה לעיבוד מקביל במערכת הראייה, וליתר דיוק ברשתית. למעשה, הרשתית מכילה שני סוגים של קולטני אור, ומתרחשים בה במקביל שני תהליכים של קליטת אור. כל אחד מהתהליכים מתאים לקליטת אור בעל תכונות שונות.



כדאי לכתוב על הלוח 2 כותרות: "קנים" ו"מדוכים", ומתחת לכל אחד לפרט במהלך השיעור את תכונותיו הבולטות.

הקנים רגישים לאור בעוצמה נמוכה יותר מן המדוכים. מבחינה פיזיולוגית משמעות הדבר שקן אור בעוצמה חלשה תוכל לגרום לעירור של קנים, אך לא לעירור של מדוכים. במילים אחרות: הקנים יכולים לבצע המרה של האות הראייתי לאות עצבי בכמות קטנה מאוד של אור, ואילו המדוכים אינם יכולים לעשות זאת. מן הבחינה הזאת, המדוכים "עיוורים" לאור בעוצמת תאורה חלשה (שימו לב: לא משנה באיזה אורך גל, מדובר פה בעוצמה של התאורה). זו הסיבה שבראיית לילה אנחנו מסתמכים על הקנים.

גם למדוכים יש יתרונות על פני הקנים: הם מעניקים לנו את ראיית הצבע ואת חדות הראייה.



הידעתם? מדוע הלילה בטבע נראה כחלחל (ולא אדמדם)? אמרנו שהמדוכים קולטים צבעים, וגם שהם אינם יעילים בתנאי אור קלוש. בעוצמות הארה נמוכות, למשל לאור הירח, העין כמעט אינה מסוגלת

להבחין בצבעים. מדוע? משום שהקולטנים שרגישים לתאורה נמוכה (קנים) לא רגישים לצבעים! המדוכים אמנם רגישים לצבע, אך תנאי תאורה נמוכה לרוב לא מעוררים אותם. ואמנם, מבין המדוכים השונים הקולטים צבעים שונים, המדוכים הרגישים לאורכי גל קצרים קולטים טוב יותר תאורה נמוכה. לכן בלילה כמעט לא רואים צבעים, ובעיקר לא רואים את הצבעים האדומים והכתומים – שאורך הגל שלהם ארוך.

נספח 2: תיאוריות נוספות של תפיסת צבע

תיאוריית הצבעים המנוגדים

יותר ממאה שנה לאחר הצעת התיאוריה הטריכרומטית, הציע אוולד הרינג, פיזיולוגיסט גרמני, את **תיאוריית הצבעים המנוגדים**, ולפיה המוח מייצג צבעים כהפכים זה של זה: אדום הוא ההפך מירוק, וכחול הוא ההפך מצהוב. העדות שהובילה לתיאוריה היא שכשמנסים לדמיין שילובי צבעים, אפשר להעלות בדעתנו בקלות ירוק-כחלחל או ירוק-צהבהב, אך בשום פנים לא ניתן לדמיין ירוק-אדמדם – מכאן שאדום וירוק הם הפכים. דבר דומה לגבי צהוב-כחלחל (אין דבר כזה).

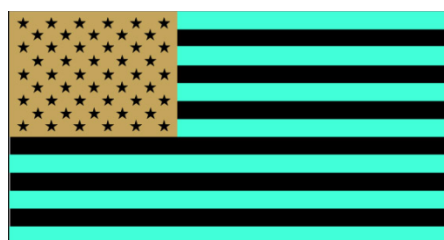


תופעה נוספת המחזקת את תיאוריית הצבעים המנוגדים היא אשליית הצבע הזאת:

<https://www.youtube.com/watch?v=7knnO4vKgXg>

הוראות לאשליה: מפעילים את הסרטון ומבקשים מן התלמידים למקד את המבט בנקודה השחורה שבמרכז ולהשתדל למצמץ כמה שפחות. בעת חילוף התמונה קורה דבר מדהים – התמונה "נצבעת", כשלמעשה היא מוצגת בגוני אפור (אפשר להציג את החילוף שוב כדי לשכנע את התלמידים שהם ראו תמונה חסרת צבע לגמרי).

אם אין אפשרות להראות סרטון, אפשר להציג על הלוח את התמונה הבאה. יש להתמקד במרכז התמונה במשך 30 שניות, ואז לעבור לשקף לבן חלק:



רמז להסבר: שדות הראייה של נירונים מסוימים המעבדים צבע הם בצורת עיגול עגולים של מרכז-שוליים.

ההסבר המלא:

ההתמקדות בתמונה בעלת צבעים מסוימים יוצרת עייפות (FATIGUE) בתאים. כשהתמונה מתחלפת לרקע לבן (או לגוני אפור, כלומר שילובים עדינים של לבן [כל הצבעים] עם שחור [ללא צבע]), הצבע הלבן שמגיע ממנו אל העין מפעיל את כל המדוכים, כי לבן הוא שילוב של כל הצבעים. ואולם, התאים שעבדו לאורך זמן בצפייה בגירוי שהוצג – "עייפים" (ראו הערה בהמשך), וכעת הם משגרים למוח אותות חלשים. לעומתם, התאים האחרים שלא היו בשימוש עדיין "טריים" ושולחים אותות חזקים. לכן הצבעים של הגירוי המקורי כמעט אינם נראים, וכך נוצרת אשליה שרק הצבעים המשלימים מוצגים.

לתופעה הזאת קוראים בשם **דמות גרר שלילית**: בעקבות צפייה ממושכת בגירוי כלשהו, יורדת היכולת לעבד אותו. יש גם תופעה הפוכה, הקרויה **דמות גרר חיובית**, שבה בעקבות צפייה ממושכת בגירוי מסוים –

ממשיכים לראות אותו גם לאחר שהוא נעלם. דוגמה לכך היא שאם מביטים באופן ישיר במקור אור חזק (לא לנסות להביט בשמש, עדיף בנורה), גם לאחר שמסיטים את המבט ממשיכים לראות זוהר בהיר שכאילו צף על פני שדה הראייה. תופעה זו מתקבלת כשהתגובה של הקולטנים דועכת לאט.

דוגמאות נוספות לאשליות דומות:

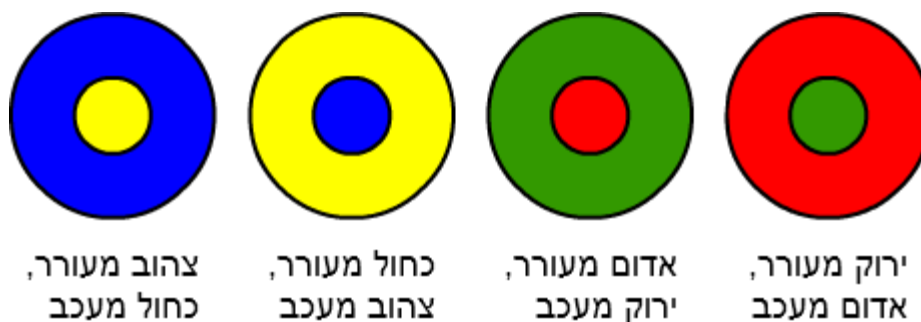
<http://faculty.washington.edu/chudler/after.html>



תיארנו את הקולטנים כ"עייפים" כדי לפשט את ההסבר. בפועל, הקולטנים עוברים תהליך שנקרא הביטואציה (habituation, הסתגלות). בתהליך זה, נירון שקיבל את אותו קלט למשך פרק זמן כלשהו, מוריד את התגובתיות ויורה פחות בעבור אותו קלט. האופן שבו הקולטנים עוברים הביטואציה הוא בתהליכים ביוכימיים, שמביאים את התא למצב שאין לו יכולת להמשיך ולהעביר אות חשמלי. דברים רבים יכולים להביא למצב הזה, למשל שינוי במוליכות האשלגן (שמקשה על יצירת פוטנציאל פעולה), סיום מאגר וסיקולות הניורטרנסמיטר (וצורך בזמן כדי למחזר את המאגר), ועוד הרבה דברים אחרים.

מהו המנגנון שמאפשר יצירה של "צבעים מנוגדים", וגם – האם התיאוריה הטריכרומטית נכונה? התשובה עולה מתוך תיאוריה שלישית, **תיאוריית שני השלבים**:

בשלב הראשון, מדוכים (פוטורצפטורים) משלושת הסוגים שדיברנו עליהם מזהים את הצבע. בהמשך, כפי שלמדנו, המידע עובר לתאי גנגליון הרגישים לצבע, ומאופיינים כמו כל תאי הגנגליון בשדות קלט של מרכז-שוליים. שדות הקלט של תאי הגנגליון הרגישים לצבע מאורגנים כך שהמרכז מגיב לצבע מסוים, ואילו השוליים מגיבים לצבע הנגדי:



לקריאה נוספת ומומלצת על שדות הקליטה של תאים גנגליונים הרגישים לצבע, ועל היצירה של צבעים שונים ברמת הרשתית: קרלסון עמ' 221-222.



כלי עזר להוראה: כעת אפשר להיעזר בתרשים שמסכם את התיאוריות לגבי ראיית צבע:

"עיוורים לשעבר" – עבודה עם מאמר

מטרות

- התלמידים יבינו ויסכמו מאמר המשלב נושא מדעי וחברתי.
- התלמידים יכירו את בעיית הִרְזוּד (קטרקט).
- התלמידים ילמדו על מנגנון הראייה דרך ממצאי הטיפוליים המתוארים במאמר.
- התלמידים ילמדו על חשיבותה של ראיית תנועה בתהליכי התפיסה של אובייקטים.
- התלמידים ילמדו על ההשלכות ההנדסיות-טכנולוגיות שנבעו מתוך המחקר.

דרך ההוראה: עבודה עצמית

משך הזמן המוקצה: שעתיים

עבודה זו כוללת מספר שאלות למענה בעקבות מאמר בשם "עיוורים לשעבר" (מתוך המגזין "סינטיפיק אמריקן ישראל"). מצורפת גם הפניה לסרטון של הרצאת TED בנושא המאמר. הסרטון והמאמר דומים אמנם, אך חלק מהנקודות לא נמצאות בסרטון. השאלות מתייחסות למאמר בלבד. אפשר על כן לצפות בסרטון (בכיתה למשל) כדי להקל על הבנת המאמר, ואחר כך לבקש מהתלמידים לקרוא את המאמר לבדם. ניתן להורות לתלמידים לענות על השאלות כעבודה אישית בשאלון המקוון שבאתר, או לחלופין ניתן לענות עליהן בכיתה, במליאה.



מאמר "עיוורים לשעבר": <http://sciam.co.il/archives/7060>

סרטון "How brains learn to see":

http://www.ted.com/talks/pawan_sinha_on_how_brains_learn_to_see#t-11657





שאלות בעקבות קריאת המאמר

1. מה הייתה המטרה המדעית של הקמת המרכז לעיוורים?

תשובה: ללמוד כיצד המוח לומד לפרש מידע חזותי.

2. החוקרים התכוונו לבדוק ילדים שהשיבו להם את ראייתם לאחר שנות החיים הראשונות שבהם היו עיוורים, אך הם חששו שהראייה של הילדים תהיה פגומה על אף תיקון הליקוי בעיניים.
א. מה הייתה הטענה שהייתה מקובלת עד המחקר בפרקאש?
ב. על אף החשש הוחלט להמשיך במחקר. מדוע?

תשובה:

א. הטענה שהתבססה על ניסיון קודם בילדים ובבעלי חיים הייתה ששנות החיים הראשונות הן תקופה מכרעת בפיתוח היכולת החזותית ביכולת המוח לפרש את מה שהעין רואה) ולכן הראייה תישאר לקויה מאוד גם לאחר הניתוח.
ב. בבדיקת המחקרים שקדמו למחקר בפרקאש התברר שייתכן שמקור הבעיה בראייה לאחר תיקון הליקוי בעין אינו קשור לגיל הילדים. המסקנה מן המחקרים האלה אינה מובהקת. הפסקה במאמר המתאימה לתשובה היא:

"ובכל זאת הרגשתי שכדאי לתת סיכוי לטיפולים. יש להתייחס למקורות ישנים, כמו זה של צ'סלדן, במידה של זהירות. בהחלט סביר שהתוצאה הלא מוצלחת של הניתוח נבעה מנזק לרקמות שנגרם בשל טכניקות ניתוח גסות ומיושנות להסרת ירוד. כמו כן, רוב המחקרים בבעלי החיים בדקו גורים שעין אחת שלהם נסגרה בתפרים, ואילו ילדי פרקאש סבלו מהפרעה של הסתרה בשתי העיניים. זה קצת מוזר, אבל חסימת עין אחת גורמת פגיעה קשה יותר בראייה באותה עין מאשר חסימה של שתי העיניים. השאלה אם יוכל להתפתח תפקוד חזותי כלשהו לאחר טיפול בעיוורון בגיל הילדות המאוחר נותרה פתוחה במידה רבה."

3. לאחר שתוקנה ההפרעה בעיניים נערך מעקב אחר היבטים שונים בראייה של הילדים. מתוך המתואר במאמר, מה הייתה הבעיה המרכזית בתמונה שראו הילדים לאחר החזרת הראייה? הסבירו.

תשובה: הבעיה הייתה בארגון הרכיבים בתמונה. רכיבים רבים נראו כנפרדים גם אם הם היו חלק ממכלול. חלקים בעלי גבולות נראו כנפרדים ולכן היה קשה לזהות עצמים שלמים. אצל הילדים לא נוצרו רמזים חזותיים שאפשרו להם לשייך את כל הקווים לעצם אחד.

