



## מערכת חוש הריח: החיים מריחים טוב

Richard Axel\*

הפקולטה לרופאים ולמנתחים, המכון הרפואי על שם הווארד יוז, אוניברסיטת קולומביה, ניו יורק, ארצות הברית

### סוקרים צעירים

PELEG

גיל: 10



העולם שסביבנו מלא בריחות. חלקם נעימים, מרגיעים ומעלים זיכרונות מתוקים מהעבר; אחרים יכולים להיות מגרים או מפחידים. כמה ריחות לדעתכם אתם מסוגלים לזהות? אולי תופתעו לדעת שבני אדם יכולים לזהות מאות אלפי ריחות שונים, ואין זה דבר של מה בכך! אז איך אנחנו עושים זאת? במאמר זה נרחיח את דרכנו לאורך מערכת חוש הריח, נבחן את הקשרים הקיימים בין האף לבין המוח, נבין כיצד המוח מעבד ריחות שונים, ואילו תגובות ייחודיות הריחות מעוררים בו.

פרופסור ריצ'רד אַקְסֶל (Richard Axel) זכה בפרס נובל בשל פיזיולוגיה או רפואה בשנת 2004 עם פרופסור לינדה באק (Linda B. Buck) על גילוי קולטני הריח והמבנים הארגוניים של מערכת חוש הריח.

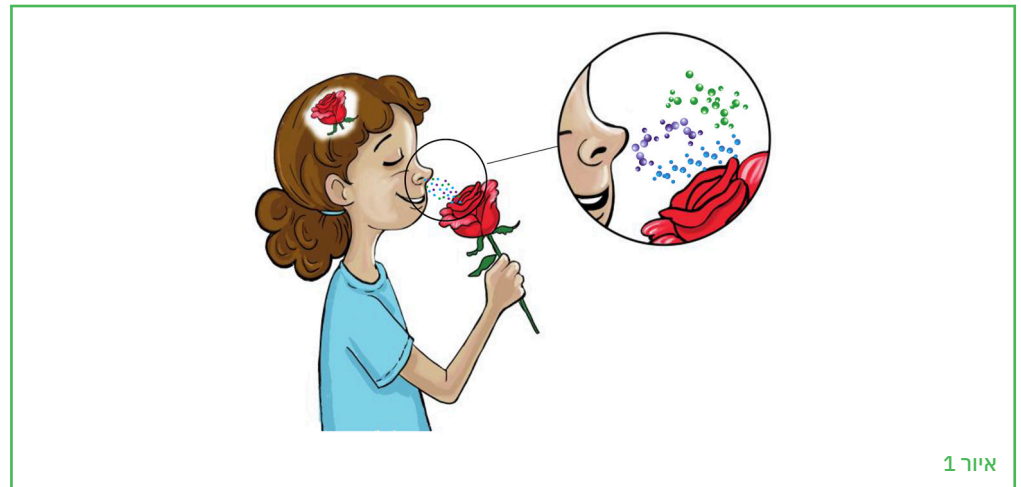
### כיצד אנחנו מריחים?

כשאנחנו רואים זר פרחים יפהפה או עוברים ליד חנות בֶּשֶׁמִים, לעיתים קרובות עולה בנו דחף להתקרב ולהריח. האם אי פעם תהיתם מהו בדיוק הדבר הזה שאתם מריחים, וכיצד

אתם מזהים ריח מסוים? כשאנחנו מריחים פרח אנחנו שואפים מולקולות שמשתחררות ממנו. ואז נבנה במוחנו ייצוג פנימי של ניחוח הפרח באמצעות פעילות חשמלית המתרחשת במוח (איור 1).

## איור 1

**ייצוג אומנותי של תהליך ההרחה.** מגוון מולקולות כימיות (מולקולות ריח) משתחררות מהוורד אל האוויר. המולקולות הללו מגיעות לאף, והן מפעילות אותות חשמליים המועברים למוח. האותות האלה מאתחלים פעילות חשמלית במספר אזורים במוח. הפעילות באזורים הללו מאפשרת לנו לזהות ריח מסוים – במקרה שלנו נזהה את ריחו של הוורד.



איור 1

## מערכת חוש הריח (Olfactory System)

המערכת החושית האחראית על ההרחה.

## אודורנט (Odorant)

מולקולות הריח שעצמים משחררים. הן נישאות באוויר ונכנסות לאפים שלכם.

## אֶפִּיְתֵל הָאֵף (Nose Epithelium)

רקמה שנמצאת בחלק העליון האחורי של האף המשתפת בתהליך ההרחה.

## קולטן (Receptor)

מולקולה שנמצאת על תא ומקיימת אינטראקציה ספציפית עם מולקולה נוספת. יחד הן מתפקדות כמו מנעול ומפתח. הקולטן מתרגם את האינטראקציה שלו לאות חשמלי בתוך התא.

