

## תינוקות בני חצי שנה יכולים לנתח נתונים סטטיסטיים? מתברר שכן

מחקרים מגלים כי תינוקות מסוגלים להעריך הסתברויות ולהגיע להכללות רציונליות — ברמה ששום מחשב לא מסוגל

סמדר רייספלד, איור: יעל בוגן 18.12.2019 18:05

מיכאל הביט ממושכות בבחורה שעמדה מולו. היא עצמה את עיניה והכניסה את ידה אל התיבה השקופה, שהיו בה הרבה כדורי פינג פונג לבנים ומעט אדומים. היא שלתה כדור אדום והניחה אותו על השולחן. אחר כך הוציאה עוד כדור, ואז עוד אחד. בסך הכל היא שלפה חמישה כדורים, רק אחד מהם היה לבן. מיכאל היה מופתע. משהו כאן לא סביר. הוא היה מצפה שההפך הוא שיקרה — שהבחורה תוציא הרבה כדורים לבנים ומעט אדומים. זה ברור, גם אנחנו היינו מצפים לכך, אבל אנחנו לא בני שישה חודשים.

תאמרו גאון, תינוק-פלא. ובכן לא. מיכאל, מתברר, הוא תינוק רגיל — כמוהו מתנהגים כל התינוקות בגיל הזה — ואם כך אולי יש לומר שכל התינוקות הם סוג של פלא, כי מה להם ולחישובי הסתברות? מאיפה יש לאדם הקטנטן, הגולמי הזה, שעדיין אינו יודע אפילו להגות "אבא", לא כל שכן "כדור", מושג למה לצפות מבחינה סטטיסטית ולכן ממה להיות מופתע?

"עד לא כל כך מזמן אנשים חשבו שתינוקות הם יצורים אגוצנטריים, גחמנים וחסרי כל היגיון", אומרת פרופ' פיי קסו מאוניברסיטת קליפורניה בברקלי, שעשתה לראשונה את ניסוי כדורי הפינג פונג. היא הזמינה למעבדה תינוקות, שצפו באדם שבמקרה אחד הוציא דגימה שתאמה את הציפייה ההסתברותית (הרבה כדורים לבנים ומעט אדומים מתוך תיבה שהכילה רוב של לבנים), ובמקרה אחר דגימה שסתרה את המצופה (הרבה כדורים אדומים ומעט לבנים). המחזה הראשון הותיר את התינוקות אדישים; מהשני הם היו מופתעים. קסו הסיקה, שלתינוקות יש אינטואיציה סטטיסטית בסיסית, ופתחה תחום מחקר חדש שבוחן כיצד היא מאפשרת לתינוק לבצע הקשים ולהסיק מסקנות על העולם.

"כולנו צריכים לתפקד בתנאים מסוימים של חוסר ודאות", היא אומרת. "אנחנו קולטים מידע חדש, וכדי להבין מי נגד מי, אנחנו מפעילים מגוון מנגנוני למידה של קישור אסוציאטיבי, הסקה לוגית, הסקה אינדוקטיבית (מהפרט אל הכלל) ועוד. כשתינוק בא לעולם — מה יש באמתחתו כדי להתמודד עם אינספור אי הוודאויות שהוא הושלך לתוכן? הפסיכולוג וויליאם ג'יימס כינה אותו 'בלבול פורח ממלמל'. הפילוסוף ז'אן-ז'אק רוסו תיאר אותו כ'אידיוט מושלם'. למעשה, ככל שאנחנו חוקרים אותו יותר, אנחנו מגלים יצור הגיוני ומתוחכם להפליא. מתברר שגם לתינוקות יש מנגנוני למידה רציונליים, סדורים וקונסטרוקטיביים. למשל, אינטואיציה סטטיסטית".

לפני שניכנס לשאלה מה לתינוקות ולאינטואיציה סטטיסטית, ראוי לשאול, איך בכלל אפשר לדעת אילו אינטואיציות, מחשבות וציפיות יש להם, בייחוד לאור העובדה שהם לא כל כך נוטים לחלוק איתנו את מחשבותיהם. העובדה שהם מוגבלים גם ביכולת להבין הוראות וגם ברמת הקשב, הופכת אותם למושאי מחקר בעייתיים במיוחד. ואכן, עד לפני כמה עשורים, מחקר של תינוקות (לפי ההגדרה המקובלת בתחום — מרגע הלידה עד שנתיים) נחשב טרה אינקוגניטה, תחום עלום ומסתורי שאין דרך לגלותו.