4.

א. האם לדעתכם נער שהושבה לו ראייתו לפני זמן קצר יוכל לראות את פרצוף הסמיילי? הסבירו את תשובתכם.



ב. על פי ממצאי המחקר, מה צריך להתרחש כדי שהנער יוכל לראות את פרצוף הסמיילי כראוי?

תשובה:

- א. כנראה שלא, הנער יראה כל צורה בנפרד אבל סביר להניח שלא יוכל לארגן אותן לכדי פרצוף.
- ב. יש צורך בתנועה. במשך הזמן יש למידה שמה שנע יחד הוא חלק ממכלול אחד (יש קושי בראיית תמונה סטטית).

5.

- א. אילו היבטים של הראייה אינם מגיעים ברמתם לרמה של אדם שרואה מלידה?
- ב. האם אפשר לומר בוודאות, על פי המאמר, שהיבטים אלו לא יגיעו לרמה הנורמלית?

תשובה:

- א. מידת החדות, ניגודיות מרחבית ויציבות אופטית אינן מגיעות לרמה הנורמלית.
- ב. על פי הכתוב הם אינן מגיעות לרמה זו גם כעבור שנה, אך אין ממצאים על זמן ארוך יותר. לכן אי אפשר להסיק בוודאות שהן לא יגיעו לרמה זו כעבור זמן ארוך יותר, או בעזרת תרגול שונה ממה שניתן.

6. מה אפשר ללמוד מן המחקר על הקשר שבין חוש המישוש לחוש הראייה?

תשובה: על פי המחקר הקשר בין החושים הוא קשר נרכש שאפשר ללמוד אותו. בתחילה הילדים לא יכלו לזהות את החפץ שמיששו בלי לראות אותו, אך בתוך כמה שבועות הם הצליחו בכך.

7. מה אפשר ללמוד מן המאמר על היכולת של המוח ללמוד לראות?

תשובה: המוח הוא גמיש, מערכת הראייה יכולה ללמוד ולהסתגל להתנסויות חדשות גם בשלהי הילדות וגם אצל מבוגרים צעירים. אם כי, כאמור, יש היבטים בראייה שאינם מגיעים לרמה הנורמלית.

8. למחקר היו השלכות בתחום הקליני ובתחום ההנדסי-טכנולוגי שהן מעבר לתחום הצר של המחקר בעיוורים.

- א. בתחום הקליני: מה הקשר שנמצא בין תוצאות המחקר לאוטיזם?
- ב. בתחום ההנדסי: מה היישום של המחקר?

תשובה:

א. הלקויות שנמצאו אצל הילדים בהטמעת המידע החזותי מיד לאחר שהחלו לראות דומות בכמה היבטים ללקויות שנמצאו אצל ילדים הלוקים באוטיזם. בהמשך, נעשו במעבדה סדרה של מחקרים המבקשים לבחון את הסיבות להפרעות העיבוד החושי אצל ילדים עם אוטיזם.

ב. פיתוח יישום טכנולוגי בזיהוי אוטומטי של תבניות חזותיות של עצמים (כגון פרצופים) על ידי המחשב על בסיס המחקר שמראה את החשיבות של התנועה בזיהוי תמונה.

9. מה מתוכנן להמשך המחקר?

תשובה:

- א. שימוש בדימות תפקודי מוח בתהודה מגנטית (fMRI) לגילוי שינויים בקליפת המוח בשלבים השונים של התארגנות המוח.
- ב. מחקרים לבדיקת ההפרעות בעיבוד החושי אצל אנשים הלוקים באוטיזם.
- ג. פיתוח תוכנה לגילוי אוטומטי של קטגוריות חזותיות של עצמים כגון פרצופים בסרטונים.

ליקויים תפיסתיים

מטרות

- התלמידים יבינו כי קיים קשר בין הפרעות בתפיסת המציאות באמצעות החושים לבין פעילות לקויה של מערכת העצבים.
- התלמידים יסבירו את המנגנון העצבי הגורם לאקינטופסיה ("עיוורון תנועה").
- התלמידים יסבירו את המנגנון העצבי הגורם לאכרומטופסיה (חוסר יכולת לראות צבעים).
- התלמידים יסבירו את המנגנון העצבי הגורם לפרוסופאגנוזיה ("עיוורון פנים").

דרך ההוראה: למידה עצמית מקוונת

משך הזמן המוקצה: שעה

הערכה: מטלה שיתופית (כניסה מתוך אתר האינטרנט, בנפרד מהפעילות המקוונת)

מסמך עם מתווה מפורט של הפעילות המקוונת נמצא באתר.



כשהעיבוד הולך לאיבוד

מטרות

חלק א' (אשליות בחושים שונים):

- התלמידים ייווכחו שניתן להתנסות באשליות במגוון חושים.
- התלמידים יסיקו מסקנות על אופן פעולת מערכת החישה מתוך ההתנסות באשליות שונות.

חלק ב' (חושים מתנגשים):

- התלמידים יתנסו ב"התנגשויות" של קלטים מחושים שונים ויסבירו את אופן ההתמודדות של מערכת החישה איתן.
- התלמידים יסכמו כי כל הידוע לנו על העולם תלוי בייצוג ובעיבוד.

דרך ההוראה: למידה עצמית מקוונת

משך הזמן: שעה (חצי שעה לכל חלק)

הערכה: בוחן (כניסה מתוך אתר האינטרנט, בנפרד מהפעילות המקוונת)

התייחסות לידע קודם (משיעורים קודמים באותו פרק)

- מערכת הראייה
- פעילות מקוונת "אז כמה חושים יש לנו בעצם?"

הרציונל

מערכת העצבים היא ה"מפקד" של הגוף, וכדי לדעת אילו פקודות כדאי לתת, היא צריכה לאסוף כמה שיותר מידע על העולם. היא עושה זאת באמצעות מערכת החישה. כל מערכות החוש קולטות בקולטנים (רצפטורים) תכונות פיזיקליות או כימיות המצויות בעולם, ומנסות לפרש מהן תמונה שלמה שתאפשר לאורגניזם לבחור דרך פעולה שתעניק לו שרידות מיטבית.

פרק הראייה הדגים היטב כיצד החישה החזותית (הוויזואלית) תלויה ביכולת להמיר אלמנט פיזיקלי לאות חשמלי, לייצג את המידע ולעבד אותו ברמות שונות. ראינו גם כיצד העיבוד המסוים שאנחנו עושים למידע יכול לתעתע בנו, במקרים של אשליות הראייה. **כעת נראה שכל הדברים האלה קורים גם בחושים אחרים.** נדגים אשליות בחושים שונים, ונראה כיצד מערכת העצבים יוצרת אינטגרציה חושית. בחלק ב' של נושא זה נתייחס למקרים שבהם יש סתירה בין החושים, ומערכת העצבים מעדיפה מערכות חוש מסוימות על-פני אחרות.

שימו לב:

1. בפעילות זו יש צורך באוזניות / מקולים.
2. הפעילות המקוונת מחולקת לשני חלקים (כשעה לכל חלק):
 - א. אשליות בחושים שונים
 - ב. חושים מתנגשים



מסמך עם מתווה מפורט של הפעילות המקוונת נמצא באתר.

מה שמזכיר לי...



למידה וזיכרון

למידה וזיכרון

מטרות

- התלמידים ייחשפו לקשר בין זיכרון ובין למידה, ולעיקרון שמבנה המוח מגלם את הזכרונות שבו.
- השוואה ראשונית בין זיכרון מחשב ובין זיכרון במוח – מערכות שונות, תכונות שונות, תפקוד שונה!
- התלמידים ייחשפו לתופעות מעניינות מתחום הזיכרון, ודרך ילמדו על טבעו ומאפייניו של הזיכרון האנושי.

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית משולבת התנסויות

משך הזמן: שעותיים

ידע קודם

מושגים רלוונטיים לשיעור זה שייטכן שהתלמידים מכירים:

- תקשורת בין תאים, מתוך הפרק "עצבים חשופים".
- פוטנציאל פעולה, מתוך פרק "לזוז בלי לחשוב".

חומר קריאה חיצוני:

- "מבוא לפסיכולוגיה", חטיבות 4 (למידה) ו-5 (זיכרון), ריצ'רד ג' גריג ופיליפ ג' זימברדו, האוניברסיטה הפתוחה: [קישור לספר המקוון \(גרסה חלקית\)](#)
- "פסיכולוגיה קוגניטיבית", יונתן גושן-גוטשטיין ודן זכאי, האוניברסיטה הפתוחה, רעננה, תשס"ו - 2006: [קישור לספר המקוון \(גרסה חלקית\)](#)
- קרלסון נ', הפיזיולוגיה של ההתנהגות כרך ב', מהדורה 9, האוניברסיטה הפתוחה.

הפעלה לפתיחת השיעור (עוד לפני שחושפים לתלמידים את הנושא): פרדיגמת DRM

1. הקריאו לתלמידים את רשימת המילים המצורפת, ומיד לאחר מכן בקשו מהם לכתוב כמה שיותר מילים שהם זוכרים.
2. כעת בקשו מן התלמידים לכתוב על יד כל מילה עד כמה הם בטוחים שהיא הופיעה ברשימה (דירוג 1-5).



רשימת המילים: סוכריה, קרם, ממתק, לאפות, סוכר, הקצפה, חמוץ, שוקולד, עוגיות, טעם, להשמיין, וניל.

דיון בעקבות ההתנסות:

- (למורים: לפני שאתם ממשיכים בקריאה כדאי שתבצעו את ההתנסות בעצמכם!)
- חלק מן התלמידים יזכרו מתוך הרשימה את המילה מתוך, ואף ידרגו זיכרון זה ברמת ביטחון גבוהה.
- המילה אמנם קשורה לכל אחת מן המילים האחרות ברשימה, אך היא בעצמה לא הופיעה כלל.
- מי שזכר את המילה מתוך ירגיש מעט משונה, אבל הוא בחברה טובה: הפרדיגמה הוצגה לראשונה במאמר מ-1995, ומאז היא מצויה בשימוש נרחב בשדה המחקר הפסיכולוגי.
- הפרדיגמה גרמה לכמה מאתנו ליצור זיכרון של דבר שלא קרה, ואף להיות בטוחים שהוא נכון כמו שאר הזיכרונות שלנו. אם כך, מידת האמינות שאנחנו מייחסים לזיכרון אינה בהכרח משקפת את נכונותו.
- הזיכרון שלנו אינו כמו מצלמה שדוגמת את העולם בדיוק כפי שהוא. הזיכרון הוא תיעוד של התפיסה שלנו, שמושפע מגורמים רבים. מורכב מאוד!
- כעת נצלול אל עולמו המרתק והמסתורי של הזיכרון האנושי...

העשרה:

1. "ללכת לאיבוד בקניון: זכרונות מדומים – הניסויים של אליזבט לופטוס", לורן סלייטר. מתוך הספר "לפתוח את התיבה של סקינר", פרק 8. 2005, הוצאת אריה ניר, תל-אביב.
2. [מאמר](#)
3. [המחקר המקורי שהראה לראשונה את פרדיגמת DRM.](#)

מעמדו של הזיכרון במוחו של הסובייקט

בפרק על חישה ותפיסה למדנו כיצד המוח נותן פרשנות לגירויים שהוא קולט. הסברנו שלפעמים המוח משנה את הקלט כדי שיתאים לתבניות מוכרות (וכך יוצר אשליות). במילים אחרות – השתכנענו שהאופן שבו אנו תופסים את העולם אינו משקף תמיד את המציאות כהווייתה. בפרק זה נדון בכך שהיכולת שלנו **ללמוד** דברים **ולזכור** דברים מבוססת בראש ובראשונה על היכולת שלנו **לתפוס** אותם. אפשר להסיק מכך, שגם הזיכרונות שלנו אינם מייצגים בהכרח את המציאות כהווייתה, אלא הם מייצגים את האופן שבו תפסנו את המציאות בנקודת זמן כלשהי.

איך למידה קשורה לזיכרון?

למידה היא למעשה יצירה של זכרונות:

- מתחילים ממצב שבו לא יודעים דבר כלשהו, כלומר שמבחינה פיזיולוגית המוח אינו מכיל ייצוג של הדבר.
- לאחר חשיפה אחת או יותר המוח לומד שהדבר קיים, ונוצר ייצוג של הדבר במוח (כיצד? על כך בשיעורים הקרובים!).
- הייצוג שנוצר ברמה הפיזיולוגית במוח הוא למעשה הזיכרון.

פירוש הדבר הוא שכל פיסת מידע שאנו זוכרים מיוצגת באופן פיזיולוגי במוח שלנו. אכן, מוחנו זוכר כמויות אדירות של מידע. רוב הזמן איננו מודעים כלל לכל כמויות המידע שאנחנו יודעים. כדי "להיזכר" בפיסת מידע, עלינו להפעיל את הייצוג שלה במוח ולהעלות אותה למודעות.

איך נוצרים במוח זכרונות?

כדי לענות על שאלה זו, ניזכר במה שלמדנו על תקשורת בין נוירונים.