## תְּאֵי עֶצֶב חִישֵׁתִיִּים לַנִּיחּוּחַ (OSN תאי) (Olfactory Sensory Neurons)

תאי עצב להם יש קולטני חישה. התאים הללו מתרגמים את האינטראקציה עם האודורנטים לאותות חשמליים שניעים למוח.

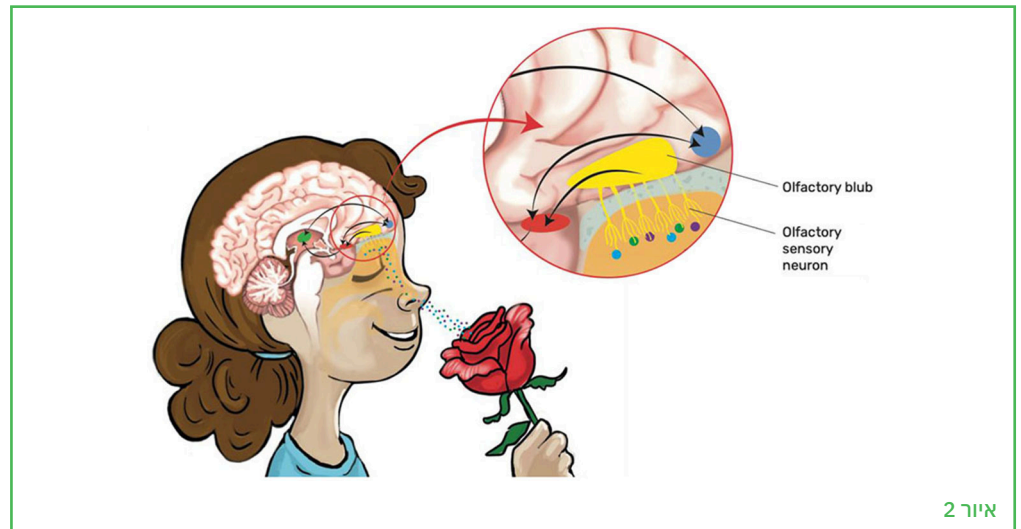
לפני שאנחנו צוללים לפרטי תהליך ההרחה, נכיר את דרך הפעולה של מערכת חוש הריח. הריחות מורכבים ממולקולות שמשתחררות מהדבר שאותו אנחנו מריחים (למשל תפוז או ורד). מולקולות הריח נקראות **אודורנטים** והן נישאות באוויר ונכנסות לאף. ברקמה הנמצאת בחלק האחורי העליון באף יש חלק שנקרא **אֶפִּיְתֵל הָאֵף**, שבו יש תאים שעליהם נמצאים **קולטנים** מיוחדים. לכל אחד מהקולטנים האלה יש צורה ייחודית, כך שהוא נוטה "לאהוב" אודורנטים מסוימים יותר מאודורנטים אחרים והוא פעיל יותר בנוכחותם (איור 2). הקולטנים הללו הם תְּאֵי עֶצֶב (נוֹיְרוֹנִים), הנקראים **תְּאֵי עֶצֶב חִישֵׁתִיִּים לַנִּיחּוּחַ (תאי OSN)**, או בקיצור קולטני ריח. כאשר מולקולות הריח מגיעות אל קולטני הריח, הקולטנים מתרגמים את האינטראקציה הזאת לאותות חשמליים הנעים מהם אל המוח. שימו לב למנגנון הגאוני! כשאתם מריחים משהו, כל מולקולת ריח (למשל בָּטָא-אֵיוֹנוֹן בוורד, לימוֹן בלימון, וּבְנֵזִיל אֶצְטָט בתות) מפעילה **צירוף ייחודי** של קולטני ריח [1] מתוך יותר מאלף סוגי קולטנים שיש באף. הצירוף הזה גורם להיווצרות דפוסים ייחודיים של פעילות חשמלית, המתבטאת כייצוג של ריח מסוים. אפשר לסכם זאת כך: קידוד הריחות במוח מבוסס על הפעלה של תת-קבוצה ייחודית של קולטני ריח. בכל אחד מהקולטנים הללו מתבצעת הפעלה חשמלית כאשר הקולטן נמצא באינטראקציה עם מולקולות ריח מסוימות, אבל לא עם מולקולות ריח אחרות. הפעילות החשמלית הזאת נעה מהקולטנים שבאף אל אזורים שונים במוח, שמעבדים ומציגים מידע שקשור בריח (איור 2).

