

# טלפון מעביר קול. מה עם ריח? חוקרים ישראלים יצרו לראשונה ריחות דיגיטליים

לאחר שנים של ניסיונות, מחקר במכון ויצמן מציג פריצת דרך לקראת דיגיטציה מלאה של הריח ולבנייה של Telesmell, או "רח-רחוק" - מכשיר שיאפשר לשדר ניחוחות

## [אסף רונאל](#)

ב-7 במארס, 1876 קיבל אלכסנדר גרהאם בל את הפטנט על המכשיר שעל פיתוחו עבד במשך שנים – הטלפון. ההמצאה שלו, כמו מכשירים דומים שפיתחו חוקרים אחרים באותה תקופה, התבססה על ההבנה שאת גלי הקול ניתן לתרגם לגלים אלקטרו-מגנטיים - שאותם ניתן לתרגם בחזרה לגלי קול. ביסודו של דבר - חרף הבדלים רבים - אותו עקרון עומד ביסוד שיחות הזום שמנהלות את העולם כיום: טכנולוגיה שמתרגמת את גלי האור והקול שנקלטים בחיישנים של המחשב לקוד דיגיטלי, שמועבר בעזרת גלים אלקטרו-מגנטיים למחשבים במקומות אחרים בעולם, ושמתרגמים את הקוד בחזרה לגלי אור וקול.

כיום, פיתוחים שונים בתחומי המציאות המדומה משתמשים אפילו ב"עור מלאכותי", שהלובשים אותו יכולים להרגיש "תחושות דיגיטליות". אך עד עתה, חוש הריח עמד בעוז בפני הניסיונות לעשות לו דיגיטציה – כלומר, לתרגם את המידע הכלול במבנה המולקולות של מקור הריח לקוד שניתן להעביר באמצעים דיגיטליים למכשיר אחר - על מנת שישחזר את הריח במקום אחר. אולם, מחקר חדש שנערך במעבדתו של פרופ' נעם סובל במכון ויצמן ומתפרסם היום (רביעי) בכתב העת המדעי, Nature מציג פריצה ראשונה בדרך לדיגיטציה של הריח ולהגשמת החלום ארוך השנים של חוקריו: בניית ה-Telesmell או "רח-רחוק".

תהליך ההרחה מורכב משלושה שלבים: מולקולות מסוימות נקשרות לקולטנים באף, קולטנים מתרגמים את האות הכימי לאות חשמלי שנפוץ ברחבי המוח, וזה יוצר תחושת ריח סובייקטיבית. המודל החישובי של סובל ועמיתיו מדלג על מה שקורה במוח, ומאפשר לנבא מהמבנה המולקולרי של שני חומרים עד כמה הריח שלהם, כפי שהוא נתפס על ידינו, דומה או שונה. הכלים שפיתחו מציגים לראשונה יכולת לנתח את המאפיינים הכימיים והפיזיקליים של המרכיבים בתערובת ריח מסוימת,

ובעזרת המידע הזה למצוא תערובות אחרות שייצרו תחושת ריח כה דומה לזו הראשונה, שלא ניתן להבדיל ביניהן – זאת מבלי להשתמש באף אחד מהמרכיבים של התערובת הראשונה.



**פרופ' נעם סובל במכון ויצמן. האתגר הגדול יותר הוא בבניית המיקרופון של הריחצילום: תומר אפלבוים**

- **מחקר ישראלי מערער את כל מה שידענו על פעולת חוש הריח**
- **מהו הריח הנורא ביותר בעולם? מתברר שהתשובה אינה פשוטה**