צפו בסרטון הבא:

<http://www.youtube.com/watch?v=6Ra3il45vnE&list=PLXWBPo42YRzYNSNDjoziQBjwBS9Cvj3q>



הסרטון מתאר את העברת המידע ברשת נוירונים. מידע מתקדם בין אזורים במוח בזכות הקשרים הסינפטיים בין נוירונים. בעבר ראינו שהתקדמות המידע העצבי יכולה לגרום להפעלה של שרירים או בלוטות. בהקשר של זיכרון, התקדמות המידע בתוך המוח יכולה לגרום לעירור של אזורים שונים או רשתות שונות, והדבר גורם לעירור של זכרונות קיימים ולעתים גם ליצירה של זכרונות חדשים.

כלומר, הצורה שבה זיכרון מתקיים במוח היא בעצם תשתית התקשורת בין נוירונים.

יצירה של זיכרונות חדשים כוללת שינוי של התשתית, כלומר שינוי של מבנה המוח. השינוי בא לידי ביטוי ביצירה של סינפסות חדשות וחזוקתן על פני סינפסות ישנות. כך, לאחר למידה נוצרים במוח נתיבי זרימת מידע חדשים. בעקבות למידה, הנתיב החדש הופך חזק או יעיל יותר מנתיבים ישנים, וזרימת המידע במוח משתנה. הדבר עשוי לגרום לשינוי בהתנהגות – כי הרי המוח הוא היוזם והמפעיל של ההתנהגות.

חשוב לציין שאין מדובר רק על למידה אקדמית פורמלית כמו למידה למבחן, אלא גם על למידה של מיומנויות כגון רכיבה על אופניים, ובאופן כללי רכישת זיכרונות מסוגים שונים.

בהמשך הפרק נדון בפרשנות הפיזיולוגית של למידה כפי שהיא רווחת כיום. כעת חשוב לציין שהאופן המלא שבו נוצרים זיכרונות במוח אינו מובן לגמרי. אמנם התיאוריה המרכזית מייחסת יצירת זכרונות ליצירה של סינפסות, אבל עדיין אין זה מסביר הסבר מלא את מגוון התופעות של הזיכרון האנושי ואינו מספק הבנה מלאה של אופן הייצוג של זיכרונות מורכבים במוח (למשל היכן וכיצד מיוצג הידע שלחולל יש זנב והוא עושה "מיאו" ונוחת תמיד על הרגליים – גם אם נניח שכל ההסבר לתופעת הזיכרון הזאת טמון בהיווצרות של סינפסות, עדיין לא ברור מערך המיקומים המוחיים שלהן או המנגנונים המערכתיים שיצרו אותן). כמו כן, לא ברורה המעורבות של תאי גליה (תאים במערכת העצבים שאינם תאי עצב) וכולי, כך שהתיאוריה בוודאי עדיין אינה שלמה.



קידוד ושליפה

- לשלב הלמידה, או היצירה של זיכרונות, קוראים בשם **קידוד**.
- לשלב ההיזכרות, או העירור של זיכרון קיים, קוראים בשם **שליפה**.



ניסוי "מלחמת הרוחות" של בארטלט (תרגיל שמראה כיצד המוח מעוות זיכרונות כדי לצקת משמעות במקום שהיא איננה). מתוך "מבוא לפסיכולוגיה", יחידה 5.2.2, עמ' 7-9 ([קישור לניסוי בספר המקוון](#)).

התנסות זו מלמדת שזיכרונות שמרגישים אמיתיים לחלוטין לא משקפים בצורה חד-ערכית את המציאות כהווייתה. הם תלויים ראשית בפרשנות ובתפיסה שלנו, ורגישים לשינויים ומודיפיקציות בהתאם למערכת כללים שהמוח שלנו הורגל לפעול לפיהם. אם כן, זכרונות יכולים להיות במקרי קיצון – מזוייפים לגמרי, ועם זאת להרגיש אמיתיים לגמרי.

זוכר או לא זוכר? על מורכבות הזיכרון

ניסויים מראים ששליפה של זיכרון מושפעת מן ההקשר שבו קודד הזיכרון. בניסוי מפורסם של Alan Baddeley, הקרוי **ניסוי האמודאים** הראו שהימצאות בסיטואציה שבה נוצר הזיכרון מאפשרת שליפה טובה יותר: צוות המחקר דגם 40 צוללים (אמודאים) וחילק אותם ל-2 קבוצות: קבוצה אחת נדרשה ללמוד רשימת מילים מחוץ לים, והקבוצה השנייה נדרשה ללמוד אותה רשימה בתוך הים. לאחר מכן כל קבוצה נבחנה בזכירת המילים בתוך ומחוץ למים. תוצאות הניסוי הראו שכל קבוצה נזכרה ביותר מילים כשהייתה באותו הקשר שבו למדה. המסקנה היא שרמזים שניתנים בזמן הקידוד עשויים לעזור לשליפה אחר כך.



האם אתם זוכרים מקרה שבו עלה בכם זיכרון עקב גירוי מסוים שהיה קשור בו?



העשרה: מקרים של זיכרון יוצא דופן

א. **נמוניסטים** – אנשים בעלי זיכרון מעולה במידה יוצאת-דופן. [קריאה מתוך הספר "מבוא לפסיכולוגיה" של האוניברסיטה הפתוחה, עמ' 34-35]. לקריאה נוספת, סולומון שרשבסקי: <http://techedu.huji.ac.il/learning/brain/memory6.html>

ב. **תסמונת סוואנט (Savant)**

דוגמאות לתסמונת:

1. סרט קולנוע – "איש הגשם" (<http://www.imdb.com/title/tt0095953>).
2. "Kim Peek - The Real Rain Man", סרט דוקומנטרי על האיש שעליו מבוסס הסרט "איש הגשם" (<https://www.youtube.com/watch?v=DLpCfHH1OVU>). [ללא כתוביות בעברית].
3. **פגיעה מוחית הפכה אדם לעילוי במתמטיקה**
4. "טכניקות לשיפור הזכירה" – פרק 3.13 מתוך הספר "פסיכולוגיה קוגניטיבית", עמ' 92 (מאת: יונתן גושן-גוטשטיין ודן זכאי, האוניברסיטה הפתוחה, רעננה, תשס"ו - 2006). ([קישור לספר המקוון](#))

אנלוגיה: ייצוג זיכרון במוח וייצוג זיכרון בחומרת מחשב

ההתעניינות בחקר הזיכרון והלמידה הקבילה מבחינה היסטורית לפריחה של מדעי המחשב. עקב כך, חלק גדול מעולם המושגים של חוקרי מוח החוקרים זיכרון ולמידה, לקוח מעולם התוכן של זיכרון מחשב. כך למשל

מושגים כמו קידוד, שליפה, זיכרון עבודה ועוד. מפתה מאוד לחשוב על זיכרון המוח בהשוואה לזיכרון מחשב, משום שאת זיכרון המחשב אנו מבינים היטב.

ואולם, עם השנים התבססה ההכרה שזיכרון המוח שונה בתכלית מזיכרון המחשב. אמנם עדיין לא הבנו לגמרי איך המוח כן פועל, אך ברור שהוא אינו פועל כמו מחשב.

מה כן דומה בין הזיכרונות? המידע שאנו יודעים מתקיים במוח ברמה הפיזית, כשם שהמידע שמחשב "יודע" מתקיים באופן פיזי בחומרה שלו.

דוגמה: נניח שאנו כותבים קוד שבו לא הוגדר משתנה בשם X. בשלב זה המחשב אינו יודע כלל שיש דבר כזה X, ובוודאי שכרטיס הזיכרון שלו אינו מכיל ייצוג של X. כעת נגדיר משתנה חדש בשם X וניתן לו ערך כלשהו, למשל 4. "לימדנו" את המחשב שיש דבר כזה X, וכעת מוקצה **בחומרה** מקום פיזי שבו מיוצג המשתנה X וערכו 4. גם במוח המידע נשמר בצורה פיזית.

הסתייגות חשובה להשוואה: ההשוואה מתייחסת רק לעיקרון של הקצאת מרחב פיזי לשמירת הערך הכביכול מופשט של זיכרון. ההשוואה אינה מתייחסת למנגנון הקידוד, הייצוג והשליפה, משום שמנגנון הפעולה של זיכרון במוח עדיין אינו ברור לנו. אם המוח אמנם היה פועל כמנגנון מחשב, היינו מגלים זאת בניסויים ומבינים את המוח. מכיוון שלא כך הדבר, עלינו להסיק שהמוח בהכרח פועל בצורה שונה ממחשב, על פי עקרונות שונים ואופן פעולה שונה.

באופן עקרוני, כדי להיות מדענים טובים שמגלים איך המוח פועל, עלינו להסתייג מן ההקבלה בין פעולת המוח לפעולת המחשב.

דין: אילו הבדלים יש בין זיכרון של מחשב לזיכרון אנושי?

תשובה: נציין כמה הבדלים חשובים:

1. למחשב יכול להיות זיכרון נייד – באופן עקרוני אפשר לנתק יחידות זיכרון מן המחשב והשניים ימשיכו להתקיים בנפרד. למשל – זכרון נייד ב-disk-on-key. לעומת זאת, את המוח אי אפשר לנתק מן הזיכרונות שלו, משום שהזיכרונות גלומים בעצם המבנה שלו. (בגלל זה לצערנו אי אפשר לדחוף למוח דיסק-און-קי שמכיל את כל החומר למבחן...).
2. כשרוצים לשמור קובץ במחשב, אם כבר יש קובץ בשם הזה אז השמירה תחייב דריסה של הידע הקודם. לעומת זאת, למידה במוח אינה מחייבת דריסה של ידע קודם. משמעה בנייה או חיזוק של ערוץ העברת מידע חדש, מה שלעתים מאפשר את קיומם של ערוצים ישנים.
3. לזיכרון המחשב יש קיבולת מוגבלת וידועה מראש, למשל בזכרון נייד של 2GB אפשר לאחסן כמות ידועה של נתונים. לעומת זאת, **לא ידוע** על קיבולת זיכרון של המוח האנושי (כלומר שאם נתאמץ כראוי, תמיד נוכל ללמוד דברים חדשים, ללא צורך לפנות מקום באמצעות שכחה או "מחיקה" של דברים ישנים). חשוב לציין שכן ידוע שדברים שהמוח אינו עושה בהם שימוש נוטים להיהרס, ולכן אפשר להניח שזיכרונות יכולים להתמוסס ולהיעלם מן המוח כליל, אך כאמור אין זה מעיד על קיבולת הזיכרון של המוח.
4. זיכרון מחשב הוא מוחלט תמיד: או שהמידע קיים בזיכרון, או שלא. לעומת זאת, בזיכרון האנושי יש זיכרונות בכל מיני רמות: זיכרונות בהירים ומדויקים לצד זיכרונות עמומים ומעורפלים, ואפילו זיכרונות קלושים בדמות משהו שנראה מוכר באופן יחסי, אבל לא ברור לגמרי אם אנחנו יודעים על מה מדובר. באופן עקרוני, קשה לנו לייחס את התופעה הזאת לקידוד חלש (כלומר קושי לחזק סינפסות או לשמור אותן חזקות לאורך זמן), או לשליפה דווקא (כלומר קושי לעורר מידע שקיימים באופן יציב במוח). זאת משום שאיננו יודעים הכול על ייצוג זיכרונות, ומבחינה טכנית אין לנו אפשרות לבדוק אם הסינפסות הרלוונטיות קיימות, היכן ועד כמה הן חזקות ואו רעועות. באופן כללי אפשר לייחס את התופעה של

- רמות שונות של זיכרונות לכך שערוצי העברת המידע במוח יכולים להיות יעילים יותר או יעילים פחות, ובכל אופן – **זיכרונות במוח הם דבר דינמי** שעשוי להשתנות כתלות בזמן, במצבים פיזיולוגיים, בזרימת המידע בערוצים אלה ואחרים וכולי.
5. זיכרונות חדשים שנוצרים במוח נבנים לרוב בהתאם לידע קיים.
- דוגמה:** נאמר שאנו רגילים לרכוש פחית שתייה ממכונת משקאות מסוימת. אם יום אחד נכניס מטבע והמכונה תבלע אותו ולא תוציא פחית, הדבר לא יגרום לנו ללמוד להימנע מן המכונה הזאת לעד. לכל היותר נחשוב שהמכונה ריקה או סתם מקולקלת באופן זמני. ואולם, אם נתנסה בכך כמה פעמים, או אפילו נשמע כמה פעמים על התנסויות גרועות של אחרים עם מכונה זו, נלמד שמוטב לא להשתמש בה בעתיד. זוהי דוגמה ללמידה סטטיסטית, שבה המוח משווה את המצב הנוכחי למצבי עבר, ומחשב את ההסתברות להתרחשויות שונות, ולפי זה מחליט עד כמה לזכור אותן. עוצמת/מידת הזיכרון מושפעים מדברים נוספים, כגון עוצמת החוויה הרגשית שליוותה את ההתנסות.
- נכון שיש כיום אלגוריתמים המבוססים על למידה סטטיסטית, אך אין עוררין על כך שהמוח מבצע זאת בדרך המשוכללת ביותר, ששום אלגוריתם כיום אינו משתווה לה.
6. מחשב לומד בן רגע, ואילו אצלנו תהליך הלמידה עשוי להיות ממושך. סיבה אפשרית לכך היא שזיכרון אנושי נשען על תהליכים ביולוגיים שדורשים זמן, כגון הפקת החלבונים שמייצבים את הסינפסה החדשה

לסיכום, מבנה המוח מכיל קשרים בין נוירונים שדרכם זורם המידע. למידה גורמת לשינויים במבנה המוח, כך שמערך הקשרים משתנה, זרימת המידע משתנה ובהתאם משתנים דפוסי הפעולה של המוח. לכן ההתנהגות לאחר למידה שונה מזו שלפני הלמידה. היכולת לעשות אינטגרציה ולסווג מידע היא העיקרון החשוב ביותר שמשמר את עליונות המוח על המחשב, ושהוא גם החידה הגדולה של סוגיית הלמידה והזיכרון בחקר המוח.