## כיצד מזהים את הגנים של קולטני הריח?

כשהתחלתי לחקור את מערכת חוש הריח, ידענו שחיות יכולות להבחין בין כמות עצומה של ריחות שונים, אך לא הבנו כיצד הן עושות זאת. עם זאת, הסקנו מכך שחייב להיות מנגנון מוחי שמאפשר לחיה לזהות כל כך הרבה מולקולות ריח. מסקנה זו הובילה אותנו לחשוב שוודאי יש הרבה מאוד גנים המקודדים לקולטני ריח (כלומר, מספיקים הוראות ליצירתם). כמו כן, תאי ה-OSN המתרגמים את קולטני הריח, צריכים להיות מסוגלים להפוך את האינטראקציה בין מולקולות הריח לבין הקולטנים לאותות חשמליים.

## איור 2

**קולטני ריח באף.** במעמקי האף נמצא אֶפִּיתֵל האף. זהו החלק העליון והאחורי באף ובו נמצאים תְּאֵי עֶצֶב חישתיים לניחוח (תאי OSN) שעליהם יש מולקולות חלבון בשם "קולטני ריח". הקולטנים בתאי ה-OSN באים במגע עם המולקולות המרחפות באוויר, והאינטראקציה בין מולקולות הריח לבין תאי ה-OSN מייצרת אות חשמלי שנגע לאורך סיבי עצבים (הנקראים אַקְסוֹנִים) לאזור במוח בשם "פקעת ההרחה". משם הפעילות החשמלית מתפשטת לאזורים נוספים במוח (המסומנים בעיגולים בצבעים שונים) והם מעבדים מידע הקשור לריח.  
= Olfactory bulb  
פקעת ההרחה  
Olfactory sensory neuron  
= תְּאֵי עֶצֶב חישתיים לניחוח (OSN).



במחקר שלנו רצינו למצוא את הגנים המקודדים לקולטני הריח. לשם כך התבססנו על שלוש הנחות שפישטו את המחקר שלנו: (1) קיימת משפחה גדולה של גנים המקודדים לקולטני ריח; (2) לקולטני ריח יש מנגנון להפיכת אינטראקציות עם מולקולות ריח לאותות חשמליים; (3) גנים המקודדים לקולטני ריח מתבטאים רק בתאי ה-OSN באפיתל האף. הנחות אלו סייעו לנו לחפש בעילות משפחה של גנים המקודדים לקולטני ריח בעכברים. בודדנו את תאי ה-OSN שלהם ומצאנו משפחת גנים חדשה של עכברים, המורכבת מכ-1,000 גנים שונים של קולטנים [2]. התרגשנו מכך מאוד, כיוון שזאת הייתה הפעם הראשונה שזוהו גנים של קולטני ריח. כעבור 23 שנים בערך, בשנת 2004, הגילוי הזה זיכה אותי ואת עמיתתי פרופ' לינדה באק בפרס נובל בפיזיולוגיה או רפואה [3].

לאחר שזיהינו את הגנים של קולטני הריח, היה באפשרותנו להשתמש בטכניקות מתוחכמות (כולל גנטיקה מולקולרית והדמיה עצבית) כדי לשאול שאלות מורכבות יותר על צורת הארגון ועל הפעילות של תאי ה-OSN באף ובמוח. לדוגמה, כמה גנים של קולטנים מבטא כל תא OSN? האם כל תא OSN מכיל רק סוג אחד של קולטני ריח או מספר סוגים של קולטנים? שתי האפשרויות הללו מרמזות על שני מבנים ומנגנוני תפקוד של מערכת הריח שהם שונים לחלוטין אחד מהשני. כפי שהתברר, האפשרות הראשונה היא הנכונה: כל תא OSN מבטא רק גן אחד מתוך כ-1,000 גנים אפשריים של קולטנים.

### כיצד תְּאֵי העֶצֶב של מערכת חוש הריח (OSN) מאורגנים?

קעת נבחן כיצד תאי ה-OSN מאורגנים באיברים שבהם מתרחש תהליך זיהוי הריחות – באף ובמוח. לעכברים יש 10 מיליון תאי OSN באף ו-1,000 קולטני ריח שונים. כיוון שכל תא OSN מבטא רק סוג קולטן אחד, זה אומר שכל סוג קולטן מתבטא ב-10,000 תְּאֵי עֶצֶב (10 מיליון/10,000 = 1,000). איך 10,000 תאי העצב המבטאים את אותו קולטן הריח מאורגנים באפיתל האף? האם הם מתפרסים על פני שטח גדול, או שהם מקובצים בצפיפות? מה קורה לאותות החשמליים שהם מייצרים כשהם מקיימים אינטראקציה עם האודורנטים (מולקולות הריח) ה"אהובים" עליהם? האם מידע הקשור לאודורנט ספציפי מתכנס לאזור מסוים במוח?

#### תְּאֵי עֶצֶב (Neurons)

בלועזית: נוֹיְרוֹנִים. סוג התא העיקרי במוח. תאי העצב מייצרים אותות חשמליים ומשדרים אותם לתאי עצב אחרים.