באמצע שנות ה-80 של המאה שעברה, פותחה מערכת ניסוי מתאימה, ואז נפתחה הדרך לשלל ממצאים ותובנות על הנפש התינוקית. המערכת מתבססת על ההבחנה, שלפיה תינוק מסתכל על תופעה מפתיעה, שסותרת את הציפיות שלו, במשך זמן ארוך יחסית לתופעה שתואמת את ציפיותיו. למשל, בובה שנעלמת ממקום אחד וצצה במקום אחר, בלי שעשתה את הדרך בין שני המקומות, תרתק אליה את התינוק, והזמן שהוא יביט בה ישקף את הבלבול, ההפתעה, תחושת ה"מה לעזאזל קרה שם" שלו. כדי למדוד את "זמן ההסתכלות", משתמשים ב"עוקב מבט", אותו מכשיר שמתחקה אחרי מבטם של חולי ALS (ומזהה על איזו אות שמופיעה על צג המחשב שמולם הם מתמקדים, בניסיון לאיית את המילים שברצונם לבטא), והוא הפך להיות כלי מרכזי במעבדות שחוקרות תינוקות. בעזרת השיטה הזאת גילו קסו ועמיתיה, שתינוקות מסתכלים זמן ארוך בהרבה על דגימה שאינה תואמת את הציפייה ההסתברותית יחסית לדגימה הסבירה. המסקנה היתה שלתינוקות יש ציפיות סטטיסטיות על העולם ושהם יכולים לזהות מתי הציפיות האלה מתמלאות ומתי הן מופרות.

**ההנחה שהאבולוציה לא הכשירה אותנו להתפתח להיות ניט סילבר דווקא (המקבילה האמריקאית של מינה צמח), נשאלת השאלה, לשם מה זה טוב? מה אפשר לעשות עם יכולת כזאת של הבחנה סטטיסטית?**

"התהייה איך זה שתינוקות לומדים כל כך מהר היא אחת השאלות המרכזיות בפסיכולוגיה קוגניטיבית ובשנים האחרונות גם במדעי המחשב", אומרת קסו. "על אף ההישגים המרשימים במדעי המחשב בתחומים של 'רשתות נוירונליות' ו'למידת מכונה', שמנסים ללמד מחשבים לזהות חפצים ובני אדם ולהבין שפה טבעית, אין אף מחשב שמגיע ליכולת הלימוד הפנומנלית של תינוק. כדי שמחשב יוכל, למשל, להבדיל בין כלבים לחתולים, הוא צריך 'לראות' או 'לשמע' מיליוני דוגמאות, שמתוכן הוא יגזור את הדומה והשונה, את המקובל ואת יוצא הדופן. תינוק, לעומת זאת, לומד לזהות, להכליל ולנבא תופעות על סמך מספר קטן להפליא של דוגמאות שהוא קולט מהסביבה, ואנחנו טוענים שהיכולת הזאת מתאפשרת במידה רבה בגלל היותם סטטיסטיקאים אינטואיטיביים. העובדה שהם יודעים לזהות את אופי הדגימה, להעריך הסתברויות ולהגיע מהן להכללות רציונליות היא כלי חשוב באסטרטגיית הלמידה שלהם, כלומר שלנו כבני אדם".

זה נשמע קצת מוזר, שלא לומר מופרך, לייחס לתינוקות רכים מחשבות מושכלות על "אופי הדגימה", "הבדלי הסתברויות" ו"הכללה רציונלית", אבל ניסויים נוספים שנעשו בהקשר זה יכולים אולי לתמוך בטענה היומרתית הזאת. ניסוי יפה במיוחד נערך באוניברסיטת MIT, על ידי חוקרות אחרות, והוא גם נותן מושג לגבי השימוש שתינוקות יכולים לעשות באינטואיציה הסטטיסטית הזאת. שיטת המחקר הפעם לא היתה זמן ההסתכלות של התינוק, אלא התנהגותו והבחירות שהוא עשה.