סוגי זיכרון

מטרות

- התלמידים יכירו סוגים שונים של זיכרון.
- התלמידים ייחשפו לאופן המחקר הקוגניטיבי: לשאלות מחקר אופייניות, לכלים העומדים לפני החוקרים, למהלכי ניסוי אופייניים, למגבלותיהם ולשיקולים בבחירתם.

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית משולבת התנסויות

משך הזמן המוקצה: 2 שעות
ידע קודם: למידה וזיכרון

חומר קריאה חיצוני:

- "פסיכולוגיה קוגניטיבית", יונתן גושן-גוטשטיין ודן זכאי, האוניברסיטה הפתוחה, רעננה, תשס"ו – 2006: [קישור לספר המקוון \(גרסה חלקית\)](#)

בשיעור הקודם למדנו על האופן שבו מבנה המוח מייצג את הזיכרונות שבו, על הבדלים בין זיכרון במוח לזיכרון מחשב, ועל תופעות שונות של הזיכרון האנושי.



שיעור זה אינו דן בתהליכים הפיזיולוגיים שכרוכים בזיכרון, אלא עוסק במושג הזיכרון במבט קוגניטיבי. בשיעור זה נציג לתלמידים מבנים שונים של זיכרון שזוהו במחקרים קוגניטיביים: זיכרון לטווח קצר וזיכרון לטווח ארוך. חשוב לציין שהמבנים הקוגניטיביים האלה הם מטאפוריים והוגדרו בעקבות מדידת ביצועים של נבדקים במחקרי זיכרון קוגניטיביים, וההסבר הפיזיולוגי המנגנוני של המבנים האלה עדיין אינו מוגדר היטב. כמו כן, חשוב לציין שזיכרון לטווח קצר וזיכרון לטווח ארוך הם אופני אחסון, ולא מקומות אחסון, כלומר שכפי הנראה אין במוח מקום שבו מאוחסנים זיכרונות לטווח קצר ומקום אחר שבו מאוחסנים זכרונות לטווח ארוך. במעבר של מידע מזיכרון לטווח קצר לזיכרון לטווח ארוך, כנראה אין נדידה של דבר כלשהו ממקום מוגדר אחד לאחר, אלא שינוי בעוצמת הקשרים הסינפטיים. חידוד: יש גישות ביולוגיות לחקר זיכרון ולמידה, אך הן אינן מיושבות באופן חד-חד-ערכי עם ההיבטים הקוגניטיביים של זיכרון ולמידה המוכרים כיום.

פתיח

בשיעור שקדם לזה למדנו שזיכרונות מיוצגים במבנה של המוח שלנו (וציינו שאיננו יודעים לתאר כיום כיצד בדיוק הם מיוצגים).

בשיעור זה נלמד על סוגים שונים של ייצוג זיכרונות, כלומר על סוגים שונים של אחסון מידע במוח, נלמד מה מאפיין את סוגי הזיכרונות השונים ובאילו תנאים הם נוצרים. חשוב לציין שהסוגים האלה הוגדרו במסגרת המחקר הקוגניטיבי, כלומר שהגו אותם על בסיס ניסויים התנהגותיים וניסויי הדמיה, אך עדיין אין יודעים מה הבסיס הביולוגי שלהם.

סוגים שונים של ייצוג זיכרונות

זיכרון לטווח קצר (Short term memory, STM)

קריאה למורה: מתוך הספר "פסיכולוגיה קוגניטיבית", פרק 2.4.2: "המודל הסטנדרטי לזכרון לטווח קצר: מודל הלהטוטן".

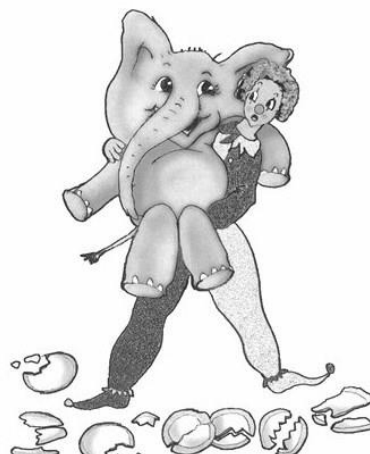
עניינים שחשוב להעלות בכיתה:

- הזיכרון לטווח קצר הוא סך כל הפריטים שנגישים למודעות ברגע נתון, כלומר שמצויים ברגע מסוים ברמת אקטיבציה גבוהה.
- לפי מודל הלהטוטן לזיכרון קצר טווח, המידע המצוי בזיכרון לטווח קצר משול לכדורים שמקפיץ להטוטן באוויר. יש כמות מוגבלת של כדורים שאפשר להקפיץ, ושימורם באוויר כרוך בפעולה אקטיבית. וכך גם הזיכרון לטווח קצר.
- מקובל לכנות זיכרון לטווח קצר גם **זיכרון עבודה**, משום שהפריטים בו נגישים לשימוש מודע כל עוד הזיכרון חי במערכת, ואפשר "לעבוד אתם".
- אורך חיי הזיכרון לטווח קצר נמדד בסדר גודל של שניות (15-30 שניות), ולאחר מכן הוא דועך.
- ההבדל בין דעיכת זיכרון לטווח קצר לבין דעיכה של זיכרון סנסורי: כשיזכרון סנסורי דועך, המידע שבו למעשה נעלם. לעומת זאת, כשיזכרון לטווח קצר דועך, המידע שבו לא בהכרח נעלם. אם המידע שמור גם בזיכרון לטווח ארוך (עניין שנעסוק בו כאן בהמשך), המידע עצמו לא אבד, אלא רק הנגישות אליו התפוגגה. (כמו הכדורים של הלהטוטן שנפלו לארץ – הם לא נעלמו, רק חדלו מלהתעופף באוויר).

- **אורך החיים של זיכרון לטווח קצר:** את דעיכת הזיכרון לטווח קצר אפשר למנוע באופן פעיל, על ידי שינון.

התנסות: נסו לזכור למשך דקה רשימה של 7 מספרים אקראיים. כעת נסו לעשות זאת בעת שאתם אומרים בקול את אותיות הא'-ב' מן הסוף להתחלה. מה יותר קשה? כמובן, המטלה השנייה. הסיבה לכך היא שהעיסוק באותיות מונע את שינון המספרים וגורם לדעיכה מהירה של הזיכרון לטווח קצר. השינון גם תורם בהעברת המידע לזיכרון לטווח ארוך – זכרו זאת בפעם הבאה כשאתם לומדים למבחן!





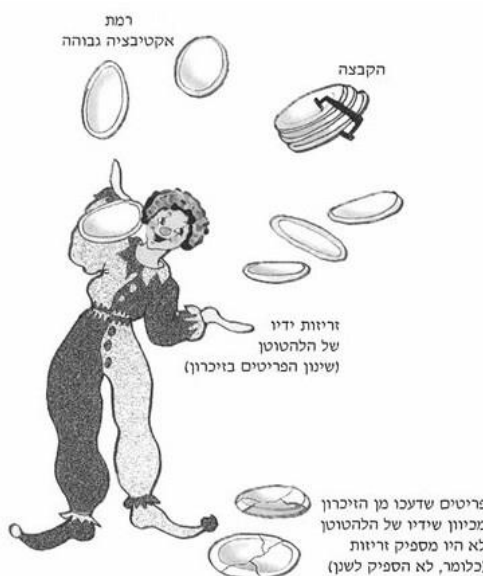
פריטים שעדכו מן הזיכרון
מכיוון שידיו של הלהטוטן המסומן
(כלומר, אין ביכולתו לשקן)

איור 11 מודל בראון-פיטרסון

ידידו של הלהטוטן אינו פנוי להשליך צלחות באוויר ולכן הצלחות נמשכות אל הקרקע בשל כובד המשיכה

מחבר/ים: 'יונתן גושן-גוטשטיין ודן זכאי
שם הספר: פסיכולוגיה קוגניטיבית - כרך ב - זיכרון
(יחידות 2-3)
מקום ההוצאה: רעננה
שם ההוצאה: האוניברסיטה הפתוחה
שנת ההוצאה: תשס"ו — 2006
עמוד: 84

- **קיבולת הזיכרון לטווח קצר** סובבת סביב 7 פריטים. נתון זה משתנה, ובפועל נע בדרך כלל בטווח של 2 פריטים מעל או מתחת ל-7 (כלומר 5-9 פריטים שאפשר לאחסן בו זמנית בזיכרון לטווח קצר). את כמות המידע אפשר להגדיל בעזרת **הקבצה** של פריטים.
- התנסות (מתוך הספר):** מה נחשב כפריט מידע?
הקריאו כל רשימה משמאל לימין בקצב קבוע של 2 אותיות בשנייה, ובקשו מן התלמידים לרשום לאחר מכן את מה שזכרו:
רשימה א: P, R, X, A, K, B, W, O, T, F.
רשימה ב: A, B, C, I, B, M, S, O, S, F, B, I.
התלמידים יזכרו את רשימה ב בקלות רבה יותר, כי כל 3 אותיות שניתנות לקיבוץ כמושג מוכר (למשל: FBI) נחשבות כפריט אחד בזיכרון לטווח קצר. בשביל מי שעושה את ההקבצה למעשה יש בה רק 4 פריטים, ולא 12.
תרשים המתאר שינון והקבצה:



מחבר/ים: 'יונתן גושן-גוטשטיין ודן זכאי
שם הספר: פסיכולוגיה קוגניטיבית - כרך ב - זיכרון
(יחידות 2-3)
מקום ההוצאה: רעננה
שם ההוצאה: האוניברסיטה הפתוחה
שנת ההוצאה: תשס"ו — 2006
עמוד: 71

- רבים מן הניסויים הקוגניטיביים העוסקים בזיכרון לטווח קצר עושים שימוש בווריאציה של אחת מן המטלות האלה:
- **מטלת היזכרות חופשית**, זו המטלה שבה התנסו במהלך השיעור – מציגים לנבדק רשימת פריטים ולאחר מכן הוא נדרש להיזכר בהם באופן חופשי.
- **מטלות היזכרות**, מציגים בהן לנבדק רשימת פריטים ולאחר מכן הוא נדרש לזהות את הפריטים מתוך רשימה קיימת (כמו מבחן אמריקאי), או להחליט לגבי פריט מסוים אם הוא היה ברשימה המקורית או לא.
• **עקומת המיקום הסדרתי**, בניסויים שעושים שימוש במטלת ההיזכרות החופשית, מתקבל באופן עקבי הדפוס הזה.



מחברים: 'יונתן גושן-גוטשטיין ודן זכאי
שם הספר: פסיכולוגיה קוגניטיבית -
כרך ב - זיכרון (יחידות 2-3)
מקום ההוצאה: רעננה
שם ההוצאה: האוניברסיטה הפתוחה
שנת ההוצאה: תשס"ו — 2006
עמוד: 87

עקומת המיקום הסדרתי (הנתונים לקוחים מתוך: Goshen, Ashkenazi & Usher, 2000)

פירוש הדבר שהפריטים שנזכרים הכי טוב הם הפריטים הראשונים והאחרונים. התופעה של זכירת הפריטים הראשונים קרויה **אפקט הראשונות** (The primary effect), והתופעה של זכירת הפריטים האחרונים קרויה **אפקט האחרונות** (The recency effect).
הערה למורה: לפני שמגלים לתלמידים את צורת העקומה, כדאי לבקש מהם לשער כיצד היא נראית – בעקבות מטלת ההיזכרות שבה התנסו בכיתה. אפשר להציג על הלוח את מערכת הצירים הריקה (אחוז ההיזכרות כתלות במספר הפריט ברשימה) ולבקש מן תלמידים לסרטט את העקומה. לאחר מכן אפשר לחשוף את העקומה המובאת כאן ולהשוות בינה ובין תשובות התלמידים.

נסו לחשוב מדוע.

תשובה: את אפקט הראשונות אפשר להסביר באמצעות **אפקט השינון**: סיכויי הקידוד לזיכרון הם ביחס ישר לכמות החזרות שמבצע הנבדק על כל מילה ברשימה. הפריטים הראשית הרשימה זוכים למספר החזרות הגדול ביותר, שכן ככל שמצטרפות עוד מילים כל מילה זוכה לפחות שינון.
את אפקט האחרונות אפשר להסביר על ידי כך שהמילים טריות בזיכרון לטווח קצר, ו"דורות" את המילים שהיו שם לפני כשהקיבולת נגמרת.
מובן שמדובר בהצעות תיאורטיות, והסברים אחרים עשויים להיות נכונים באותה מידה.

העשרה: לקריאה נוספת על זיכרון עבודה: "פסיכולוגיה קוגניטיבית" פרק 2.7 "זכרון עבודה: חלוקתו של הזיכרון לטווח קצר לרכיבים נוספים".