## אֶקְסוֹנִים (Axons)

הסיבים העצביים הנושאים אותות חשמליים מתא עצב אחד לאחר.

## פקעת ההרחה (Olfactory Bulb)

תחנת הממסר הראשונה במוח המשתתפת בתהליך ההרחה. היא מקבלת מידע מתאי OSN ומעבירה מידע על ריחות לאזורים אחרים במוח.

## גְלוֹמֶרָלוּס (Glomerulus)

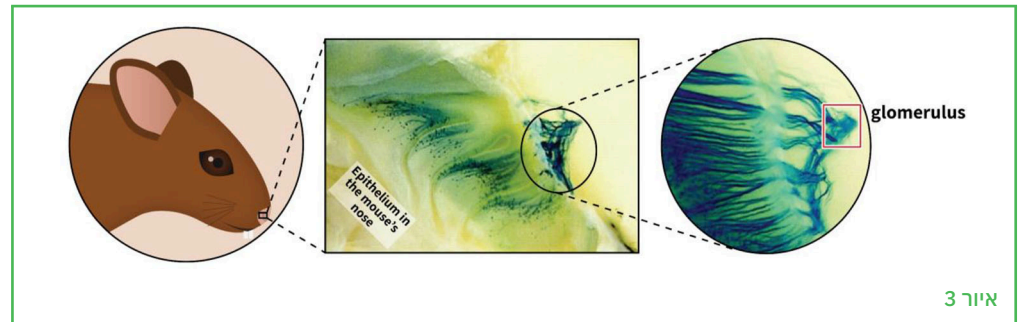
אזור בפקעת ההרחה שבו מתרכזים כל תאי המבטאים קולטן מסוים.

## איור 3

**ארגון תאי ה-OSN.** באפם של עכברים יש מיליון תאי OSN. כל תא OSN מבטא רק גן אחד של קולטן מסוים, כך שכל סוג של קולטן ריח מתבטא בכ-10,000 תאי OSN הפרוסים ברחבי אפיתל האף (מסומנים בנקודות כחולות קטנות בתמונה המרכזית). כל תא OSN שולח את המידע החשמלי שלו דרך אקסון (סיבים כחולים) למיקום ייחודי בפקעת הריח, הנקרא גְלוֹמֶרָלוּס (בריבוע אדום מימין). הסיבים של כל 10,000 תאי ה-OSN המבטאים את אותו הקולטן מתכנסים באותו גְלוֹמֶרָלוּס. תאי חישה המבטאים קולטנים שונים (התמונה נלקחה מ-[4]).

Epithelium in the mouse's nose = אֶפִּיֶתֶל באף העכבר  
Glomerulus = גְלוֹמֶרָלוּס.

את התשובה לשאלות הללו גילינו באמצעות טכניקה מתקדמת שצובעת רק תאי עצב המבטאים את אותו גן קולטן. תאי ה-OSN פרוסים באפיתל האף באופן אקראי על פני שטח גדול (איור 3). השלוחות שלהם (סיבים הנקראים אֶקְסוֹנִים) מגיעות עד לתחנת הממסר הראשונה במוח שמעבדת ריח, והיא נקראת פקעת ההרחה. כל תאי ה-OSN המבטאים קולטן ייחודי מתכנסים לאזור מסוים בפקעת ההרחה, הנקרא גְלוֹמֶרָלוּס איור 3, מימין). בסך הכול ישנם 1,000 גְלוֹמֶרָלוּס נפרדים בפקעת הריח, וכל אחד מהם מקבל אותות חשמליים מכל תאי ה-OSN (10,000) המבטאים גן של קולטן מסוים [4].



איור 3

## פעילותם של תאי העצב של מערכת חוש הריח (OSN)

מה קורה כאשר בעל חיים נחשף לריח מסוים (תיבה 1)? ריחות מורכבים ממולקולות רבות (למשל, במקרה של הוורד יש יותר מ-400 מולקולות [6]). כפי שראינו, כל מולקולת ריח מפעילה קבוצה מסוימת של כ-10,000 תאי OSN שמתכנסים אל גְלוֹמֶרָלוּס מסוים בפקעת הריח ומפעילים אותו. ריח של ורד, למשל, מפעיל קבוצה שונה של גְלוֹמֶרָלוּס מזאת המופעלת כשמריחים שוקולד. זה אומר שריחות מסוימים יוצרים דפוסים מסוימים ("מפות") של פעילות הגְלוֹמֶרָלוּס במוח.