למחקר פורץ הדרך יכולות להיות השלכות על תחומים רבים. בין היתר, היכולת לקודד את הריח מציעה לראשונה אפשרות לחקור בצורה בהירה ומוגדרת יותר את האופן שבו ריחות שונים מיתרגמים לאותות חשמליים בתאי העצב אצל בני אדם שונים ובמקומות שונים בעולם. לגילוי גם השלכות חברתיות-משפטיות. כיום, תעשיית הבשמים ניצבת בפני בעיה לא פתירה. במשך שנים, סודיות הרכבם של הבשמים סיפקה הגנה להחברות מפני חיקויים. אך כיום, התפתחויות טכנולוגיות מאפשרות לעשות "הנדסה לאחור" של מרכיבי הבושם. בהיעדר סודיות, אפשרות נוספת היא להגן על רשימת המרכיבים של כל מוצר תחת חוקי זכויות

יוצרים. אך פנייה לנתיב זה יוצרת בעיה חדשה: החלפת מספר קטן של מרכיבים בתחליפים בעלי ריח דומה תאפשר למכור חיקויים כמעט זהים למקור, ללא הפרה של זכויות היוצרים.

## **היכולת לקודד את הריח מציעה לראשונה אפשרות לחקור בצורה בהירה ומוגדרת יותר את האופן שבו ריחות שונים מיתרגמים לאותות חשמליים בתאי העצב אצל בני אדם שונים ובמקומות שונים בעולם**

המחקר החדש מציג לראשונה כלי שמייצר מרחב אובייקטיבי של תחושות הריח שיוצרות תערובות ניחוח שונות. מרחב זה מאפשר גם לצייר רדיוס סביב כל נקודה המייצגת ריח ספציפי, כך שכל תערובת אחרת של חומרים שיוצרת ניחוח במרחק הקטן מהרדיוס - תריח כמו התערובת המקורית. אם המחקר יאומץ ויתורגם לכלים משפטיים, יצרני הבשמים יוכלו לראשונה לטעון לזכויות יוצרים על "מרחב הריח" של הבושם שלהם.

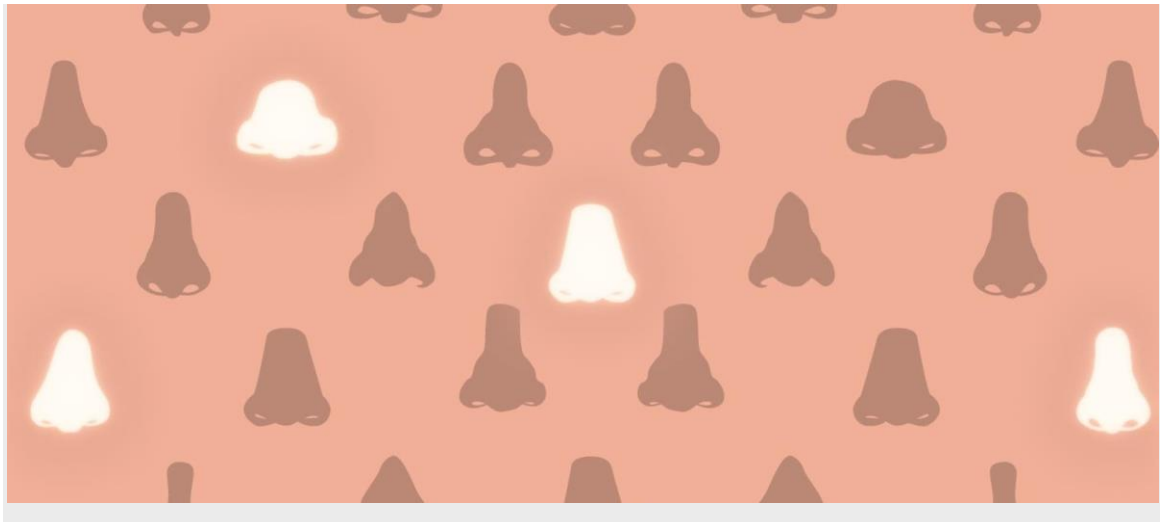
חלום הרח-רחוק, לעומת זאת, יצריך פריצות דרך טכנולוגיות נוספות. עד כה, המחקר הנוכחי פתר את השלב השני מבין שלושה שנדרשים כדי שלצד הטלוויזיה שלנו יוצב מכשיר שיאפשר להריח את הקפה ששותות הדמויות שעל המסך - הקידוד של חוש הריח. לפני יותר ממאה שנה, המרוץ של בל ומתחריו, שבו ניצח הראשון בהפרש של שעות ספורות, עסק בפיתוח ה"מיקרופון" שיאפשר לתרגם את הצלילים לאות אלקטרו-מגנטי וה"רמקול" שיהפוך את האות חזרה לצלילים (אצל בל, האתגר התמקד בשלב הראשון). כעת, האתגר של סובל ועמיתיו הוא בפיתוח המכשירים ש"יקליטו" את הריח בצורה מדויקת מספיק, ואלה שיתרגמו את האות חזרה לריחות.