משתתפי הניסוי היו תינוקות בני כ-15 חודשים שצפו בתיבה שקופה, שהכילה כדורי גומי כחולים וכדורי גומי צהובים בעלי צורה שונה במקצת. מחצית מהתינוקות צפו בתיבה שהיה בה רוב גדול של כדורים כחולים (כ-80%), והמחצית השנייה נחשפה למצב ההפוך: רוב הכדורים היו צהובים ומיעוטם כחולים. בשני המקרים הנסיינית הוציאה מהתיבה בזה אחר זה שלושה כדורים כחולים, שהשמיעו צפצוף כשהיא לחצה עליהם, ואז נתנה לתינוק כדור צהוב. מה יעשה התינוק עם הכדור הצהוב? האם הוא ילחץ עליו בציפייה לשמוע צפצוף?

התינוקות התפלגו מבחינת ההתנהגות, בהתאם לתיבה שבה צפו. תינוקות שצפו בנסיינית שהוציאה את שלושת הכדורים הכחולים מהתיבה שכחולים היוו בה את הרוב, נטו ללחוץ על הכדור הצהוב כדי לשמוע צפצוף. לעומת זה, אלה שצפו בהוצאה של כדורים כחולים מתיבה שהם היו בה מיעוט, שיחקו עם הכדור הצהוב אך לא לחצו עליו.

ההסבר להבדל טמון במידע שהתינוקות הפיקו מהדגימות השונות: הוצאה של שלושה כדורים כחולים מתיבה שהם מהווים בה רוב, איננה עניין גדול. זו הדגימה האקראית הסבירה, שמתקבלת אפילו בעיניים עצומות. הכדורים אמנם משמיעים צפצוף כשלוחצים עליהם, אבל אם הם נבחרו באקראי, למה לא להניח שכל הכדורים בתיבה, גם הצהובים, מצפצפים כשלוחצים עליהם? לכן, תינוקות שצפו

במצב הזה נטו ללחוץ על הכדור הצהוב בציפייה שיצפץ. הדגימה השנייה שונה לגמרי: הוצאה של שלושה כדורים כחולים מתיבה שמכילה בעיקר צהובים, היא "צירוף מקרים חשוד", שמרמז על כך שזו איננה דגימה אקראית אלא תוצאה של בחירה. במקרה כזה, התינוק שואל את עצמו למה נבחרו דווקא הכדורים האלה. אולי מפני שהם מצפצפים! אם כך, אין מה לצפות שגם הכדורים הצהובים יצפצפו, ולכן התינוק אינו לוחץ על הכדור הצהוב שברשותו. הוא פשוט משחק בו. מובן, שהתינוק אינו מנהל עם עצמו דיון מעמיק בשידור חי על אופי המדגם, מידת האקראיות שלו, סבירות ההכללה והמסקנות שאפשר להסיק ממנה על תוצאות האמת. אסטרטגיות חישוביות כאלה מתרחשות בחטף וללא צל של מודעות. ובכל זאת, יש להודות שהמהלך הפרשני המפותל הזה, אף שהוא מסביר את התוצאות, עלול לעורר אי נחת מסוים. ונשאלת השאלה, כיצד אפשר לדעת שהלוגיקה המורכבת הזאת אינה מבטאת פרשנות יתר, אלא אסטרטגיה ממשית שמתרחשת במוח התינוקי?

אחת הדרכים לעשות זאת היא לתכנן ניסוי אחר באותה מערכת, לנבא מראש את תוצאותיו לפי אותה הפרשנות, ולבדוק אם הניבוי מתממש. אפשר לשאול, למשל, מה יקרה אם הנסיינית תוציא מהתיבה, שמכילה רוב של כדורים צהובים, רק כדור כחול אחד? גם הפעם הכדור הכחול יצפץ כשהיא תלחץ עליו, אבל האם גם הפעם — כמו כאשר היא הוציאה שלושה כדורים כחולים — התינוק לא ילחץ על הכדור הצהוב שלו (מתוך הנחה שרק הכחולים מצפצפים)? לפי ההיגיון הסטטיסטי, הוצאה של כדור אחד אינה מספקת הרבה מידע לגבי האקראיות או אי האקראיות של הדגימה, ומכאן שבניסוי הזה התינוק לא יוכל להסיק שהכדור הכחול נבחר מפני שהוא מצפץ. הפעם אין לו סיבה להניח שהכחולים מצפצפים והצהובים לא, ולכן אנחנו צופים שהפעם הוא ילחץ על הכדור הצהוב. זה בדיוק מה שקרה. "התינוקות השתמשו באינטואיציה סטטיסטית, כדי לעשות את ההכללה ההגיונית", אומרת קסו. "במושגים של סטטיסטיקאים, הם ידעו להעריך את אופי הדגימה: הם זיהו שהכדור הכחול הבודד הוא 'דגימה חלשה', כלומר כזאת שנעשתה מכלל הכדורים, לעומת שלושה כדורים כחולים, שמהווים 'דגימה חזקה', כזאת שנעשתה ספציפית מתוך תת קבוצה — רק מהכדורים הכחולים. הדגימה הראשונה מזמינה הכללה רחבה (כל הכדורים מצפצפים), והשנייה מאפשרת הכללה ממוקדת יותר (רק הכדורים הכחולים מצפצפים)".

**כלומר, על ידי הבנת היחסים בין הדגימה לאוכלוסייה, הם יכולים להסיק מסקנות על העולם.**

**במקרה הזה על תכונותיהם של הכדורים — מי מצפץ ומי לא.**

"בדיוק. זה מנגנון שמאפשר להם, על בסיס מעט מאוד נתונים, להקיש מהפרט אל הכלל וכך להגיע להכללות על העולם הפיזיקלי אבל גם על העולם החברתי-פסיכולוגי שהם חיים בו".

**מה לאינטואיציה סטטיסטית ולעולם החברתי-פסיכולוגי?**

"בתוך העולם הפיזיקלי חיים גם בני אדם, שהתינוק תלוי בהם למחייתו, ולאלה יש כוונות, מטרות והעדפות שחשוב לפענח. לתינוק יש כל מיני דרכים לעשות זאת — המובנות מאליהן הן 'קריאה' של הבעות הפנים או שמיעת דיבור מפורש. אבל אפשר גם להשתמש באינטואיציה הסטטיסטית. הפרה של הציפייה הסטטיסטית עשויה לשמש סימן למניע פסיכולוגי או למטרות של הזולת, ואפילו תינוקות בני 10 חודשים יודעים את זה. כאשר הראו לתינוקות כאלה אישה, שבשלב ראשון הוציאה רצף של כדורים כחולים מתיבה שהכחולים היו בה מיעוט, אך בשלב שני בחרה קערה מלאה בכדורים אדומים ולא קערה עם כחולים, הם היו מופתעים (הביטו זמן ארוך יותר): אי הסבירות הסטטיסטית בשלב הראשון הציעה שהאישה מעדיפה כדורים כחולים, ואם כך למה בחרה בשלב השני אדומים? הניסוי הזה מאלף כי הוא מראה, שהתינוק יכול להבין את ההעדפה של הזולת — אפשר לומר, את מצבו הנפשי — מתוך ההפרה של ההסתברות המצופה, והוא גם מדגים את יכולתו המופלאה של התינוק לעדכן את ציפיותיו. בהתחלה היתה לו ציפייה שהאישה תוציא מדגם אקראי. כשהציפייה הזאת הופרה על ידי המדגם הלא סביר שהיא הוציאה, הוא למד משהו על העדפתה ועידכן את הציפייה שלו. לכן, כשגם הציפייה החדשה הופרה, הוא היה מופתע. היכולת הזאת של התינוק לעדכן כל הזמן את הידע

שלו, ולכן את הציפיות שלו מהעולם, היא זו שאחראית ליעילות הלימוד שלו. כשהוא עושה אינטגרציה של הידע החדש עם הידע הקיים, כשהוא מעדכן את המושגים, התפיסות והאמונות שלו, הוא בונה מודל מדויק יותר של העולם".

**שמתי לב, שהגיל המינימלי של המשתתפים בניסויים השונים שקראתי עליהם הוא שישה חודשים. מה קורה לפני כן?**

"עשינו את הניסוי עם דגימת כדורי הפינג פונג הלא סבירה עם בני ארבעה חודשים, והם לא התנהגו כמו הגדולים יותר: הם לא היו מופתעים מהפרת הציפייה ההסתברותית".