### תיבה 1. מערכת חוש הריח בחיות

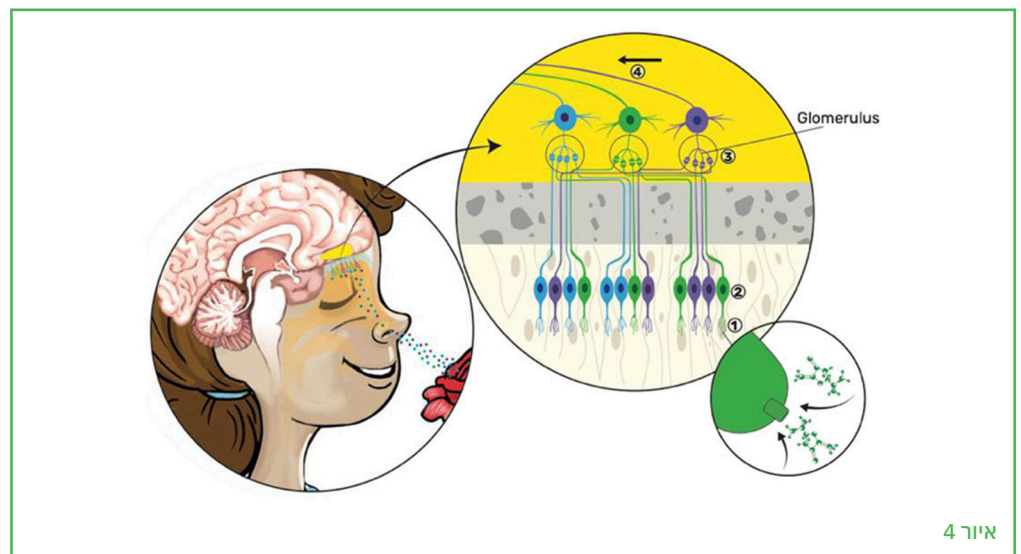
היכולת לקלוט ריחות ולהבדיל ביניהם חשובה מאוד לבעלי חיים רבים; חוש הריח היה כנראה החוש הקדום ביותר שהתפתח באורגניזמים. ישנם קווי דמיון רבים בין המערכות של חוש הריח של בעלי חיים שונים. לדוגמה, מערכת חוש הריח של זבובי הפירות, בדומה לזו של בני אדם ושל מכרסמים, מכילה תאים מסוימים, כאשר כל אחד מהם מזהה מספר קטן יחסית של מולקולות ריח [5]. התאים של קולטני הריח של זבובי פירות המבטאים את אותו הקולטן (הממוקמים על שני המחוששים שלהם) מתכנסים גם הם אל אותו גְלוֹמֶרָלוּס. עם זאת, לזבובי פירות יש פחות גְלוֹמֶרָלוּס מאשר לבני האדם (כ-60 אצל הזבובים, לעומת 1,000 בבני אדם). הדמיון בין המערכות של חוש הריח של הזבובים לבני אלו של בני האדם מאפשר למדענים להסיק מסקנות חשובות לגבי מערכת חוש הריח האנושית, כיוון שקל יותר לחקור זבובי הפירות מאשר בני אדם. על אף הדמיון, ישנם גם הבדלים מרכזיים בין מערכות חוש הריח של בני אדם ושל הזבובים, וריחות שנחשבים נעימים או לא נעימים לבני אדם לא בהכרח יחוו אותה הצורה אצל הזבובים, ולהפך.

כיום אנחנו מסוגלים להסתכל במבט-על על פקעת הריח של מכרסמים באמצעות טכניקות הדמיה עצבית, "לקרוא" את דפוסי הארגון המרחבי (ה"מפה") של הפעילות העצבית, ומתוך פעילות זו "לפענח" מהו הריח שבו נתקלו המכרסמים. זוהי שיטה חדשה מצוינת לזיהוי ריחות, אך כמובן שאין זו הדרך שבה החיה מזהה ריחות, כיוון שאין לה מיקרוסקופ הדמיה

בפקעת הריח שלה, והיא אינה יכולה להסתכל מבחוץ על הפעילות העצבית שלה כפי שעושים המדענים.

למרות שאיננו מבינים לגמרי את היכולת המרתקת של המוח לזהות ריחות, אנחנו יודעים שתאי העצב בפקעת הריח שולחים את האקסונים שלהם לאזורים רבים במוח (איור 4). חלק מהאזורים הללו אחראים להתנהגויות אוטומטיות המתרחשות בתגובה לריחות. לדוגמה, כאשר בעל חיים נתקל בריח מסוים המצביע על גורם סכנה, כמו כשעכבר נתקל בריח של חתול, מופעלת אצלו תגובה אוטומטית של "ברח!". פרט לאקסונים המגיעים לאזורים אלו, ישנם אקסונים אחרים הנשלחים מפקעת הריח לאזורי המוח שבהם מתרחשת למידה. כך בעלי החיים לומדים תגובות התנהגותיות מסוימות על סמך הריחות שבהם הם נתקלים [3].