המחקר, בהובלת אהרון רביע, שמסיים את לימודי הדוקטורט בשבועות הקרובים, יצא לדרך בניסיון להתמודד עם אתגר שהציב ממציא הטלפון בעצמו לפני יותר ממאה שנה. "ישנם סוגים רבים ושונים של ריחות, כל הדרך מריחות הסיגליות והוורדים ועד לאספטידה (חלתית: צמח תבלין שהשרף המיובש שלו משמש כתבלין במטבחים של הודו וסביבתה - א"ר). אולם עד שנוכל למדוד את הדומה והשונה בהם, לא יהיה מדע של ריח", כתב בל בשנת 1914.

חרף מאמצים רבים, האתגר שהציב בל נותר ללא מענה. רביע מספר כי במשך שנים רבות, מחקרי הריח והתפיסה התמקדו בריחות שנוצרים

במעבדה מסוג יחיד של מולקולות. אולם, בטבע לא קיימים ריחות שמורכבים ממולקולה יחידה, ולכן המוח האנושי לא מתוכנן לקודד ריחות שכאלה. ואכן, ההצלחה בהבנת הקשר שבין המבנה לריח התמקדה תמיד במולקולה היחידה שנבדקה. "הצליחו לעשות את מה ששאלו. אבל זה היה קשה מאוד להרחיב את זה הלאה ולהכליל ממולקולה אחת לאחרות."

השלב הבא שקירב את המחקר לעולם האמיתי, ושעליו מתבססת פריצת הדרך הנוכחית, היה מחקר שנערך בהובלת ד"ר קובי סניץ ממעבדתו של סובל, שהשתתף גם הוא במחקר הנוכחי. במאמר מ-2013, הציגו סניץ וסובל שיטה לנבא את הדמיון התפיסתי בין תערובות שונות של מולקולות שנוצרו במעבדה, לפי המבנה הכימי והפיזיקלי של המולקולות. התמקדות זו בדמיון בין ריחות, ולא בערך המוחלט של תיאורם, שמושפע מאוד משפה וניסיון, הוא שעומד בלב ההצלחה של גישת המדענים.



צילום kainam/iStockphoto via Getty Images: ואהרן ארליך

"הפסקנו לנסות להבין אם תערובת מולקולרית X מריחה כמו גויאבה ותערובת Y מריחה כמו תפוז", מתאר סובל. "זרקנו את המלים החוצה והעברנו את כל השאלה למרחב של דמיון - כמה תערובת א' דומה לתערובת ב'."

מאגר נתונים זה אפשר להם לחפש אילו מאפיינים פיזיקליים של המולקולות יוכלו לנבא דמיון ושוני אלה. במחקרים הקודמים, כמו גם בנוכחי, שאלת הדמיון בין ריחות נבדקה בדרכים שונות, אך בבסיסם התבקשו הנבדקים להריח שני ריחות ולדרג כמה הם דומים זה לזה. בעזרת המאגר, בנו החוקרים אלגוריתם שקושר בין 21 מאפיינים כימיים ופיזיקליים של החומרים בתערובות שונות, כמו הגודל, הצפיפות

והקוטביות של המולקולות, לבין הדמיון בתחושת הריח שיוצרות התערובות אצלנו. אולם, האלגוריתם שהוצג במאמר מ-2013 סבל ממגבלה משמעותית: הוא עבד רק על מה שהחוקרים מכנים "ריחות מעבדה" – ריחות שבהם העוצמה הנתפסת של כל אחד מהמרכיבים בתערובת היא שווה.