**אולי פשוט כי אי אפשר לגייס את הקשב של תינוקות כל כך צעירים?**

"אני חושבת שדווקא הצלחנו לגייס את הקשב שלהם, אבל נראה שאין להם עדיין את האינטואיציה ההסתברותית הזאת".

**בתחילת הראיון הופתעתי, שלתינוקות יש בכלל ציפיות הסתברויות. עכשיו אני כבר מופתעת שלתינוקות בני ארבעה חודשים אין עדיין ציפיות כאלה. אפשר לומר, שעידכנתי את התפיסה שלי לגבי תינוקות והסקתי, באינדוקציה לאחור, שאנחנו נולדים עם ציפיות מסוימות, בסיסיות, על העולם. אז זה לא נכון?**

"זה עדיין נכון. אני סבורה שתינוק מתחיל את חייו עם מערכת ייצוגים בסיסיים ועם ציפיות ראשוניות מסוימות. הייצוגים הראשונים מתייחסים לזיהוי עצמים ואנשים, לתפיסה מספרית, ליכולת ניווט וליכולת להבין סיבתיות, והלמידה הראשונית מתחילה מהם. האינטואיציה הסטטיסטית מתפתחת עם הגיל. בני עשרה חודשים יכולים להסיק מסקנות מורכבות יותר מנתונים הסתברותיים — על העולם הפיזי והאנושי — מאשר בני שישה חודשים, ובני 15 חודשים עושים זאת טוב עוד יותר. היכולת הזאת ממשיכה להשתכלל אצל פעוטות ואצל ילדים".

**ומה אצל בעלי החיים?**

"סביר להניח, שהייצוגים המולדים, שעוצבו במשך מיליוני שנה של אבולוציה, קיימים גם אצל בעלי החיים. לגבי הרגישות הסטטיסטית, ניסויים שנעשו עם קופי אדם (בעזרת אותה שיטת מחקר שבודקת את זמן ההסתכלות כמדד לציפייה ולהפרתה) מגלים, שגם הם מופתעים כשהם נתקלים בדגימה שמפרה את הציפייה הסבירה. הם רגישים גם בכיוון ההפוך: כאשר מוציאים מתיבה אטומה בעיקר כדורים אדומים, הקופים מצפים למצוא בה יותר כדורים אדומים מאשר לבנים, ונראה שהם גם יודעים להסיק מכך מסקנות".

**אני תוהה אם אפשר להחליף את המונח "רגישות סטטיסטית" ב"יכולת הערכה מספרית" (numerosity), ומכל מקום מעניין שבעלי חיים ותינוקות ניחנו בתכונה הזאת ומשתמשים בה להסקת מסקנות על העולם, ואילו אנחנו, המבוגרים, די גרועים בה. כהנמן וטברסקי הראו זאת שוב ושוב, למשל בניסוי המפורסם הבא: מציגים לנבדקים את לינדה — בת 31, רווקה, ישירה ומבריקה. יש לה תואר ראשון בפילוסופיה, וכסטודנטית היתה פעילה חברתית והשתתפה בהפגנות נגד נשק גרעיני. עכשיו שואלים את הנבדקים מה סביר יותר: שלינדה היא פקידה בבנק או שהיא פקידה בבנק ופעילה פמיניסטית. רוב האנשים בוחרים באפשרות השנייה, למרות שברור שהאפשרות הראשונה הרבה יותר סבירה כי היא כללית יותר.**

"זה נכון. מבוגרים אכן לא משתמשים היטב במידע סטטיסטי, ולכן כשיצאנו בהתחלה עם תוצאות הניסויים הראשונים על התינוקות, זה עורר פליאה בקרב מדענים".

**מתי מתרחשת ההידרדרות הזאת?**

"ישנו ניסוי קלאסי, שבו מציגים לך קבוצה של 100 אנשים — 70 מתוכם עורכי דין ו-30 מהנדסים. עכשיו בוחרים מישהו אקראי מהקבוצה, אומרים לך שהוא ישר וחסר חוש הומור, ואז שואלים אותך אם הוא עורך דין או מהנדס. מה תגידי? אם את כמו הרוב המוחלט של האנשים, תתעלמי מהמידע הסטטיסטי שנתתי לך, שלפיו יש סיכוי הרבה יותר גבוה שהאיש הוא עורך דין (70 לעומת 30), ותגידי

שהוא מהנדס בגלל תיאור האופי שלו. לאחרונה נעשה ניסוי דומה, שהותאם לילדים: סיפרו להם על קבוצה של הרבה בנות ומעט בנים, ואמרו שאחד מהם אוהב לשחק במכוניות. האם זה בן או בת, שאלו. בני השש התעלמו מהנתון הסטטיסטי והתייחסו לסטריאוטיפ (בנים אוהבים לשחק במכוניות), ממש כמו מבוגרים. בני הארבע, לעומת זאת, נטו להסיק את זהותו של האלמוני על פי הסבירות הסטטיסטית".

### **אולי בני הארבע בכלל לא מחזיקים בסטריאוטיפ הרלוונטי?**

"כל הילדים שנבדקו, בכל הגילים, החזיקו בסטריאוטיפ הזה. המסקנה היא, שההטיות הקוגניטיביות האלה שמתעלמות מהנתונים הסטטיסטיים, מתפתחות עם הגיל".

### **מה קורה, אם כן, במהלך החיים, שמביא לירידה באינטואיציה הסטטיסטית?**

"למבוגרים יש הרבה יותר ידע מלתינוקות, ולכן כשהם נתקלים במידע חדש, יותר מסובך לשלב אותו בידע הקודם. הציפיות שלהם מעוגנות יותר ומתבססות על מנגנוני חשיבה נוספים — למשל, 'כללי אצבע' שונים — ולכן הן מתעדכנות הרבה פחות. תינוקות, לעומת זאת, מעדכנים במהירות את הציפיות ואת התפיסות שלהם על העולם, וזה מה שמאפשר את קצב הלימוד האדיר שלהם".  
זה מביא אותנו לתפקיד מעניין נוסף של האינטואיציה הסטטיסטית: לא רק שהיא משמשת את התינוק לעדכון הידע שלו על העולם, כלומר מאפשרת לו ללמוד, היא גם מניעה אותו ללמידה נוספת. מתברר, שכאשר תינוק נתקל בהפרה של הציפייה הסטטיסטית, ההפתעה שהוא חווה מובילה אותו להתקרב אל מקור ההפתעה ומדרבנת אותו לחקור את המקרה.

"כשמציגים לתינוקות שתי תיבות, שבכל אחת כדורים בשישה צבעים שונים, מתוך האחת נשלף רצף כדורים בצבע אחיד ומהשנייה כדורים בצבעים השונים — הם יעדיפו לזחול אל התיבה המפתיעה (זו שנשלף ממנה הרצף האחיד) ויחקרו אותה", אומרת קסו. "תינוקות מזהים אירועים מפתיעים כסיגנל ללמידה, וכאשר הם חוקרים את מקור ההפתעה, הם חושפים את עצמם להזדמנויות חדשות ללמידה. תינוקות בני 11 חודשים, למשל, שראו כדור ש'עבר דרך קיר' (כך היה נדמה להם) וקיבלו אותו לידיהם, גילו בו עניין חדש הרבה יותר מהר מתינוקות שקיבלו כדור רגיל, שפגע בקיר וניתר בחזרה".

### **מפני שהם בדקו יותר את הצעצוע המפתיע, זה שהפר את הציפייה ממנו?**

"כפי הנראה. ההבדל בקצב הלימוד של תינוקות שצופים באירוע צפוי לבין כאלה שצופים באירוע לא צפוי, מרשים מאוד: האחרונים לומדים הרבה יותר מהר. בכלל, תינוקות לומדים באופן אקטיבי: הם לא רק קולטים ומעבדים מידע באופן פסיבי, אלא מחפשים מידע".

### **כך שכדאי לתת לתינוקות צעצועים "משונים" או מפתיעים?**

"אין ספק שהפתעה היא כוח מניע גדול ללימוד של תינוקות. שלא כמו מבוגרים, תינוקות לאו דווקא לומדים באופן מתוכנן. הלמידה שלהם מתרחשת לא מתוך מטרה מוגדרת ובלי כוונה להשיג ידע מסוים. זה קורה גם ללא צעצועים מתוחכמים או שיטות לימוד ממוקדות. הדבר החשוב הוא פשוט לתת לתינוק לשחק".