#### איור 4



איור 4

**הארגון האנטומי והפונקציונלי של מערכת חוש הריח.** (משמאל)

מולקולות הריח נכנסות לאף ונקשרות לקולטנים שבתאי ה-OSN. כל תא OSN מבטא רק סוג אחד של קולטן ריח ("אצבעות" בצבע שונה). האקסונים של תאי ה-OSN חוצים את עצם האף ונכנסים לתחנת הממסר הראשונה של מערכת חוש הריח במוח – פקעת ההרחה (המסומנת בצהוב). (מימין) תקריב של האזור המסומן על ידי החץ. (1) תאי ה-OSN המבטאים את אותו הקולטן נקשרים רק למולקולות ריח מסוימות (מבט מקרוב על תא OSN "ירוק"). (2) תאי ה-OSN (מסומן בצבע) מפוזרים בכל אפיתל האף. (3) תאי ה-OSN המבטאים את אותו הקולטן שולחים את האקסונים שלהם לאותו גלומרולוס. (4) מידע עובר מפקעת ההרחה לאזורים אחרים במוח האחראים להתנהגות אוטומטית או נרכשת (שלומדים אותה). (התמונה נלקחה מתוך: פרס נובל).

רוב רובן של התגובות האנושיות לריחות הן מהסוג השני – נרכשות (כלומר, כאלו שלומדים אותן) ולא אוטומטיות. אנשים משייכים משמעויות נרכשות לריחות מסוימים, והמשמעויות האישיות הללו משפיעות על התגובות שלהם לריחות. לדוגמה, אנשים שהייתה להם פגישה ראשונה רומנטית הכוללת יין, יכולים ללמוד לקשר את ריח היין הזה עם תחושת האהבה. לאחר מכן, כשהם מריחים יין, הם מרגישים "פרפרים בבטן" ורוצים ליצור קשר עם יקיריהם.

משמעות הדבר היא שלאנשים עשויות להיות תגובות התנהגותיות ייחודיות לריח מסוים בהתאם לחוויות שבהן הריח היה נוכח (תיבה 2). עבור חלקנו, הרחת ורד קשורה לחוויה רגשית נעימה (כמו אהבה), ואילו עבור אחרים ייתכן שהוורד קשור לצבע האדום, שאולי הם מקשרים לדם ולפחד. אם המוחות של כל אחד מאיתנו מגיבים לאותה מולקולת ריח בצורה שונה, האם כששני אנשים מריחים ריח מסוים, הם באמת חווים את אותו הריח?

#### תיבה 2. חוש הריח והגיל

חוש הריח נוטה להיחלש ככל שאנחנו מזדקנים. יכולתנו פוחתת לזהות ריחות חלשים או להבדיל בין ריחות. יש לכך מספר גורמים, בכללם ירידה במספר קולטני הריח, וירידה בתפקודם של אזורי מוח

מסוימים. מעניין לציין כי מחקרים עדכניים הראו שאובדן חוש הריח הוא סימן מקדים למחלת האלצהיימר, ויכול לסייע באבחון המחלה יותר מ-10 שנים לפני הופעת תסמינים הקשורים לזיכרון.

## האם התפוז שלי מריח כמו התפוז שלך?

דמיינו שאנשים שמעולם לא ראו או הריחו תפוז מבקשים מכם לתאר את ריח התפוז. האם אתם יכולים לנסח זאת במילים? סביר להניח שלא – תפוזמריח כמו תפוז, ואנחנו לומדים לזהות את ריחו מתוך אֶסוֹפְיָאָיָה (קישור בין רעיונות או מחשבות כך שהופעתו של האחד בתודעה גוררת אחריה את העלאתו של האחר). כאשר אנחנו רואים תפוז, אנחנו מריחים אותו בו-זמנית; אפילו אם אנחנו מריחים אותו בחושך, אנחנו יודעים שזה תפוז על ידי קישור בין הריח לבין מראה התפוז, או השם "תפוז". במובן זה, הרחה שונה מהותית מראייה; אם אנשים שמעולם לא ראו תפוז בעבר שואלים אתכם איך נראה תפוז, תוכלו לומר שהוא עגול, כתום, בערך בגודל של כדור טניס, בעל מרקם חלק וכדומה. אנחנו יכולים ליצור דימוי פנימי של עצם כלשהו, אך איננו יכולים באמת ליצור דימוי פנימי של ריח.