כל מרכיב בתערובת שיוצרת ריח מתואר בשני משתנים: סוג הריח שהוא יוצר, והעוצמה הנתפסת שלו. אפשר לדמות זאת לבישול מאכל שבו מוסיפים תבלינים כמו מלח, פלפל שחור, קינמון, הל, ציפורן וסוכר. מאכל שתוכנס לתוכו כמות זהה של כל אחד מהתבלינים הללו, יהיה שונה מאוד בטעמו ממאכל שבו יש כמות שונה מכל תבלין. וכפי שהסיכוי שהמאכל הראשון יהיה טעים אינו גבוה, כך גם בטבע לא ניתן למצוא "ריחות מעבדה" שבהם העוצמה הנתפסת של כל אחד מרכיבי הריח היא זהה.

"רצינו לעבור לעולם האמיתי, ולכן, המאמץ הראשון שאהרון עשה היה לייצר מקדם מתמטי שפותר את הבעיה הזו", מספר סובל. לצורך כך, ערכו החוקרים סדרה ארוכה של ניסויי השוואות ריח, ובכל פעם שינו את העוצמה היחסית של המרכיבים השונים בתערובות. מאגר נתונים השוואתיים זה אפשר להם לייצר "מקדם עוצמה" שמאפשר לשקלל את העוצמה הנתפשת של כל מרכיב באלגוריתם שלהם. "כל עוד אנחנו יודעים את העוצמה הנתפסת של כל חלק", מוסיף סובל.

### **עד כה, המחקר הנוכחי פתר את השלב השני מבין שלושה שנדרשים כדי שלצד הטלויזיה שלנו יוצב מכשיר שיאפשר להריח את הקפה ששותות הדמויות שעל המסך**

משמעות הדבר היא שכדי לבנות מודל של הריח שיוצרת תערובת שבה 15 מרכיבים, צריך לדעת את מידת העוצמה שבה כל מרכיב נחוה בנפרד. "יש לנו דרך לחשב את זה, אבל היא לא תמיד עובדת", מודה סובל. לכן, במהלך המחקר, החוקרים בחנו על נבדקים את המרכיבים של תערובות שונות וביקשו מהם לדרג את העוצמה של כל מרכיב בסולם של אחד עד מאה. נתונים אלה, יחד עם מקדם העוצמה שלהם, אפשר להם לנבא בצורה מדויקת את מידת הדמיון בין שתי תערובות של ריח אמיתי, שבהן לכל מרכיב יש עוצמה שונה.

תיאורטית, ניתן לערוך בדיקות עוצמה שכאלה לכל תערובת שאותה רוצים לקודד. אך חלק ניכר מהעבודה הזו נעשה כבר במחקרים קודמים. סובל מספר כי מאגרי מידע מדעיים קיימים, כוללים מידע על העוצמה

הנתפסת של אלפי מולקולות, "כל מה שבערך רלוונטי לעולם הריח", הוא מתאר .

המידע הכלול במאמרים הוא ברזולוציה נמוכה יותר מזו של הניסויים שנערכו במעבדה: דירוג "חזק, בינוני, חלש" במקום סולם של אחד עד מאה. "אבל מתברר שזה מספיק טוב לנו לאלגוריתם שלנו", מוסיף החוקר.

לדברי סובל, "ברגע שיצרנו את המקדם, פנינו לראות אם אנחנו יכולים לענות לאתגר שבל הציב לפני מאה שנה". לצורך כך, החוקרים שיתפו פעולה עם הבשם כריסטוף לודמיאל, שחתום גם הוא על המאמר. "רב אמן, כנראה הבולט בעולם", מתאר סובל. לודמיאל, שהיה הבשם הראשי של קונגלומרט הריח, IFF אחראי לריחות של בשמים של טומי הילפיגר, ראלף לורן ("פולו בלו"), אסתי לאודר ורבים אחרים. עבור סובל ועמיתיו, הוא יצר שלוש תערובות ריח – ורד, סיגליות ואספטידה, אותם הניחוחות בחידה של אלכסנדר בל.

סובל ועמיתיו ניתחו את 21 המאפיינים הכימיים והפיזיקליים של המולקולות השונות בשלוש תערובות הריח ששלח להם הבשם מניו יורק. הם בחנו את העוצמה הנתפסת של כל אחד מהמרכיבים, והזינו הכל לאלגוריתם שלהם, וכך ענו על השאלה של בל – מדדו את הדומה והשונה בין שלושת הריחות "ויצרו מדע ריח". לאחר שקיבלו את התשובה – מספר שנמדד ביחידות שנקראות רדיאנים - הם הביאו נבדקים נוספים וביקשו מהם לראשונה לדרג את הדומה והשונה בין שלושת הריחות, ואת התוצאות שלהם השוו לתוצאות האלגוריתם. "ופגענו די בול", מעיד סובל. כלומר, הם ניבאו בדיוק את הדמיון התפיסתי בין ורד לסיגליות, ורד לאספטידה, וסיגליות לאספטידה (ספוילר: ורד וסיגליות דומים זה לזה, ושניהם שונים מאוד מאספטידה).

## **פרופ' סובל במכון ויצמן. המודל החישובי שלו ושל עמיתיו מדלג על מה שקורה במוחצילום: תומר אפלבו**

אחרי ההצלחה עם שלושת הריחות של בל, סובל ושותפיו פנו לצעד הבא. "אם אנחנו יודעים לנבא כמה ריח הוא דומה או שונה לריח אחר, זה אומר שאנחנו צריכים לדעת כמה קל או קשה יהיה לך להפריד בין ריחות. כי אם הם נורא דומים, זה יהיה קשה, אם הם נורא שונים, זה יהיה קל", הוא מספר.

כדי לבחון את עוצמת האלגוריתם שלהם, הם פנו למאגר נתונים נוסף שנאסף בידי קבוצת מחקר בניו יורק וכלל מאות תוצאות מ"ניסוי משולש": נתנו לנבדקים שלושה ריחות, שמתוכם שניים זהים ואחד שונה, והם צריכים להגיד מה השונה. הם הפעילו את הכלים שלהם על המבנה המולקולרי של הריחות שנבדקו במחקר מניו יורק, והשוו את התוצאות לתוצאות של אותו מחקר. "ואת זה עשינו ממש ממש טוב", אומר סובל, "זוה נותן לך תחושה של כנות, כי לא אנחנו אספנו את הדאטה, לא אנחנו ישבנו בחדר עם האנשים."

"זה עשה לנו את התיאבון", מוסיף רביע. כלומר, התיאבון להתמודד עם אתגר משמעותי נוסף במחקר של תפיסת החושים: מדד שבוחן מה הוא ההבדל הקטן ביותר שניתן לשים לב אליו. "זו בעצם הרזולוציה שלך", מסביר סובל – מה הוא השינוי הקטן ביותר שניתן לעשות בצליל, צבע, תחושה, טעם או ריח ושעדיין נרגיש בהבדל בין הישן לחדש. "כי הרי יש שינויים עוד יותר קטנים שלא נשים לב אליהם", הוא מוסיף, "עכשיו אנחנו יכולים לתת מספר לדמיון בין ריחות, ויכולים לבדוק מה המספר הקטן ביותר שמוביל לשינוי נתפס".

כך, בסדרה של ניסויים, הם בחנו את הדמיון וההבדל בין מספר רב של תערובות ריח, כדי לגלות מה המרחק המינימלי שנדרש כדי שניתן יהיה להבדיל בין שני ריחות. התוצאה היתה טווח ברדיאנים (0.0125), שתחתיו כמעט שלא ניתן להבדיל בין ריחות.

"יש תופעה בראייה שמראה בצורה הכי משכנעת שאנחנו מבינים את הקשר בין המבנה הפיזיקלי של הגירוי (אור, שנמדד באורך גל - א"ר) לתפיסה (צבע - א"ר), זה התופעה הזו שנקראת מטאמרים", מסביר סובל.

הצבעים שאנו תופסים הם אור באורכי גל שונים שמגיע לקולטנים שבעיניים. הבנת הקשר בין המבנה לתפיסה מאפשרת לייצר שתי "תערובות" אור שכוללות אורכי גל שונים לחלוטין זה מזה, אך ששתיהן ייתפסו על ידינו באותו אופן. "תערובות" אלה של אור באורכי גל שונים נקראות מטאמרים של צבע. אפשר לדמות אותם ליצירת גוון של סגול-לילך בעזרת תערובת של אדום ותכלת, או ורוד וכחול. ההבנה הזו היא שמאפשרת בסופו של יום את פעולת המסכים שבהם אנו בוהים.

זיהוי המרחק המינימלי שתחתיו לא מבדילים בין ריחות שונים, אפשר לחוקרים להתחיל לתכנן תערובות ריח שלא ניתן להבדיל ביניהן, אף שהן עשויות כל אחת ממרכיבים שונים לחלוטין. בעזרת האלגוריתם, הם יצרו כ-30 זוגות של תערובות ריח שלפי החישוב לא ניתן להבדיל ביניהם,

ובחנו אותן על נבדקים. "גילינו שריחות רבים, למרות שחשבנו שלא יוכלו להבדיל ביניהם בכלל, עדיין אפשר. קשה. הן דומות. אבל אפשר", משחזר סובל. "יש שם רעש, שאנחנו לא יודעים להסביר אותו. בינתיים". אולם, שלושה מתוך הזוגות שלהם נמצאו ככאלה שלא ניתן להבדיל ביניהם כלל.

את הזוג המבטיח ביותר הם בדקו שוב לעומק, והראו כי 85% מהנבדקים לא מצליחים בכלל להבחין בהבדל. 15% היו יכולים, גם אם בקושי רב. 85% הצלחה הם הישג יפה, אך הוא יפה עוד יותר כשמביאים בחשבון שיש שונות דומה באופן שבו בני אדם תופסים גם צבעים וקולות, כפי שמחקרים קודמים במטאמרים של צבע וקול הראו.



צילום kainam/iStockphoto via Getty Images ואהרן ארליך

"מחד, אנחנו הרבה יותר דומים זה לזה בריח משחושבים, ומאידך אנחנו הרבה יותר שונים זה מזה בצליל וצבע משחושבים", אומר החוקר. לכן, סובל ושותפיו למחקר משוכנעים שאם השונות בין בני אדם לא מפריעה למכור מסכים ורמקולים, היא לא אמורה להפריע למכור את הרח-רחוק שלהם – אם הם יפתרו את האתגרים הטכנולוגיים הנוספים שניצבים בדרכם: לפתח את המיקרופון והרמקול של הריחות.

סובל אומר שבמעבדה שלו עמלים כעת על מציאת פתרונות לשני האתגרים. הבעיה בבניית מכשיר המפיק ריחות היא שמידת הדיוק שלו תלויה במלאי המרכיבים – מולקולות הריח – שיש במכשיר. לצורך כך, הם יצרו מודל שמאפשר בעזרת 200 מולקולות ליצור ריחות קרובים למדי לכל ריח רצוי. "כלומר זה לא יהיה מצב שתצא החוצה, תריח את הוורד הספציפי הזה, אני אייצר לך את זה במכונה ואתה תגיד זה בול זה", אומר



החוקר. "אבל אני אוציא לך ריח ואגיד 'מה אתה אומר על הוורד הזה', אתה תגיד לי 'טוב זרמתי איתך.'"

האתגר הגדול יותר, אומר סובל, הוא בבניית המיקרופון של הריח – החיישן שמנתח את המבנה המולקולרי של מרכיבי ריח מסוים ומפיק מהם את המשתנים הדרושים לאלגוריתם. במעבדה של סובל בודקים אפיקים שונים לפתרון בעיה זו, רובם סביב מכשיר שנקרא אף מלאכותי. אולם הוא לא יכול להתחייב שהוא ימצא פתרון. לדבריו, מפיק הריח זו רק בעיה של כסף. "במעבדה בנינו אחד של חמש מולקולות. אבל תן לי שלושה מיליון דולר, ואבנה לך אחד של אלף", הוא אומר. "בחיישן, זה לא עד כדי כך פשוט. אני לא יודע איך לעשות את זה."

"מנקודת מבט מדעית, נעם קרוב מאוד לפתרון החלק המרכזי", אומרת פרופ' לזלי וושול (Voshall) ממכון רוקפלר בניו יורק ביחס לשלושת מרכיבי מכונת הריח-רחוק שסובל רוצה לבנות. מעבדתה של וושול עוסקת גם היא רבות בניסיון להבין את הקשר בין מבנה מולקולות הריח לתפישה שהן יוצרות. "הניבויים שלו טובים. הם טובים יותר מניבויים קודמים, כולל אלה שלי. הם חזית הטכנולוגיה בשלב זה", מוסיפה החוקרת. "אבל אני לא הולכת לקנות את המכשיר שלו כי הוא יהיה גרסה גרועה של הריח-רחוק."

וושול מדמה את המכשיר שניתן לבנות עם האלגוריתמים של סובל לטלוויזיות הראשונות. אם כי לדבריה, האיכות צפויה להיות טובה עוד פחות משל הטלוויזיות בשנות ה-50. "אבל כרגע אין לנו כלום. הוא הגיע מכלום למשהו מעניין, אבל אין לו HD."

החלק המסעיר ביותר במחקר, אומרת וושול, הוא המטאמרים של ריח שסובל יצר לראשונה. "מדהים שהוא היה מסוגל לעשות את זה. בראייה, אפשר לערבב צבעים שונים ולקבל את אותה תפיסה של צהוב. זה היה אחד הגילויים החשובים שלימדו אותנו איך התאים השונים ברשתית מעבדים מידע כדי ליצור צהוב, וזה הבהיר שאנחנו מבינים איך ראיית צבע עובדת", היא מתארת בהתלהבות בשיחת זום מניו יורק. "הוא יצר את המרקחות הללו מתערובות שונות לחלוטין שהמוח תופס כזהות. אני לא יודעת, אף אחד לא יודע מה זה מלמד אותנו, אבל ההנחה היתה שזה בלתי אפשרי."

החוקרת האמריקאית מדגישה כי יש משמעות רבה לכך "שניתן לרמות את מערכת הריח". מה המשמעות הזו? זו השאלה הגדולה. וושול משוכנעת שפריצת הדרך של סובל תאפשר לקדם את מדע הריח לשלב הבא, היא רק לא יודעת איך הוא ייראה. "העובדה שהוא עשה זאת

מצביעה על כך שאנחנו יכולים לעבור לשלב הבא. אבל השלב הבא  
מעורפל", היא מסכמת, "במידה רבה, המדע כולו הוא סדרה של דברים  
מעורפלים שרואים מרחוק. אבל בגלל שאנו רואים אותם, אנו יכולים  
לצעוד לעברם. ואז אנחנו יכולים להביט אחורה, ולהבין."