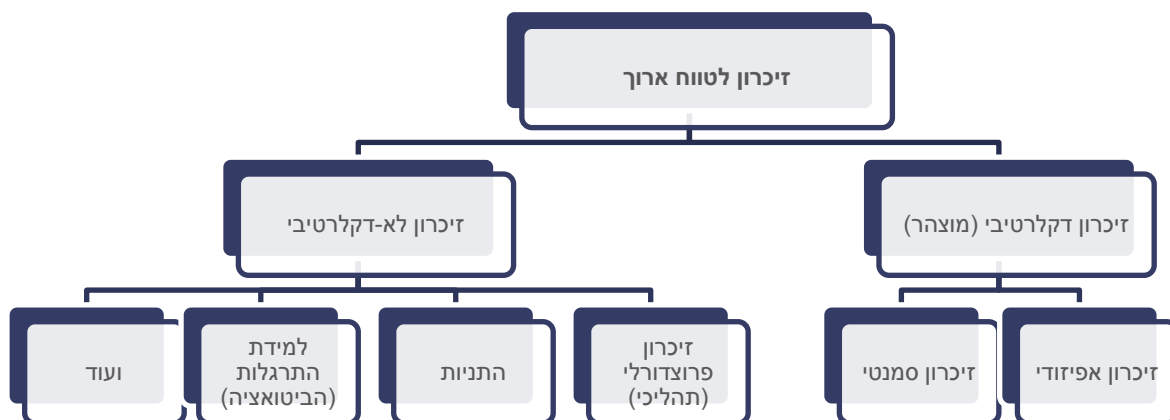
זיכרון לטווח ארוך (Long Term Memory, LTM)

קריאה למורה: מתוך הספר "פסיכולוגיה קוגניטיבית", פרק 2.8: "חלוקת הזיכרון לטווח ארוך לרכיבים נפרדים".

עניינים שחשוב להעלות בכיתה:

- **ככל הידוע, הזיכרון לטווח ארוך אינו מוגבל בקיבולת או בזמן,** כך שבאופן עקרוני אם לא חלה פתולוגיה או פגיעה, אפשר לשמור בדרך זו כל כמות מידע לזמן בלתי מוגבל.
 - את הזיכרון לטווח ארוך אפשר לחלק לכמה סוגים.
- הערה: כמו שאר החלוקות שהוצגו בשיעור זה, גם החלוקה הזאת נובעת משדה המחקר הקוגניטיבי ומתצפיות קליניות. כיום אין בנמצא הסבר מקיף שמחבר את החלוקה הזאת להיבטים ביולוגיים בתחום הזיכרון.

סכמת החלוקה לסוגים של זיכרון לטווח ארוך:



- **זיכרון דקלרטיבי** הוא זיכרון שאנו יכולים לדווח עליו במילים (בתנאי שאנחנו מצליחים לשלוף אותו כמובן). לעומתו, **זיכרון לא-דקלרטיבי** הוא זיכרון שכמעט בלתי אפשרי להביע אותו במילים, אלא רק באמצעות הפגנת מיומנות באופן מעשי.
 - נתחיל בתיאור תת-סוג של זיכרון לא-דקלרטיבי: **זיכרון פרוצדורלי (תהליכי)**.
- התנסות:** אם אתם יודעים לרכוב על אופניים, פירוש הדבר שהמוח שלכם מכיל ייצוגים של המידע "כיצד לרכוב על אופניים". אם כן, נסו לנסח במילים הסבר מפורט ללימוד רכיבה על אופניים. "קשה לנו להסביר באופן מילולי את הידע שיש ברשותנו, שהוא המאפשר לנו לבצע ביעילות את הפעולות השונות הכרוכות באותה מיומנות. למעשה, איננו מתקשים רק בתיאור ידע זה באופן מילולי, אלא גם איננו נוהגים לעשות זאת כשברצוננו להעביר ידע זה לאחרים – במקום זאת אנו מנסים להדגים, ומסתמכים, במידה רבה, על מקבל הידע שיתנסה באופן אישי וילמד מטעויותיו. נראה אפוא כי ידע רב המצוי ברשותנו איננו ניתן לתרגום מילולי פשוט, והעובדה שרכשנו אותו, כלומר שלמדנו אותו, מתבטאת במידת היעילות שבה אנו מבצעים את הפעולות הספציפיות המתבססות עליו." ההסבר מצוטט מתוך הספר "פסיכולוגיה קוגניטיבית", עמ' 17.



תרגיל 14

1. תארו נעל. איזה סוג ידע מצריך תיאור זה?
 2. תארו כיצד יש לקשור שרוכי נעליים. איזה סוג ידע מצריך תיאור זה?
- באיזה משני התיאורים התקשיתם יותר?
איזה משני התיאורים נראה לכם מדויק יותר?

קרב לוודאי שתיאור הקשירה של שרוכי הנעליים (מידע פרוצדורלי) היה קשה מתיאור הנעל (מידע דקלרטיבי מן הזיכרון הסמנטי). ייתכן כי במהלך התיאור חסרו לכם מילים לתיאור מדויק של הפעולה, או להגדרה מדויקת של עצמת קשירת הקשר וכו'. שני התיאורים הם מסוגים שונים. הראשון – תיאור נעל – הוא תיאור של מושג. תיאור כזה קל לבצע באופן מילולי, שכן הייצוג של המושג נמצא בזיכרון **המוצהר** (ובפרט בזיכרון הסמנטי). לא כן הדבר בעת תיאור הקשירה של שרוכי הנעליים. זהו תיאור של מיומנות. נראה שכאן התרגום למילים אינו כה פשוט. אפשר להניח אפוא שצורת הייצוג של ידע (על ביצוע הפעולה) אינה זהה, בהכרח, לצורת הייצוג של מושג (זיכרון סמנטי) או לייצוג של חוויה שאליה נחשפנו בעבר (זיכרון אפיזודי).

התרגיל מתוך הספר "פסיכולוגיה קוגניטיבית", עמ' 121.

האם מטלות ההיזכרות ומטלות ההיכר, שדיברנו עליהן קודם לכן, מתאימות לבדיקת זיכרון לטווח ארוך?



תשובה: רק לבדיקת זיכרונות דקלרטיביים.

כיצד אפשר למדוד זיכרונות פרוצדורליים (לא-דקלרטיביים)?
מטלות זכרון חבוי: מטלות למדידת זיכרונות לא-דקלרטיביים, שבהם איכות הזיכרון נמדדת על ידי השיפור בביצועים לאחר למידה. על דוגמאות ל-2 מטלות זיכרון חבוי אפשר לקרוא בספר בסעיף 2.8.4.1, נספח 2.

הסיבה לחלוקה לפי סוגי זיכרון: זיכרון דקלרטיבי וזיכרון לא-דקלרטיבי, נעוצה בממצאים קליניים נוירו-פסיכולוגיים, שבהם אפשר לראות אנשים הלוקים בהידרדרות בזיכרון הדקלרטיבי אך לא בזיכרון הפרוצדורלי (למשל הלוקים בסינדרום אמנזיה), ולהפך (למשל הלוקים בפרקינסון). על כך בסעיף 8.2.3. בספר.

- סוגים של זיכרון דקלרטיבי-אפיזודי וסמנטי. קריאה למורה: סעיף 3.1. בספר.
- **זיכרון אפיזודי** הוא זיכרון לגבי אפיזודה ייחודית שהאדם חווה בעבר. זיכרונות כאלה לעולם יכולו פן אוטוביוגרפי, עם הקשר לסיטואציה שבה נרכש הידע. לעומת זאת, **זיכרון סמנטי** הוא ידע עובדות וכללים, שאינו מקושר לחוויה כלשהי בחייו של האדם.
- אחת הדרכים שבהן חוקרים אפיינו את ההבדל בין השניים: זיכרון אפיזודי מכיל מידע ש"אני זוכר" (למשל, מה אכלתי הבוקר), ואילו זיכרון סמנטי מכיל מידע ש"אני יודע" (למשל, לציפורים יש כנפיים ולדובים לא).
- **פרדיגמת "זוכר לעומת יודע"** היא מטלה שבה מציגים לנבדק המחקר מטלת היכר, ובה מציגים לו רשימת מילים ולאחר מכן בשלב המבחן הוא נדרש לשפוט אם מילים שמוצגות לו היו או לא היו ברשימה המקורית. כמו כן, עליו לציין באשר לכל מילה שהופיעה אם הוא "זוכר" זאת או פשוט "יודע" זאת. "זוכר" מתייחס למצב שבו הנבדק זוכר משהו מן החוויה של שמיעת המילה, למשל נימת קולו של הנסיין שהקריא אותה, או את המחשבה שעברה בראשו בעת ששמע את המילה. "יודע" מתייחס למצב שידע נוסף כזה אינו קיים.
- חוקר ששמו דוזל (Duzel) מדד את הפעילות החשמלית במוחם של נבדקים בעזרת אלקטרודות **EEG (אלקטרואנצפלוגרם)**, בעת שביצעו את מטלת "זוכר לעומת יודע". הוא מצא שדפוס הפעילות החשמלית של השניים שונה. זאת ועוד, הדפוס החשמלי הנמדד לא היה תלוי בתשובה הנכונה של

הנבדק, אלא רק בחוויה הסובייקטיבית שהתלוותה לשיפוט של פריטי המבחן. הממצא מלמד שאופן הפעולה של המוח כשהוא מעורר זיכרון אפיזודי אינה זהה לאופן שבו הוא מעורר זיכרון סמנטי. הדבר מרמז על כך שייתכן שבבסיס שני סוגי זיכרונות אלה עומדים שני מנגנונים מוחיים שונים, או שהם מיוצגים במוח באופנים שונים.

רשות - אם נותר זמן:

- **מטה-זיכרון** הוא עצם הידיעה שאנו יודעים דבר כלשהו. קריאה למורה: סעיף 5.4.
- האם באמת יש דבר כזה זיכרון לטווח קצר? קריאה: מתוך הספר "פסיכולוגיה קוגניטיבית", פרק 2.6: "הקשיים בעדויות התומכות במודל המודאלי".

לא עסקנו בכל הסוגים של זיכרון לא-דקלרטיבי. על התניות נדבר ביחידה העוסקת בלמידה קלאסית ואופרנטית. על **הביטואציה** אפשר לקרוא בקישור.



העשרה לתלמידים: ספרי קריאה מומלצים

- אייל, נ' (1994). מסע אל הזיכרון. ירושלים: ספריית מעריב.
- אייל, נ' (2004). נפלאות הזיכרון ותעתועי השכחה. תל-אביב: אריה ניר.

התניות

מטרות

- התלמידים יבחינו בין התניה קלאסית להתניה אופרנטית.
- התלמידים יתארו את הניסוי שערך איוון פאבלוב בכלבים.
- התלמידים יסבירו את המושגים הבאים: גירוי ניטרלי, גירוי מותנה, תגובה מותנית, גירוי בלתי מותנה, תגובה בלתי מותנית.
- התלמידים יסבירו מהן הכללה והכחדה.
- התלמידים יסבירו את הקשר בין הניסוי של פאבלוב לבין התניות נפוצות בבני אדם.
- התלמידים יסבירו מהם חיזוקים ועונשים בהתניה אופרנטית.

דרך ההוראה: למידה עצמית מקוונת

משך הזמן: שעה

הערכה: בוחן (כניסה מתוך אתר האינטרנט, בנפרד מהפעילות המקוונת)

מסמך עם מתווה מפורט של הפעילות המקוונת נמצא באתר.



שינויים בזיכרון

מטרות:

- חיזוק ההבנה שהמוח מייצג זיכרונות במבנהו, מתוך התבוננות במצבי פגיעה פיזית או כימית שבאים לידי ביטוי בפגיעה קוגניטיבית בתהליכי למידה וזיכרון.
- התלמידים יבינו שהזיכרון במוח משתנה מטבעו, ושאינו משקף באופן חד-ערכי את המציאות "כפי שהיא".
- התלמידים יתוודעו לאופן בו מנהלים דיון לגבי מוסריות מחקר המוח והשלכותיו, ויתנסו בהעלאת טיעונים בסוגיות אלו.

דרך ההוראה: הקנייה כיתתית

משך הזמן המוקצה: שעה

ידע קודם:

במידה ולא נערכה התנסות "מלחמת הרוחות" בשיעורים קודמים, ניתן לתת אותה כשיעור בית מטרימים לקראת שיעור זה. זהו תרגיל שמראה כיצד המוח מעוות זיכרונות כדי לצקת משמעות במקום שהיא איננה. מתוך הספר "מבוא לפסיכולוגיה", יחידה 5.2.2, עמ' 7-9 ([קישור לפעילות בספר המקוון](#)).

חומר רלוונטי ודגשים למורה:

- קרלסון נ', הפיזיולוגיה של ההתנהגות כרך ב', מהדורה 9, האוניברסיטה הפתוחה. העמודים הרלוונטיים מפורטים בהמשך.
- "מבוא לפסיכולוגיה", ריצ'רד ג' גריג ופיליפ ג' זימברדו, האוניברסיטה הפתוחה: [קישור לספר המקוון](#) (גרסה חלקית). העמודים הרלוונטיים מפורטים בהמשך.

פתיח

"רק אם תתחיל לאבד את זיכרוןך, ולו גם במנות קטנות, תיווכח שהזיכרון הוא עצם החיים, חיים ללא זיכרון אינם חיים כלל.... הזיכרון הוא החומר המלכד שלנו, הדעת שלנו, הרגש שלנו, אפילו – המעשים שלנו. בלעדיו אין אנו ולא כלום." (לואי בוניואל, מתוך 'האיש שחשב שאשתו היא כובע' מאת אוליבר סאקס, עמ' 35).

המוח מייצג את הזיכרונות שלנו באופן פיזי. לפיכך, פגיעות פיזיות במבנה המוח עשויות לעוות או להעלים זיכרונות קיימים. חבלות ראש, שימוש בחומרים מסוכנים, צריכה מופרזת של אלכוהול ומחלות שונות של מערכת העצבים – כל אלה עשויים לחולל שינויים במבנה המוח, ולגרור אפוא לשינויים בזיכרון.

בשיעור זה נדבר על פתולוגיות של זיכרון. פתולוגיה היא שם כללי לתפקוד לא תקין של הגוף. הפתולוגיה יכולה לבוא לידי ביטוי כמחלה או כלקות כלשהי. לפתולוגיות של זיכרון יש שני קצוות: בקצה האחד עומד הקושי לזכור, ובקצה השני הקושי לשכוח... בשיעור זה נעסוק בשניהם.

אי יכולת לזכור

אי היכולת לזכור דברים, כלומר לקודד ו/או לשלוף מידע, נקראת בשפה המקצועית בשם **אמנזיה**. בחלק זה נמנה כמה סוגים של אמנזיה, השונים זה מזה גם בתכונותיהם וגם בנסיבות היווצרותם:

א. אמנזיה למוקדם (אמנזיה לאחור, retrograde amnesia) –

אי יכולת להשתמש במידע שהיה קיים בזיכרון בעבר. נפגעים שסובלים מאמנזיה לאחור מתקשים לזכור אירועים שהתרחשו לפני הפגיעה, לטווח קצר או ארוך. לעתים לאחר תהליך שיקום הזיכרונות שבים בסדר כרונולוגי – תחילה זיכרונות ילדות, לאחר מכן זיכרונות מן הנעורים ובהדרגה שבים זיכרונות שקרובים לפגיעה. לרוב הזיכרון לאחר שיקום יהיה חלש או חסר.

ב. אמנזיה למאוחר (אמנזיה לפני, anterograde amnesia) –

אי יכולת לקודד לזיכרון מידע חדש. זיכרונות קודמים נותרים. נפגעים שסובלים מאמנזיה לפני מתקשים לרכוש זיכרונות לאחר פגיעה מוחית. מעניין שרוב הלוקים באמנזיה לפני מסוגלים לרכוש מיומנויות חדשות, כגון רכיבה על אופניים, ולעתים גם עובדות סמנטיות, כגון מיהו נשיא ארצות הברית, אך הם מתקשים ביצירה של זיכרונות אפיזודיים, כלומר זיכרונות של חוויות חיים, של התרחשויות שקורות להם. חולים אלו מסוגלים אמנם לשוחח שיחת חולין, אבל הם פשוט אינם זוכרים אותה כעבור זמן קצר.

מקרה מפורסם של אמנזיה לפני הוא **המקרה של H.M.**, פגיעה דו-צדדית בהיפוקמפוס:
<http://ed.ted.com/lessons/what-happens-when-you-remove-the-hippocampus-sam-kean>



דוגמה לאמנזיה למאוחר: תסמונת קורסקוף (עמ' 561, 668-667)

תסמונת קורסקוף תוארה לראשונה בסוף המאה ה-19 על ידי רופא רוסי, ששמו סרגיי קורסקוף. זוהי מחלה של **אמנזיה למאוחר**. החולה אינו מסוגל לבנות זיכרונות חדשים שקרו אחרי הפגיעה, על אף שהוא זוכר דברים שקרו לפניו.

תסמין נוסף ומרתק שמצוי בתסמונת קורסקוף הוא **קונפולוציות** (confabulation), בדיית זיכרונות. קונפולוציות הן המצאת תשובות או פתרונות על מנת לכסות על פערים בזיכרון או בהתמצאות. כששואלים את החולה שאלה שהוא אינו זוכר את התשובה עליה, הוא נוטה להמציא תשובה. ההבדל בין קונפולוציה לבין סתם שקר הוא שבקונפולוציה החולה משוכנע שהוא דובר אמת (כלומר, הוא אינו מודע לכך שהוא ממציא, והוא אינו עושה זאת כדי לרמות את הצוות הרפואי).

הגורם המרכזי לתסמונת הוא שתייה מופרזת של אלכוהול. אלכוהול מפריע לספיגה של ויטמין B1 (תיאמין) מן המעי לתאי הגוף. ויטמין B1 ממלא תפקיד חשוב במטבוליזם, חילוף החומרים ברקמות. בהיעדר ויטמין B1 התהליך משתבש וגורם נזקים.

הרחבה: ויטמין B1 חשוב בתהליכי פירוק של אבות המזון: פחמימות, שומנים וחלבונים. איך הוא עושה זאת? הוא תומך בתהליך של חיבור שתי מולקולות זו לזו. הוא מאפשר הוספה של רכיב מולקולרי (קבוצת קרבוקסיל) למולקולה חשובה מאוד במטבוליזם (ששמה פירואט). ההוספה של קבוצת הקרבוקסיל לפירואט משנה את התכונות הכימיות שלו, ותורמת להמשך תהליך חילוף החומרים.



החסר בוויטמין הזה גורם לנזק המוחי של התנוונות רקמת המוח במקומות רבים. אזור שניזוק במיוחד עקב מחסור בוויטמין B1 הוא הגופים הדדיים (mammillary bodies), שהם חלק המשכי להיפוקמפוס.

תזכורת: ראינו למעלה סרטון על החולה המפורסם H.M. שנאלץ לעבור כריתה של ההיפוקמפוס ועקב כך לקה באמנזיה למאחר. גם במקרה של תסמונת קורסקוף אנו רואים שזקק מבני באזור ההיפוקמפוס מוביל לסוג כזה של אמנזיה.



הנזק שנגרם בתסמונת זו הוא לרוב בלתי-הפיך. אף על פי כן, אפשר לנסות לטפל במתן ויטמין B1, ולפעמים הדבר עוזר מעט.

העשרה: על איבוד היכולת לקודד זיכרונות: "הימאי האבוד", מתוך "האיש שחשב שאשתו היא כובע", אוליבר סאקס. פרק 2, עמ' 35. מסופר שם על איש שאיבד את הזיכרון עקב שתיית אלכוהול מרובה.



ג. PTA (Post-Traumatic Amnesia) אמנזיה דיסוציאטיבית, פוגה דיסוציאטיבית –

שכחה שנובעת מאירוע נפשי מלחיץ ביותר. מדובר בהפרעה נדירה באופן יחסי, לרוב זמנית בלבד, שקורית לעתים קרובות לאחר התעוררות ממשך זמן ארוך של חוסר הכרה. האדם עשוי לשכוח פרטי מידע חשובים ומרכזיים בחייו. לדוגמה: אדם שעבר תאונת דרכים קשה שכב בבית חולים מחוסר הכרה למשך 5 שבועות. לאחר שהתעורר התקשה לזכור את בני משפחתו שבאו לבקר ולא זכר פרטים אוטוביוגרפיים מעברו. לאחר ימים ספורים התחילו לשוב אליו זיכרונות ילדות, הוא נזכר בהדרגה במשפחתו ובעיסוקו, ואפילו זכר דברים שעשה בשבוע האחרון לפני התאונה. לרוב לא יהיו אלה זיכרונות מן השעות האחרונות שלפני הפגיעה (וייתכן שהדבר נובע מכך שלאחר התאונה המוח לא היה מסוגל לעסוק בחיזוק סינפסות לצורך יצירת זיכרונות).

דוגמה נוספת לפתולוגיה של שכחה –

דמנציה במחלת אלצהיימר (עמ' 658-664)

דמנציה (שיטיון) = הידרדרות התפקודים הקוגניטיביים (יכולות החשיבה) והמנטליים (התפקודים הרגשיים וההתנהגותיים). ההידרדרות הבולטת והמרכזית ביותר בדמנציה היא ירידה בזיכרון. יש גורמים רבים שיכולים להגדיל את הסיכוי לדמנציה בגיל מתקדם, כגון עישון ותזונה לקויה.

הצורה הנפוצה ביותר של דמנציה מופיעה כחלק ממחלת **אלצהיימר**. אלצהיימר היא מחלה ספורדית (כלומר שעל פי רוב היא אינה תורשתית), שמתפרצת בדרך כלל בגיל מבוגר. על אף ההתפרצות המאוחרת, התפתחות המחלה מתחילה כ-20 שנה לפני הופעת התסמינים הקליניים.

תסמינים של אלצהיימר:

- בעיה בזיכרון לטווח קצר ושליפה של מידע.
- בעיות שפתיות: דיבור אטי, נעלמות מילים.
- הפרעות ביכולות הראייתיות-מרחביות, כגון איבוד אוריינטציה.
- היעדר מודעות למצב.
- אין הטבה, המצב רק הולך ומחמיר.

הגורם למחלת אלצהיימר אינו ידוע, אף על פי שכיום ידועים גורמי סיכון וגם גורמים מפחיתי סיכון ללקות במחלה בגיל מאוחר. אחד הגורמים שנחשבים כמפחיתי סיכון למחלה הוא **השכלה**: לאדם שרכש השכלה רבה בחייו יש פחות סיכוי לחלות באלצהיימר לעת זקנה. אחד ההסברים לכך הוא שבעת רכישת השכלה המוח בונה נתיבים של העברת מידע, וכך אם בשלב מאוחר יותר נתיבים מסוימים ייהרסו (עקב השפעות הזקנה וכו') – עדיין יישארו נתיבים שיוכלו לפצות על כך, והאדם יוכל להמשיך לתפקד.

אבחון

השלב הראשון באבחון כולל **שאלון MMSE** (עוד על השאלון – בקישור). בשלב הבא אפשר להמשיך את האבחון באמצעות בדיקות במכשיר MRI. מכשיר זה מספק מגוון בדיקות שמראות היבטים שונים של מבנה המוח ותפקודו (החומר האפור, החומר הלבן, זרימת הדם, כיוון סיבי האקסונים ועוד). נכון להיום האבחון של אלצהיימר אינו יעיל די הצורך – המחלה מתגלית רק בשלבים מתקדמים. בדרך כלל מתבצע מעקב אחרי החולים, אך גם במקרים אלה – לא ברור כל כך על אילו מדדים יש להסתכל כדי להעריך את חומרת המחלה, וגם אם היו יודעים – אין ממילא מה לעשות, כי אין כיום תרופה לאלצהיימר. תופעה מעניינת נוספת, שאין לה הסבר, היא שכשהחולים מגיעים לקליניקה להיבדק, הם בדרך כלל מתפקדים הרבה יותר טוב מתפקודם בביתם (כפי שעולה לעיתים תכופות מעדותם של בני משפחה שמלווים אותם).

אי יכולת לשכוח

א. הפרעת עקה פוסט-טראומטית (Post traumatic stress disorder, PTSD), (עמ' 743-745)

בהפרעה זו נגרמים תסמינים של עקה (stress) בעקבות אירוע טראגי שקרה לאדם [ההגדרה המלאה בעמ' 743], והיא מתבטאת בתסמינים מסוגים שונים:

1. **תסמינים של היזכרות חוזרת** בחוויה הקשה, הכוללים בין השאר חלומות אימה חוזרים, ופלאשבקים שגורמים לתחושה שהאירוע שב ומתרחש.
2. **תסמיני הימנעות** – האדם הסובל מזיכרון טראומטי נמנע מדברים שעשויים להזכיר לו את האירוע. ההימנעות יכולה לכלול ניתוק קשרים עם אנשים, הימנעות מהגעה למקומות, נטישת תחביבים, ריחוק רגשי ועוד.
3. **תסמינים של עוררות יתר**, המצוקה הפסיכולוגית העמוקה שהאדם נקלע אליה מלווה בקושי להירדם, בהתפרצויות זעם, בשינויים דרמטיים במצבי רוח ועוד.

סרטון על פוסט-טראומה: <https://www.youtube.com/watch?v=Z14tE8Z6Kp0>



אחד הגורמים שנמצא מתאם בינו ובין PTSD הוא הפוקמפוס קטן. הסיבתיות אינה ברורה – ייתכן שאירוע טראגי שמוביל ל-PTSD גורם לירידה בנפח ההיפוקמפוס, **אבל** אולי ההפך הוא הנכון – מי שההיפוקמפוס שלו קטן הוא למעשה רגיש יותר ללקות ב-PTSD. אין יודעים מה קדם למה, מפני שבדרך כלל אי אפשר לצפות אירוע שגורם ל-PTSD ואין סריקות מוח של אנשים טרם התפרצות ההפרעה (רק לאחר מכן הם נשלחים לבדיקות ומגויסים למחקרים). [עם זאת, ראוי לציין שיש כמה מחקרי אורך שנערכים כיום, שעושים שימוש במאגרי מידע של צבאות בעולם – ובכללם גם צה"ל – בניסיון להתחקות אחר נתונים שעשויים לחזות התפתחות של PTSD].

ב. התמכרות (פרק 18: סמים ממכרים – עמ' 754-786)

התמכרות היא סוג פתולוגי של זיכרון. מדובר בדפוס פעולה חזק מאוד בעל השפעה הרסנית, שהאדם המכור מתקשה מאוד להיפטר ממנו, כלומר מתקשה ללמוד לעשות משהו אחר במקומו.

- כבר בימי קדם גילו בני-האדם שיש חומרים שהשימוש בהם גורם להנאה. השפעת הסמים על מוחם של אנשים גרמה להם לחזור ולהשתמש בהם.

- בפעילות המקוונת שעסקה בהתניות למדנו על התניה אופרנטית: כדי לחזק התנהגות מסוימת צריך לתת אחריה חיזוק – הופעה של גירוי נעים או גריעה של גירוי לא נעים. לדוגמה, אם חולדה רעבה תלחץ במקרה על כפתור ומיד לאחר מכן תקבל מזון, לאחר כמה פעמים היא תלמד את החוקיות ותלחץ על הדוושה בכוונה כדי לקבל מזון. הופעת הגירוי הנעים (מזון) מפעילה מנגנון תגמול במוח, והוא מקדם את תהליך הלמידה.

- ברמת הרקמה, החיזוק תלוי כפי הנראה בשחרור מוגבר של דופמין בגרעין הנוקלאוס-אקומבנס, שהוא מרכז התגמול של המוח (משחרר דופמין וגורם לתחושה נעימה כאות תגמול, ועל ידי כך מביא לחיזוק ההתנהגות, כלומר לעלייה בסבירות שההתנהגות תתרחש שוב בעתיד).

- סמים עושים דבר דומה, רק באופן ישיר – הם מעוררים הפרשת דופמין במרכזי התגמול של המוח, וכך צריכתם והשימוש בהם הופכים להיות פעולה נלמדת. למעשה, הם יעילים כל כך בהפעלת מערכת התגמול, עד שלאחר שהאדם למד כיצד לצרוך אותם הוא יתקשה להפסיק לצרוך אותם, גם כשהם יחלו להזיק לו – וזו ההתמכרות.

- אז מה הבעיה? לסמים יש כמובן השפעות הרסניות על הגוף ועל הקוגניציה. כמו כן, אנשים המשתמשים בקביעות בסמים מפתחים סבילות, ירידה ברגישות לסם – תגובת התגמול יורדת והאדם מתפתה לצרוך כמויות הולכות וגדלות. זאת ועוד, הגוף מתחיל לפתח תלות בסמים לתפקוד יום-יומי, והיעדר סם גורם לתופעות של תסמיני גמילה. על-פי-רוב, הדבר שגורם להתמכרות הוא חיזוקים של הופעת גירוי נעים של תגמול, ואילו הדבר שמשמר את ההתמכרות הוא חיזוקים של מניעת תסמיני הגמילה עם השימוש החוזר בסם.

- הסמים הממכרים ביותר הם סמים שהשפעתם מידית. הרואין ממכר יותר ממורפין, רק משום שהשפעתו מהירה יותר. באופן כללי, אפשר לומר שככל שהתגובה מגיעה סמוך להתנהגות, כן הלמידה חזקה יותר (שוב – כפי שראינו בהקשר של התניות). אם הגירוי המחזק מופיע פרק זמן כלשהו לאחר ההתנהגות – הוא מאבד מן היעילות שלו והלמידה פחות חזקה. אם נדרש זמן, המוח יתקשה לראות בגירוי תוצאה של ההתנהגות.

- הבעיה הבולטת ביותר בגמילה היא הידרדרות חוזרת (relapse), שעשויה להשפיע גם שנים לאחר שהמכור "נקי". תופעה זו קורית בעיקר בעקבות הופעה של מעוררים, טריגרים, שמזכירים לאדם את השימוש בסם. הדבר שכיח בקרב אנשים ששבים לעיר מגוריהם לאחר ששהו פרק זמן בסדנת גמילה במקום מרוחק. החזרה לסביבה שבה נעשה השימוש בסמים משמשת טריגר ומעוררת את הרצון לחזור להשתמש כמו בעבר. בעת שימוש בסם מתרחשת התניה חזקה ביותר: צימוד בין לקיחת הסם ובין תחושת התגמול במרכז התגמול.

במוח. השימוש בסם מפעיל הפעלה חזקה את מרכז התגמול במוח. לכן החיזוק יעיל כל כך וההתניה חזקה כל כך, באופן שמעלה במידה ניכרת את הסבירות לחזור על ההתנהגות, כלומר להשתמש בסם פעמים נוספות. לכן אפילו אדם שזה עתה עבר תהליך גמילה, עלול לשוב ולהשתמש בסמים.

בעבר היה מסע פרסום של האגודה למלחמה בסמים שבו תלו כרזות מאיימות עם חפצים ואביזרים של שימוש בסמים (מקטרת, מזרק וכדומה). באופן פרדוקסלי, למכורים לאחר גמילה, החשיפה החוזרת לאביזרים אלו שימשה טריגר לשימוש חוזר. זאת בעקבות למידת התניה קלאסית שהתרחשה בעת ההתמכרות: בעת השימוש התרחש צימוד בין מראה המזרק ובין התחושה הנעימה של השימוש בסם, והמזרק עצמו הפך להיות גורם המקושר באופן ישיר לדחף להשתמש.



- מודל בעל חיים "להידרדרות חוזרת" (relapse): בשלב הראשון עושים התניה אופרנטית: מלמדים את החיה לבצע פעולה מסוימת (למשל ללחוץ על כפתור) כדי לקבל מנת סם כחיזוק. החיה מכורה כשרואים שהיא מוכנה לעבוד קשה בשביל הסם. לאחר מכן עושים הכחדה של הלמידה: כעת כשהחיה לוחצת על הכפתור היא כבר אינה מקבלת סם. מכיוון שהחיזוק נעלם, החיה לומדת שלא כדאי ללחוץ על הכפתור, ובהדרגה היא מפסיקה. כעת נותנים לחיה רמז לסם (למשל מחזירים אותה לכלוב שבו היא קיבלה את הסם קודם לכן). הכלוב המוכר משמש טריגר, והחולדה תתחיל ללחוץ שוב על הכפתור, על אף שכאמור היא כבר נגמלה. מכאן שהתמכרות היא למידה שקשה מאוד להכחיד אותה.

טיפול בהתמכרות על ידי טשטוש/מחיקת זיכרונות

- ראיון עם ד"ר ברק שגב מאוניברסיטת ת"א, בנושא "אלכוהוליזם, מחיקת זכרונות ומה שביניהם" <https://www.youtube.com/watch?v=4DHfEzw29SU>
- כתבה: http://people.socsci.tau.ac.il/mu/segevbarak/files/2013/07/Haaretz-HEB-ORG_26673744-240613.pdf



חשוב לציין שעל אף שהדגשנו כאן התמכרות לחומרים, מדובר בהתמכרות לכל דבר שאפשר להתמכר אליו.

כאמור, סמים שונים גורמים להפעלה ישירה ומוגברת של מרכזי התגמול במוח – הם מפעילים אל תוך מערכת העצבים ומפעילים קולטנים באופן ישיר. ואולם, מרכזי התגמול פועלים גם באופן עקיף על ידי גירויים שונים שנעימים לנו (למשל שוקולד). כל מה שמפעיל את מרכזי התגמול במוח עשוי באופן עקרוני להיות ממכר. כך אנשים שונים עשויים להתמכר לאוכל, למין, להימורים, אפילו לעבודה. הקו המנחה הוא שמהו בפעולה הממכרת גורם להפעלה של מרכזי החיזוק במוח. אבל חשוב לשים לב: העובדה שמהו מתגמל קרה במוח אין פירושה שהאדם נהנה באופן כללי מהמצב! התמכרות בהגדרתה היא מצב פתולוגי הגורם לאדם לאבד שליטה על חייו, הופך אותו לתלוי ומאלץ אותו להקריב הרבה מאוד בשביל להשיג את החיזוק. בסופו של דבר, ההתמכרויות באופן כללי מובילות להרס גופני ולהידרדרות נפשית.



תוספות כלליות – פרק זיכרון ולמידה

לקריאה נוספת - מורים:

- "זיכרון ולמידה": פרק 13 בספר של קרלסון, "הפיזיולוגיה של ההתנהגות" (כרך ב). הערה: שימו לב שהפרק מלמד את הנושא באופן שונה מאוד מן הסילבוס שלנו, והקריאה מומלצת למורים.

סרטים מומלצים:

- שמש נצחית בראש צלול

סוגיות אתיות במדעי המוח

מטרות

- התלמידים יתוודעו לאופן בו מנהלים דיון לגבי מוסריות מחקר המוח והשלכותיו, ויתנסו בהעלאת טיעונים בסוגיות אתיות.
- התלמידים יבינו שהזיכרון במוח משתנה מטבעו, ושאינו משקף באופן חד-ערכי את המציאות "כפי שהיא".
- התלמידים יבינו את מורכבות השימוש בתרופות נזיר-פסיכולוגיות המשפיעות על הזיכרון, ויכירו טענות בעד ונגד שימוש בהן.
- התלמידים יעלו השלכות אתיות של ההתקדמות הטכנולוגית בתחום הקוגניציה המלאכותית.

דרך ההוראה: דיונים כיתתיים

משך הזמן: שעה

מבוא

זהו השיעור המסכם את השנה בה, נלמדו 4 פרקים במדעי המוח:

- עצבים חשופים (ניורואנטומיה תפקודית)
- לזוז בלי לחשוב (תנועה)
- לבלבל את המוח (חישה)
- מה שמזכיר לי... (זיכרון ולמידה)

התלמידים נחשפו לגישות שונות בחקר המוח (קוגניטיבית, ביולוגית, חישובית). הם נחשפו לשיטות מחקר שונות ולשאלות שעומדות כיום בחזית המחקר המדעי בארץ ובעולם. הם למדו על מגוון יישומים טכנולוגיים של מדעי המוח ברפואה ובתעשייה.

נקדיש את השיעור האחרון לסגירת מעגל ודיון על ההשלכות של התקדמות מדעי המוח בימינו ובעתיד, הן מבחינת מכשור וטכנולוגיות חדשניות והן מבחינת תובנות חדשות על טבע האדם ומגבלותיו. נדון בסוגיות אתיות ונבחן את הסיכונים הטמונים בהתפתחות המחקרית.

את השיעור ניתן לבנות כדיון בקבוצות ודיון כיתתי באופן הבא: הכיתה מחולקת לקבוצות. בכל פעם מוצגת סוגיה, וכל קבוצה מנסחת דעות בעד ונגד. לבסוף כל קבוצה שולחת נציג שמעלה בפני הכיתה את אחד הטיעונים שעלו בקבוצות.

הנושאים שיעלו לדיון:

1. היבטים משפטיים של זיכרון – עדויות בבית-משפט
2. טיפול לעומת שיפור – שימוש בתרופות לשיפור תפקודים קוגניטיביים (cognitive enhancement)
3. קוגניציה מלאכותית – רובוטים אנושיים
4. מה היה קורה לו היינו שומרים זיכרונות שמחים בלבד?
5. דיון מסכם – חשוב!

בשל האופי המיוחד של השיעור בנינו אותו כך שכל נושא עומד בפני עצמו, וניתן להתעכב על אחדים ולדלג על אחרים. בכל אופן, חשוב מאוד לא לוותר על החלק האחרון - הדיון המסכם.

1. היבטים משפטיים של זיכרון – עדויות בבית-משפט

במידה ולא נערכה התנסות "מלחמת הרוחות" בשיעורים קודמים, ניתן לתת אותה כשיעורי בית מטרימים לקראת דיון זה. ניסוי "מלחמת הרוחות" של בארטלט הוא תרגיל שמראה כיצד המוח מעוות זיכרונות כדי לצקת משמעות במקום שהיא איננה. מתוך "מבוא לפסיכולוגיה", יחידה 5.2.2, עמ' 7-9 ([קישור לפעילות בספר המקוון](#)).



כפי שלמדנו מהתנסות "מלחמת הרוחות", זיכרונות שמרגישים אמיתיים לחלוטין לא משקפים בצורה חד-ערכית את המציאות כהווייתה. הם תלויים ראשית בפרשנות ובתפיסה שלנו, ורגישים לשינויים ומודיפיקציות בהתאם למערכת כללים שהמוח שלנו הורגל לפעול לפיהם. אם כן, זיכרונות יכולים להיות, במקרי קיצון, מזויפים לגמרי, ועם זאת להרגיש אמיתיים לגמרי. הבעיה נוצרת כמובן מהעובדה שאין אנו מסוגלים לקבוע לגבי זיכרון מסוים שלנו אם הוא אמיתי או מזויף.

שינוי ואף יצירה של זכרונות מזויפים (זכרונות אמיתיים לדברים שלא קרו) הודגם בתנאי מעבדה. חוקרת בולטת בתחום של יצירת זכרונות מזויפים היא פרופ' אליזבת לופטוס, פסיכולוגית קוגניטיבית, שערכה סדרה של מחקרים מרתקים בנושא של הטיית זיכרון.

באחד המחקרים הראתה לנבדקים תמונות של תאונות דרכים. לאחר מכן הנבדק היה צריך לשמש כעד ולענות על השאלה "באיזו מהירות המכוניות התנגשו זו בזו?" או "באיזו מהירות המכוניות התרסקו זו לתוך זו?". הנבדקים העריכו את המהירות כגבוהה יותר כאשר השאלה כללה את המילה "התרסקו" לעומת "התנגשו". כאשר השאלה כללה "התרסקו", הנבדקים גם דיווחו שהם זוכרים שבתמונות הופיעו זכוכיות מנופצות למרגלות המכונית, בעוד שאף אחת מהתמונות לא כללה זאת. זה מראה שהאופן שבו אנחנו מעוררים את הזיכרון משפיע על התוכן שלו. **כל היזכרות מעדכנת את הזיכרון ועשויה לשתול בו אינפורמציה חדשה.**

במחקר נוסף של לופטוס, היא הציגה לנבדקים תמונות ילדות שלהם וביקשה מהם לספר על החוויה שהם זוכרים מיום צילום התמונה. בין התמונות שתלה תמונה מזויפת – פניו של הילד הושתלו בתמונה שבה נראה ילד טס בכדור פורח. כל הנבדקים בניסוי זה לא טסו בכדור פורח מימיהם, ובכל זאת היו נבדקים שסיפרו חוויות מיום הטיסה בכדור הפורח, ש"התעוררו" בעקבות התמונה. נבדקים אחרים שדיווחו שהתמונה זרה להם, התבקשו לצפות בה מספר פעמים, ואמנם "נזכרו" לאחר כמה ימים שילדים הם טסו בכדור פורח. **זוהי דוגמה ליצירה של זיכרון אמיתי לדבר שלא היה ולא נברא.**

סרטון TED מעניין מאוד של לופטוס, שבו היא סוקרת את פעילותה המדעית (קצת ארוך, כדאי לתת לתלמידים לצפות בבית, או לבחור קטע מסוים):



(אפשר לבחור כתוביות http://www.ted.com/talks/elizabeth_loftus_the_fiction_of_memory בעברית)

דיון: המחקרים של לופטוס נוגעים בנקודה מטרידה וחשובה: כשמציגים לאנשים מידע כוזב לגבי העבר, הדבר עלול לעוות את הזכרונות שלהם וליצור למעשה זיכרונות מזויפים שמרגישים אמיתיים. ניתן ליצור זיכרונות "אותנטיים" לדברים שלא קרו. זה נכון במיוחד לגבי דברים בעלי ערך רגשי – חוויות מסעירות, מרגשות, אימות. מה זה אומר לגבי עדות בבית משפט? הדילמה הזו רלוונטית הן עבור התובע והן עבור הנתבע. למשל, עדות ראייה של עובדי אורח שהיו עדים לדבר פשע היא לא תמיד אמינה, במיוחד משום שהסיטואציה מלחיצה והעדים עשויים לזכור את הדברים בצורה לא אמינה.



נניח שאתם שופטים בבית משפט השלום בעירכם. על דוכן הנאשמים עומד בחור צעיר שמואשם בתאונת פגע וברח. לתאונה היה עד אדם אחד שמעיד כי הנאשם הוא האדם שנהג ברכב באותו אירוע. הנאשם מסרב להודות. האם ניתן להסתמך על עדות הראייה?

בעד – כן, יש עד וצריך להסתמך על מה שראה. אם לא נסתמך על עדות ראייה, יהיו הרבה מאוד תיקים שלא נוכל לפתור, ופושעים רבים יסתובבו חופשי...

נגד – לא, זכרון הוא לא "מצלמה" שמתעדת את המציאות, הוא מושפע מהרבה דברים, ובמיוחד ברגעים מלחיצים הוא עשוי לתעתע מאוד. המקרה הספציפי שתואר דומה למקרה שבעקבותיו התחילה לופטוס את מחקרה בנושא הטיות זיכרון, ובו לאחר מספר שנים קשות הסתבר שהנאשם חף משפע (מופיע בתחילת הסרטון, לעיל).

2. טיפול לעומת שיפור – שימוש בתרופות לשיפור תפקודים קוגניטיביים (cognitive enhancement)

ברבים מהשימושים בתרופות וטכנולוגיות מבוססות מוח, ישנו קו עדין וחמקמק בין שימוש לצורך טיפול בתפקודים לקויים (therapy) לבין שימוש לצורך שיפור של תפקודים קיימים ותקינים ממילא (enhancement). בעוד שלגבי השימוש מהסוג הראשון קל לנו להסכים, הרי שלשימוש בתרופות לצורך שיפור יכולות קוגניטיביות תקינות יש השלכות מוסריות קריטיות על האינדיבידואל והחברה כולה.



דין: נניח שתלמידי כיתה ט' נוטלים על בסיס קבוע תרופה שמשפרת את הריכוז והזיכרון. מאז שתלמידי הכיתה החלו לקחת את התרופה עלה ממוצע הציונים של הכיתה ב-10 נקודות. כמו כן, כל התלמידים התקבלו לתוכנית מצטיינים ארצית במתמטיקה. העלו טיעונים בעד ונגד השימוש בתרופה לצורכי שיפור תפקודים קיימים. טיעונים אפשריים:

בעד – היכולות אכן השתפרו. צריך לעודד תלמידים להשתפר בלימודים ובכלל בחיים, בכל דרך.

נגד – ראשית, אין תרופה שאין לה תופעות לוואי. שנית, השימוש של חלק מהאנשים בחברה בתרופה שכזו מעלה את רף הקושי להתקבל ולהחזיק בתפקידי מפתח. בהמשך הרף יהיה גבוה יותר ומי שסירב לקחת את התרופה יישאר מאחור (זוהי עוד לפני שעסקנו במחיר התרופה, ובשאלה מה יהיה על אלה שאינם יכולים להרשות לעצמם לרכוש אותה). לאורך זמן, אם כולם יקחו את התרופה – היתרון היחסי של נטילתה יאבד, וכולם יהיו תלויים בה.



חשוב: יתכן שיש בכיתה תלמידים שמאובחנים כלקויי קשב ונוטלים מטילפנידאטים כטיפול. כאן יש צורך להדגיש שניתן ששימוש לצורך טיפול אינו עומד בקנה אחד עם שימוש לצורך שיפור של יכולות אנושיות תקינות.

3. קוגניציה מלאכותית – רובוטים אנושיים

במובנים רבים ניתן לומר שהמוח האנושי הוא מכונת החישוב המשוכללת ביותר בעולם. כושר הלמידה, העיבוד והאינטגרציה של מוח האדם מגיעים ליכולות שאין כיום מחשב ששיג אותן. אך לא לעולם חוסן! יתכן כי בעתיד נוכל לייצר מחשבים בעלי קוגניציה מפותחת.

במהלך השנה למדנו על אפליקציות עיבוד תמונה שמזהות פראצופים, אפליקציות עיבוד צליל שמבינות דיבור, וחיישנים שונים שרגישים לתחושות שונות (אפילו כאלה שגופנו אינו רגיש אליהן). למדנו שיש אלגוריתמים של למידה סטטיסטית, שמאפשרים למחשב ללמוד דברים חדשים ביחס לניסיון העבר שלו. במידה ותוכנות המחשב הללו יושכללו עוד ועוד, לא מן הנמנע שתהיה אפשרות ליצור רובוט בדמות אדם, שלא ייפול ב"אנושיותו" מאדם אמיתי ואף ייטיב ממנו לתפקד (למשל כי הוא לא יצטרך לישון...).



דין: מהי עמדתכם לגבי יצירה של רובוט כזה? התייחסו לשימוש שיעשה ברובוט כזה בתחומים שונים:

- טיפול בקשישים בודדים
- עבודות של מתן שירות (עבודות נקיון, עבודות פקידותיות...)
- צבא
- משרות גבוהות (ניהול בתעשייה, ניהול המדינה...)

הזכירו לתלמידים שהרובוט העתידי יהיה כה משוכלל עד כי לא יהיה ניתן להבחין בינו לבין אדם "ביולוגי". אפשר להפליג על כנפי הדמיון ולתת לרובוט תכונות שונות ומשונות.

טיעונים אפשריים:

בעד: הרובוט האנושי יכול לבצע עבודות סזיפיות – הרי אין לו "רגשות" ואפשר לתכנת אותו לכל עבודה שהיא, משמימה וקשה ככל שתהיה. כמו כן הוא יכול לשמש בתפקידים שבהם נזקקת נוכחות אדם לצורך חברתי, למשל בקרב קשישים בודדים שאין באפשרותם לצאת מהבית.

נגד: הרובוטים עלולים להיות טובים מבני אדם בהרבה תחומים – לחשוב מהר יותר, לא לישון, להחליף לעצמם חלקים פגומים בלי צורך לעבור ניתוח מסוכן, יכולים להשתיל או למחוק מידע בקלות,

ללבוש כל צורה שהיא... רובוטים כאלה יכולים להשתלט על תפקידי מפתח בחברה ועל ניהול המשאבים בעולם, ובכך לדחוק את בני האדם

המלצה לצפייה: מתוך הסדרה "מראה שחורה", עונה שנייה, פרק 1. שם הפרק: "תכף אשוב". הפרק עוסק ברובוטים בעלי קוגניציה אנושית, ומעלה בצורה מרתקת סוגיות אתיות הקשורות בכך. מומלץ מאוד לצפות!



4. מה היה קורה לו היינו שומרים זיכרונות שמחים בלבד?

את החלק הזה נתחיל בדיון:

דיון: תארו לכם שבכל פעם שקורה לנו משהו עצוב או קשה, ניקח תרופה שתגרום לנו לא לזכור את זה. כיצד החיים ייראו - ואיזה סוג של בני אדם אנו נהיה - עם זיכרונות שמחים בלבד?



מצד אחד, לא נסבול שום אבדן, מפני שנוכל להעלים את כל זיכרונות העבר הקשורים בו, וכך יהיה אכפת לנו מעט מאוד מכל מה שהיה לנו ואבד. אולם זיכרונות שמחים בלבד יכולים להיות גם קללה: לא נתענג על שום הישג, שכן לא יהיה לנו שום זיכרון של קושי לאורך הדרך. לא נפעל לשינוי של אי-צדק, ולא יהיה לנו עניין בצדק, כי נוכל למחוק את כל הזכרונות של דברים לא-מוסריים או לא-צודקים. בהיעדר זיכרונות כאלה, דבר לא יטריד את מנוחתנו, אולם חלק גדול מהמורכבות של החיים שלנו כפי שאנחנו מכירים אותם – תיעלם. מצד אחד יכול להיות שזה יקל עלינו את חוויות החיים, ומצד שני ייתכן שזה רק יהפוך אותנו לאנשים רדודים, וללא שום עניין בחיים המורכבים סביבנו.

ביטול העצב והכאב אינו מוביל לשמחה במובן האנושי שלה. הפילוסוף ברוך שפינוזה תיאר את השמחה כ"מעבר של אדם משלמות קטנה יותר לשלמות גדולה יותר" ואת העצב כ-"מעבר של אדם משלמות גדולה לשלמות קטנה". משמע, אין משמעות לשמחה ללא עצב. העצב והשמחה מצויים על אותו ציר בעולם ה"עצמי", שניהם תוצאה של מעבר ממצב למצב, כאשר ההבדל הוא בכיוון של המעבר. אם נבטל את העצב, כיצד נדע שמחה?

בנוסף, חשוב לציין שבאופן כללי אנחנו תופסים את העולם בצורה יחסית. כלומר, אנחנו מפרשים את הערך של דברים כ"טוב" או "רע" ביחס לדברים אחרים שיש לנו בחיים. דוגמה מצוינת לכך היא שרוב האנשים שזכו בלוטו לא באמת הופכים להיות מאושרים כל יום ויום עד סוף חייהם (הייתם מאמינים?). בתחילה כמובן ישנה תחושה גדולה של שמחה, כי הזכייה נשפטה ביחס למצב שלפני הזכייה. אולם לאחר זמן מה האדם מתחיל לשפוט את חייו ביחס למה שהם הפכו להיות, ואז דברים פחות מרגשים אותו וכדי להגיע למימוש הוא זקוק לשיאים חדשים. לזה אנחנו קוראים "צרות של עשירים", אבל חשוב לזכור שברמת החוויה – הן מרגישות כמו צרות של ממש! לכן, יש לשער שאם נעלים זיכרונות של חוויות שליליות, נתחיל לחוות דברים פחות גרועים כשליליים ביותר.

5. סיכום

בראשית הסיכום ניתן להעלות את הטענות הבולטות ביותר, או לחילופין לבקש מכל קבוצה שתציג את הדבר הכי מלמד / מעניין / מפתיע שהתלמידים בה למדו מהשיעור.

התגליות של השנים האחרונות בתחום חקר המוח שינו את האופן שבו אנו מבינים את ההווה האנושית וציידו אותנו בטכנולוגיות חדשניות ומשוכללות. בין אם נרצה ובין אם לאו, תחום חקר המוח לא מפסיק לשנות את עולמנו, לטוב ולרע. מצד אחד, אנחנו נהנים מטיפולים חדשניים ומיכשור משוכלל, ומצד שני חשופים לסכנות ובעיות מוסריות.

האם הקידמה משתלמת? התשובה צריכה להתבסס על המילה - **אחריות**. הידע הנרחב, המחקר האינטנסיבי וההישגים הרבים של המחקר באים בד בבד עם אחריות גדולה מאוד, בחינה של הסכנות וקביעת כללים המגבילים את השימוש בטכנולוגיה לגבולות המוסר.

נכון שחלק גדול מכך נתון בידיים של מדענים, תעשיינים ומנהיגים. אבל גם עלינו, צעירים ויחידים, מוטלת אחריות.

אז מה אנחנו יכולים לעשות בעניין? מה שאנחנו עושים ממש עכשיו – להעלות את הנושאים לדיון, להציג את היתרונות לצד הסכנות, לחשוב ביחד על מצבים שונים ולנתח אותם. נבחר בעתיד באילו טכנולוגיות אנו מוכנים להשתמש ונתנגד לשימוש בלתי מוסרי אם יהיה צורך. נגדל להיות מבוגרים אחראים שהם בעלי מקצוע אחראים. אם זה יהפוך להיות סטנדרט של כל אנשי המקצוע הנוגעים בדבר, נוכל להיות בטוחים שמתקבלות החלטות טובות יותר ובטוחות יותר לאדם ולחברה.