אם אין ביכולתנו לתאר ריחות באמצעות מילים, ואיננו יכולים ליצור דימוי פנימי של ריחות, איך אנחנו יודעים שכשאנחנו מריחים תפוז, כולנו חווים ריח זהה? התשובה היא שאיננו יודעים! כפי שצינתי קודם לכן, סביר להניח כששני אנשים מריחים תפוז בפעם הראשונה, כל אחד מפעיל דפוסים שונים של פעילות של תאי העצב – כל אחת במוחה שלה, וכל אחד במוחו שלו. עם זאת, כולנו מקשרים את הריחות הללו לאותו הפרי כיוון שכולנו רואים את התפוז. מעבר לקישור שאנחנו עושים בין הריח לבין החפץ שנקרא "תפוז", האם אנחנו חווים את הריח בצורה דומה? ייתכן, אך הריחות שאנחנו חווים עשויים להיות יחסיים לכל שאר הדברים שהרחנו בחיינו. למשל, הריח של תפוז דומה יותר לריח של לימון מאשר לריח של קפה – זה נכון מבחינת כולנו. זה אומר שהדמיון בין האופן שבו אנשים תופסים ריחות עשוי להיות יחסי בלבד – כולנו מסכימים שהריח של משהו מסוים דומה יותר לריח של דברים מסוימים לעומת אחרים. זוהי תזכורת טובה לכך שתפיסת הריחות שלנו אינה מוחלטת – בניגוד לתפיסה שלנו לגבי הצבע האדום, למשל, שמתבססת על תדר קבוע של אור.

## חידת התפיסה: שאלה פתוחה עבור המדענים העתידיים

ישנה שאלה חשובה ומורכבת לגבי תפיסה, שהמדענים טרם מצאו לה תשובה. שאלה זו שייכת לחוש הריח, אך גם לשאר החושים, ולכן היא עקרונית מאוד: כיצד מתרחשת הפרשנות של המידע החושי?

כפי שצינו, כשהמוח מעבד מידע שמקורו בחושים, נוצר דפוס מסוים של פעילות חשמלית בקבוצה ייחודית של תאי עצב במוח. דפוס הפעילות העצבית מייצר במוח ייצוג של העולם הפיזי. דפוס הפעילות הללו אינם קבועים מבחינת הזמן (כלומר, הם מתרחשים בזמנים שונים) ומבחינת המרחב (באזורים שונים במוח). כל העושר והמגוון של העולם הפיזי מיוצג בצורה כלשהי על ידי פעילות חשמלית של קבוצות ייחודיות של תאי עצב בזמנים מסוימים ובמקומות מסוימים במוח.

המדענים מסיקים מכך שני דברים: ראשית, שהמוח יוצר תמונה מופשטת של המציאות הפיזית; ושנית, שהמוח צריך לפרש את המידע המופשט הזה, ומעניק לו משמעות. עצם שקיים בעולם החיצוני, כמו תפוז, מתורגם לדפוס מסוים של פעילות חשמלית המייצגת אותו במוח. לאחר מכן, המוח "מפענח" את המשמעות של אותה פעילות חשמלית על ידי פרשנות של הפעילות הזו – ישנו תפוז הקיים בעולם. כמו כן, על המוח לקשר בצורה כלשהי את דפוס הפעילות הזה למשמעות מסוימת; למשל, "זה ריח של תפוז; הריח מייצר בי רגשות חיוביים כי הוא מזכיר לי את הפרדס שבו ביקרתי לפני כמה שנים...". נכון לעכשיו, ה"קפיצה" המפתיעה הזו מהפעילות החשמלית במוח לפרשנות ולמשמעות שאנחנו משייכים לה היא תעלומה אמיתית – עוד לא הבנו איך זה קורה. אני מאמין שהמעבר ה"קסום" הזה הוא החידה הגדולה הבאה הניצבת בפני מדעני המוח העתידיים. אולי אתם תהיו ביניהם?

## המלצות למוחות צעירים

בעיניי יש דרך פשוטה מאוד לבחור מה לעשות בחיים. לא משנה במה תבחרו – בין שאתם רוצים להיות מדענים או בנאים. אך מה שזה לא יהיה, הקפידו לבחור תחום שאתם אוהבים, התמסרו לעבודתכם והשקיעו בה את מירב המאמצים וההתלהבות. זה הכול! עליכם לטפח את התשוקה למה שאתם עושים. תשוקה זו, הניזונה ממיומנות ומידע, תניע אתכם למצוינות. עליכם לגלות את תחום העניין שלכם, ואז להעמיק בו ככל יכולתכם. כאשר תשוקה וידע הולכים יד ביד, זהו מתכון ליצירתיות ולאושר.

## חומרים נוספים

Ted-Ed: כיצד אנחנו מריחים? (אנגלית)

<https://www.youtube.com/watch?v=snJnO6OpjCs>.

## תודות

ברצוני להודות לנועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה ועל כתיבה משותפת של המאמר, לשרון עמלני על האיורים, ולסוזן דיבד (Susan Debad) על העריכה הלשונית של כתב היד באנגלית. תודה מיוחדת להרן שני-נרקיס על הערותיו החשובות לכתב היד.

## מקורות

1. Duchamp-Viret, P., Duchamp, A., and Chaput, M. A. 2003. Single olfactory sensory neurons simultaneously integrate the components of an odour mixture. *Euro. J. Neurosci.* 18:2690–6. doi: 10.1111/j.1460-9568.2003.03001.x
2. Buck, L., and Axel, R. 1991. A novel multigene family may encode odorant receptors: a molecular basis for odor recognition. *Cell.* 65, 175–87. doi: 10.1016/0092-8674(91)90418-X

3. Axel, R. 2005. Scents and sensibility: A molecular logic of olfactory perception (Nobel lecture). *Angewandte Chemie Int. Edn.* 44:6110–27. doi: 10.1002/anie.200501726
4. Mombaerts, P., Wang, F., Dulac, C., Chao, S. K., Nemes, A., Mendelsohn, M., et al. 1996. Visualizing an olfactory sensory map. *Cell.* 87:675–86. doi: 10.1016/S0092-8674(00)81387-2
5. Wilson, R. I. 2013. Early olfactory processing in *Drosophila*: mechanisms and principles. *Ann. Rev. Neurosci.* 36:217 . doi: 10.1146/annurev-neuro-062111-150533
6. Shalit, M., Guterman, I., Volpin, H., Bar, E., Tamari, T., Menda, N., et al. 2003. Volatile ester formation in roses. Identification of an acetyl-coenzyme A. Geraniol/citronellol acetyltransferase in developing rose petals. *Plant Physiol.* 131:1868–76. doi: 10.1104/pp.102.018572

פורסם אונליין: 19 בספטמבר 2024

נערך על ידי: Idan Segev

מנטור מדעי: Adi Fledel Alon

ציטוט: Axel R (2024) מערכת חוש הריח: החיים מריחים טוב. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2022.1022504-he

תורגם והתאם מ: Axel R (2023) The Olfactory System: It Smells Good To Be Alive. *Front. Young Minds* 10:1022504. doi: 10.3389/frym.2022.1022504

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהיעדר כל קשר מסחרי או כלכלי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

זכויות יוצרים © 2022 © Axel 2024. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

## סוקרים צעירים

PELEG, גיל: 10

אני משחק טניס ואוהב לשחות. אני גם מנגן בפסנתר, משחק כדורסל, ומשחק הרבה במחשב. אני אוהב מאוד לראות סרטים, ואוהב לשחק עם משפחתי ועם חבריי.

## הכותבים

PHILLIP A. SHARP

פרופסור ריצ'רד אָקְסֶל הוא ביולוג מולקולרי במחלקה למדעי המוח באוניברסיטת קולומביה (ניו יורק, ארצות הברית).





הוא נולד ב-1946 בברוקלין שבניו יורק. כיוון שהיה גבוה, שיחק כדורסל בשנות נעוריו. הוא למד ספרות באוניברסיטת קולומביה. לאחר שנחשף שם לתחום הביולוגיה המולקולרית, הוא נהיה עוזר מחקר בתחום זה. פרופ' אקסל למד בבית הספר לרפואה באוניברסיטת ג'ונס הופקינס (Johns Hopkins); מרילנד, ארצות הברית), ובשנת 1971 קיבל הסמכה לרפוא. לאחר מכן, הוא חזר לאוניברסיטת קולומביה כדי לעסוק שוב במושא עניינו – הביולוגיה המולקולרית – וקיבל שם את תואר הפרופסור ב-1978. הוא פיתח טכניקות של העברת גנים שאפשרו להשתיל DNA זר בכל תא ולייצר מספר גדול של חלבונים בעלי חשיבות קלינית. הטכניקות הללו אפשרו גם לבודד את הגן של הקולטן התאי CD4 עבור נגיף HIV, הגורם לתסמונת הכשל החיסוני הנרכש (אידס). פרופ' אקסל יישם את כלי הביולוגיה המולקולרית בתחום מדעי המוח, וחשף יותר מאלף גנים הקשורים לדרך שבה תופסים ריח. בשנות הקריירה המדעית שלו, פרופ' אקסל זכה בפרסים ובתארים רבים, ביניהם פרס נובל בתחום של פיזיולוגיה או רפואה לשנת 2004, פרס צלחת הזהב של האקדמיה האמריקאית להישגים (2005), ומדליית הסליל הכפול (2007). יש לו שני בנים – אדם ויונתן, והוא נשוי לפרופסורית קורי ברגמן (Cori Bargmann), גנטיקאית התנהגותית באוניברסיטת רוקפלר. [\\*ra27@columbia.edu](mailto:ra27@columbia.edu)

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים  
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس  
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל  
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK