

הבנה לא מילולית של מספרים רב ספרתיים

דרור דותן^{1,2}, נעמה פרידמן¹, וסטניסלאס דהאן^{2,3,4,5}

¹אוניברסיטת תל אביב, ²היחידה להדמיה מוחית קוגניטיבית, INSERM U992

³Collège de France, Paris, ⁴CEA, NeuroSpin Center, Gif/Yvette, ⁵University Paris-Sud

האם ניתן להבין את המשמעות של מספרים דו-ספרתיים בנפרד מהייצוגים המילוליים-פונולוגיים שלהם? כדי לענות על שאלה זו, בדקנו את יכולות עיבוד המספרים של יואל, אדם עם אפזיה ועם ליקוי תחבירי בהמרת ספרות למילים, שכמעט אינו מסוגל לקרוא בקול מספרים רב-ספרתיים – הוא אינו מצליח להמיר מספרים דו-ספרתיים למילות מספר, ומסוגל רק לקרוא אותם ספרה-ספרה ("שש, ארבע"). הליקוי של יואל אינו במנגנוני הקלט הויזואלי של ספרות וגם לא במנגנוני הפלט הפונולוגי, כיוון שהוא מצליח להעתיק מספרים דו-ספרתיים ולחזור עליהם בקול. מכאן שהליקוי שלו הוא בתהליך מרכזי יותר, שאחראי על המרת ספרות לרצף זהויות אבסטרקטיות של מילות מספר, ועל העברת זהות הספרות למנגנונים הפונולוגיים של שליפה לקסיקלית. הממצא המרכזי הוא שלמרות הקושי התחבירי בקריאת מספרים דו-ספרתיים, יואל הפגין תהליכי הבנה תקינים של מספרים כאלה. ההבנה שלו נמצאה תקינה במספר מבדקים: (1) הוא מסוגל לבצע חיבור דו-ספרתי; (2) הוא הצליח בהשוואת מספרים דו-ספרתיים, ובמטלה זו אף נמצא אפקט מרחק דו-ספרתי רציף; (3) כאשר התבקש למקם מספרים דו-ספרתיים על ציר מספרים לא מסומן, אופן המיפוי של יואל הושפע ע"י גורם לוגריתמי (לא ליניארי), ממצא שמראה כי יואל מייצג מספרים דו-ספרתיים בתור כמות דו-ספרתית הוליסטית. שורת הממצאים האלה הובילה אותנו למסקנה כי לפחות חלק מהתהליכים התחביריים של הבנת מספרים דו-ספרתיים אינם מחייבים המרה של המספר הדו-ספרתי מספרות לייצוג המילולי שלו.

1. מבוא

עד כמה משפיעה השפה על תהליכי החשיבה שלנו? עוד ב-1940 הציע בנג'מין לי וורף כי השפה עומדת במוקד החשיבה האנושית, וכי יש לה תפקיד מרכזי בעיצוב אופני החשיבה שלנו (Whorf, 1940). במהלך השנים נמצאו עדויות שונות מתחומי התפיסה החשבונית שעומדות בסתירה לגישה זו. ממצאים אלה הראו כי יכולות רבות של עיבוד מספרים מופיעות באופן ספונטני גם ללא ייצוג מילולי של מספרים – גם אצל בעלי חיים, גם אצל תינוקות שטרם למדו לדבר, וגם בקרב מבוגרים בתרבויות עם אוצר מילים מצומצם של מילות מספר (Brannon & Terrace, 2000; Dehaene, Izard, Spelke, & Pica, 2008).

[°] אנו מכירים תודה מיוחדת לנורית בורר-עלפי על עזרתה העצומה לכל אורך תהליך האבחון הנוירופסיכולוגי, כולל דיוני הרקע על מצבו של יואל, העברת מבדקים נוירופסיכולוגיים, גיבוש מסקנות האבחון, דיון במשמעות התוצאות וביישומן, והעזרה בפתרון הסוגיות שעלו במהלך המחקר. אנו מודים גם לאביה גביעון, למאיה פארן ולרעות שטרק על עזרתן בהעברת מבדקים ועל הדיונים בתוצאות ובמשמעותן, לאותי בת אל על עזרתה בבניית חלק מהניסויים, ולסתיו קליין על העזרה בקידוד התוצאות. המחקר נתמך על ידי INSERM, CEA, Collège de France, מענק מקרן Bettencourt-Schueller, מעבדת ליזלוטה אדלר לחקר התפתחות הילד, וע"י מרכז ARC למצוינות בקוגניציה וליקויים קוגניטיביים (CCD) באוניברסיטת Macquarie. דרור דותן מודה לקרן עזריאלי על הענקת מלגת עמיתי עזריאלי.

;Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004 ;Dehaene, Molko, Cohen, & Wilson, 2004
 קיימת (Viswanathan & Nieder, 2013 ;Nieder & Dehaene, 2009 ;Hauser, Carey, & Hauser, 2000).
 גם גירסה מצומצמת יותר של ההשערה של וורף, לפיה חלק מהיכולות האריתמטיות הינן תלויות-שפה.
 לדוגמה, ייתכן כי קיים מנגנון-על כלשהו העומד בבסיסן של כל היכולות התחביריות ואחראי לא רק על
 עיבוד של מבנים תחביריים שפתיים, אלא גם על תהליכים תחביריים אחרים, כגון האופן בו אנו מייצגים
 מספרים רב-ספרתיים וביטויים מתמטיים (Hauser, Chomsky, & Fitch, 2002).
 (Houdé & Tzourio-Mazoyer, 2003). גם ההשערה המצומצמת הזו, שמתארת "תחביר גלובלי", עומדת
 בסתירה לממצאים המתארים דיסוציאציות בין תהליכים ואזורי מוח המעורבים בעיבוד תחבירי של
 משפטים לבין כאלה המעורבים בתהליכים תחביריים-מתמטיים כגון עיבוד אלגברי (Monti, Parsons, &
 Osherson, 2012), עיבוד ביטויים מתמטיים (Maruyama, Pallier, Jobert, Sigman, & Dehaene, 2012),
 שיום מספרים רב-ספרתיים (Brysbaert, Fias, & Noël, 1998), המרת מספרים בין ייצוגים שונים וחשוב
 רב ספרתי (Varley, Klessinger, Romanowski, & Siegal, 2005).

במחקר הנוכחי בדקנו דיסוציאציות בין תהליכים תחביריים שונים של עיבוד מספרים. במחקר השתתף
 יואל, אדם שסבל מאפזיה בעקבות ארוע מוחי, עם קושי בהמרת מספרים רב-ספרתיים לייצוג המילולי
 שלהם (24 ← עשרים וארבע). שאלת המחקר המרכזית היתה האם אפשר להבין מספרים רב-ספרתיים גם
 כאשר קיים ליקוי במנגנונים התחביריים של תרגום ספרות למילים. כדי לענות על שאלה זו, בדקנו בפירוט
 את מאפייני הליקוי של יואל ואת מיקומו הפונקציונלי של הליקוי שלו. בהמשך בדקנו את יכולתו של יואל
 להבין מספרים, ואת התהליכים התחביריים המעורבים במטלות שונות של הבנת מספרים.

מספרים מיוצגים בשלושה אופנים: בתור ספרות (68), בתור מילות מספר (שישים ושמונה), ובתור כמויות,
 שמהוות את המשמעות הדומיננטית של המספר. ייצוגים אלה הינם נפרדים וקיימות דיסוציאציות ביניהם
 (Gordon, 2004 ;Lemer, Dehaene, Spelke, & Cohen, 2003), הם מנוהלים ע"י אזורים נפרדים במוח
 (Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003), וייתכנו פגיעות סלקטיביות בייצוג זה או אחר (Cohen &
 Dehaene, 2000). עם זאת, הייצוגים השונים קשורים באופן הדוק זה לזה: הייצוג הסימבולי של מספרים
 (בתור ספרות או מילות מספר) קשור לכמויות המתאימות, אותן ניתן לייצג באופן מרחבי על פני ציר
 מספרים מנטלי המתמשך משמאל לימין (Dehaene, Bossini, & Giraux, 1993);
 (Moyer & Landauer, 1967 ;Loetscher, Bockisch, Nicholls, & Brugger, 2010);
 (Shaki, Fischer, & Petrusic, 2009 ;Ruiz Fernández, Rahona, Hervás, Vázquez, & Ulrich, 2011).

כאשר מוצג לנו רצף ספרות, המספר הרב-ספרתי נכנס במקביל לכמה מסלולי עיבוד שממירים אותו
 לייצוגים השונים. מסלול אחד ממיר את המספר הרב-ספרתי לרצף של מילות מספר – זהו תהליך תחבירי
 שדורש קידוד של המיקום היחסי של הספרות בהתאם למערכת העשרונית, תרגום כל ספרה למילה בהתאם
 למיקומה העשרוני, וצירוף המילים יחדיו, לעתים תוך כדי הוספת סמני חיבור כמו ו' החיבור. בעבר דווח
 על פגיעות סלקטיביות בתהליך התחבירי הזה (Cipolotti, 1995; Noël & Seron, 1993). במקביל, מתקיים
 תרגום של המספר הרב-ספרתי לכמות המתאימה (Dehaene, Dupoux, & Mehler, 1990).

היחסי של הספרות, ולחבר את הכמויות של הספרות השונות בהתאם לעקרונות המערכת העשרונית. לפיכך, תהליכים תחביריים מעורבים הן בהמרת מספר רב-ספרתי לייצוג המילולי והן בהמרתו לכמות המתאימה. האם מדובר בתהליך תחבירי יחיד שאחראי על שני סוגי ההמרה, או על שני תהליכים תחביריים נפרדים? המחקר הנוכחי בדק היבט אחד של שאלה זו: בדקנו האם ניתן להמיר מספרים דו-ספרתיים לכמות המתאימה גם כאשר קיים ליקוי במנגנון התחבירי שממיר מספרים לייצוג המילולי שלהם.

מודל שלושת הייצוגים לעיבוד מספרים (Dehaene & Cohen, 1995; Dehaene, 1992) גורס כי קיים מסלול ישיר לתרגום מספר ספרתי לייצוג הכמותי שלו. מסלול זה הינו נפרד מהתהליך המתרגם את המספר לייצוג המילולי. עם זאת, אנו יודעים כי הייצוג המילולי משחק תפקיד גם במטלות שאינן מילוליות מטבען, כגון שינון עובדות חשבון (Cohen & Dehaene, 2000; Dehaene & Cohen, 1997; Dehaene, 1992). לעתים, הקשר בין הייצוג המילולי לבין הכמות עשוי להיות מורכב עד להפתיע. לדוגמה, הייצוג הכמותי יכול להיות מושפע ע"י השפה בה הוצג המספר: Dehaene et al. (2008) חקרו בני שבט מהאמזונס, ללא חינוך חשבוני, והראו כי העיבוד הכמותי שלהם הפגין דפוס ליניארי יותר כאשר מספרים הוצגו בשפה מערבית (פורטוגזית) ודפוס לוגריתמי יותר כאשר המספרים הוצגו בשפת האם שלהם, מונדורוקו.

כדי להבין האם אותם מנגנונים תחביריים משתתפים בתרגום מספר לכמות ולמילים, בדקנו את יכולת עיבוד המספרים של יואל – אדם עם אפזיה שהיה לו ליקוי סלקטיבי בהפקת מספרים מילוליים. בעקבות הפגיעה המוחית שלו יואל לא מסוגל להמיר מספרים רב ספרתיים לייצוג מילולי-פונולוגי – למעשה, הוא בקושי מסוגל לומר בקול מספרים כאלה. בדקנו האם למרות ליקוי זה, יואל עדיין מסוגל לתרגם מספרים דו-ספרתיים לכמות ההוליסטית המתאימה.

שאלה נוספת שנבדקה במחקר זה היא האם חיבור רב-ספרתי תלוי בייצוג המילולי של המספרים. זיכרון בעל-פה של עובדות חיבור וכפל מתבסס על ייצוג מילולי של המספרים (Cohen & Dehaene, 2000; Dehaene, 1992; Dehaene & Cohen, 1997; Dehaene, Spelke, Pinel, Stanescu, & Tsivkin, 1999). חיבור רב-ספרתי גם יכול להיות מושפע ע"י גורמים מילוליים כגון המבנה התחבירי של מספרים מילוליים בשפה מסוימת (Colomé, Laka, & Sebastián-Gallés, 2010), אם כי לא בכל המקרים (Brysbaert et al., 1998). ייצוגים פונולוגיים עשויים להיות מעורבים בחיבור רב ספרתי, אם כי כנראה אינם הכרחיים לביצוע תהליכי החיבור (Klessinger, Szczerbinski, & Varley, 2012). במחקר הנוכחי נרחיב את המסקנות של Klessinger et al. ע"י בדיקת דיסוציאציה אפשרית בין חיבור רב-ספרתי לבין הייצוג המילולי של מספרים: בדקנו האם יואל מסוגל לפתור תרגילי חיבור הכוללים מספרים דו-ספרתיים למרות שאינו מסוגל לתרגם מספרים כאלה לייצוג מילולי.

2. תיאור המקרה

2.1. סקירה כללית

יואל, שעבד בתור מהנדס, עבר בגיל 72 אירוע מוחי של אוטם תת-חריף בקורונה רדיאטה משמאל שבעקבותיו איבד את מרבית יכולות הדיבור. אובחנו אצלו אפזיה, אפרקסיה חמורה לדיבור, קשיים בהבנה, דיסלקסיה, דיסגרפיה, וליקוי תחבירי. הוא עבר שיקום שפתי שהתמקד בהגייה, שליפה לקסיקלית, ועיבוד תחבירי. כאשר פגשנו אותו, 11 חודשים אחרי האירוע, הוא עדיין סבל מקשיים רבים בהבנה והפקה של דיבור. עד אותו זמן הוא לא עבר אבחון או טיפול שהתמקד בעיבוד מספרים.

יואל הוא ימני ומשתמש במשקפי קריאה. כל המבדקים הועברו בעברית, שפת האם שלו. הוא נבדק בסדרת מפגשים בני 45 דקות שהתקיימו בחדר שקט בביתו. סדרת המפגשים נמשכה חודשים רבים, אך המטלות העיקריות של קריאת מספרים והבנת מספרים שיתוארו להלן הועברו לסירוגין במהלך תקופה קצרה מ-3 חודשים.

2.2. יכולות שפתיות

ליואל היה ליקוי בשליפה לקסיקלית. במבדק שיום 100 אובייקטים שהוצגו בתמונות (מבדק שמש, בירן ופרידמן, 2004) הוא לא הפיק כל תגובה מילולית ל-40 פריטים, היו לו טעויות פונולוגיות ב-45 פריטים (שנובעות אולי מהאפרקסיה לדיבור), וטעויות סמנטיות ב-13 פריטים, שמעידות על ליקוי נוסף בשלב עיבוד מוקדם יותר (פרידמן, דותן, ובירן, 2013).

זיכרון העבודה של יואל נבדק במטלת ספאן ספרות (בטרייט פריגבי, פרידמן וגביעון, 2002; Gvion & Friedmann, 2012) בה ענה ע"י הצבעה על הספרות 0-9 על דף. הספאן שלו היה 3, תוצאה נמוכה בהשוואה לקבוצת ביקורת מותאמת גיל ($z = -3.06, p = .001$; נתוני הביקורת לקוחים מתוך Gvion & Friedmann, 2012).

ליואל היה קושי ניכר בעיבוד תחבירי ובמורפולוגיה. במטלת התאמת תמונה למשפט (בפל"א, פרידמן, 1998). הביצוע שלו היה ברמת ניחוש לא רק במשפטי זיקת נושא ומושא (18/40 שגיאות), אלא אפילו במשפטים פשוטים (נושא-פועל-מושא, 14/30 שגיאות). במטלת השלמת זמן והתאם, בה התבקש להשלים משפטים ע"י הטיית פועל לזמן וההתאם הנכונים (בפל"א, פרידמן, 1998), היו לו טעויות נטייה ב-10/24 פריטים, ול-5 פריטים נוספים הוא לא נתן תשובה מילולית. הקושי המורפולוגי בא לידי ביטוי לא רק בפעלים אלא גם בשמות עצם: במטלת שיום תמונות בה נדרש להטות שמות עצם מורכבים מורפולוגית, היו ליואל טעויות מורפולוגיות (השמטה או החלפה של מוספית מורפולוגית) ב-7/20 פריטים, ועל 2 פריטים נוספים הוא לא הצליח לענות כלל. בדיבור ספונטני הוא מביע את עצמו בעיקר במילים בודדות או בצירופים קצרים ולא במשפטים שלמים.

גם הקריאה שלו לא היתה תקינה. מתוך 49 מילים שקרא ממבחן סינון לדיסלקסיה (תלתן, פרידמן וגביעון, 2003), הוא טעה בקריאת 37 מילים, ולא הצליח כלל לקרוא 6 מילים נוספות. סוגי הטעויות העיקריים שלו

בקריאה בקול היו פרפזיות פונולוגיות (פונמיות ופורמליות, 20 פריטים), ניאולוגיזמים (10 פריטים), טעויות מורפולוגיות (8 פריטים) וקריאת שטח (4 פריטים). בנוסף, היה לו קושי משמעותי בכתיבת מילים (8/11 טעויות).

לסיכום, ליואל יש ליקוי תחבירי חמור המשפיע אפילו על זמן והתאם, דיסלקסיה, דיסגרפיה, אפרקסיה לדיבור, ליקוי בשליפה לקסיקלית הנובע משלב סמנטי כלשהו, וזיכרון עבודה מצומצם.

3. עיבוד מספרים סימבוליים

3.1. קלט ופלט של מספרים ספרתיים

מנגנוני קריאת המספרים וכתיבת המספרים של יואל נבדקו באמצעות 2 מטלות: **הכתבת מספרים**. הנסיין אמר בקול את המספרים בין 1 ל-40 בסדר אקראי, ויואל כתב כל מספר בספרות. לא היו לו טעויות במטלה זו.

העתקה מעוכבת. יואל ראה 20 מספרים דו-ספרתיים על מסך המחשב, אחד אחד. כל מספר הופיע למשך שניה אחת, ואחרי שנעלם יואל התבקש לכתוב אותו על דף. כדי למנוע אסטרטגיית שינון מילולי, יואל התבקש לומר בקול את שמות האותיות "א", "ב" אחרי שהמספר נעלם מהמסך ולפני שכתב אותו על הדף. גם במטלה זו לא היו לו טעויות.

הביצוע התקין במטלות אלה מראה שיואל מסוגל לכתוב מספרים דו-ספרתיים בספרות באופן תקין, זאת בניגוד לקושי שלו בכתיבת מילים ($p < 0.001$ Fisher's) בהשוואה בין הכתבת מספרים לכתיבת מילים). מטלת ההעתקה המעוכבת מצביעה על תקינות המנגנונים האחראים על קלט מספר ספרתי: יואל הצליח לקודד את הזהות והמיקום היחסי של הספרות במספרים הדו-ספרתיים, ואף לזכור את המספר עד שכתב אותו. מטלת הכתבת מספרים מראה שהוא מסוגל להמיר מילות מספר לספרות. מעניין לציין כי בשיח ספונטני יואל הרבה להשתמש בכתיבת מספרים בתור אמצעי להעברת מסרים – לדוגמה, הוא היה רושם את הגיל של אדם שדיבר עליו, או את התאריך והשעה של ארוע שדיבר עליו.

3.2. הפקת מספרים מילוליים

בשלב הבא בדקנו את יכולתו של יואל לומר מילות מספר בקול. בניתוח המטלות שלהלן, סיווגנו את תגובותיו כנכונות בכל מקרה בו אמר את המספר הנכון, גם אם ההיגוי לא היה מדויק (למשל, 35 ← "שלושים וחמץ"). זאת כיוון שמטרתנו בפרק זה אינה לבחון את יכולות הארטיקולציה של יואל (אנו כבר יודעים שיש לו קשיים בתחום זה בגלל האפרקסיה לדיבור), אלא לבחון שלבי עיבוד מוקדמים יותר, הנוגעים לעיבוד מספרים. לפיכך, טעויות ארטיקולציה/פונולוגיות לא נכללו במניין הטעויות הכללי.

¹ בקריאה בקול של מספרים דו-ספרתיים (המטלה המפורטת להלן) היו ליואל 15 טעויות ארטיקולציה/פונולוגיות מתוך 25 הפריטים שלגביהם בדקנו טעויות מסוג זה (8 פריטים נוספים לא נותחו מבחינת טעויות פונולוגיות, בגלל בעיות טכניות בהקלטה). לגבי המטלות בהמשך פרק זה: בקריאת מספרים דו-ספרתיים בתור ספרות בודדות היו טעויות פונולוגיות ב-20/71 ספרות. בחזרה על מספרים היו טעויות כאלה ב-30/40 פריטים.

קריאה בקול של מספרים דו-ספרתיים. יואל ראה 33 מספרים דו-ספרתיים והתבקש לקרוא אותם בקול. המספרים הועברו ב-3 מפגשים נפרדים ברשימות בנות 8, 5, ו-20 מספרים. הרשימה המלאה כללה 5 מספרים בין 11 ל-19 ו-28 מספרים גדולים מ-20. הספרה 0 לא הופיעה באף מספר. שתי הרשימות הראשונות הודפסו על דף בפונט אריאל 22; הרשימה השלישית הוצגה על מסך מחשב, וכל מספר הופיע למשך שניה אחת.

בניגוד ליכולתו התקינה לכתוב מספרים, יואל התקשה מאוד בקריאה בקול. הוא הצליח לקרוא באופן מדויק רק 7 מתוך 33 המספרים שהוצגו לו. הטעות הנפוצה ביותר (23/33 פריטים, 70%) היתה קריאת המספר ספרה-ספרה (לדוגמה, 15 ← אחד חמש; 47 ← ארבע שבע): יואל הצליח להפיק את מילת העשרות רק עבור 9 מתוך 28 המספרים שהיו גדולים מ-20, ולא הצליח להפיק את צורת "X-עשרה" עבור אף אחד מ-5 המספרים בטווח 11-19 שהוצגו לו. השגיאות האחרות של יואל היו השמטת ספרה (2 פריטים), טעות לקסיקלית בתוך קטגוריה (כגון 63 ← שבעים ושלוש, 14 פריטים), ו-2 טעויות קטגוריה (כגון 14 ← ארבעים).

קריאת מספרים דו ספרתיים ספרה-ספרה. יואל ראה רשימה של המספרים בין 1 ל-40 שהוצגו בסדר אקראי, והתבקש לקרוא אותם בקול ספרה-ספרה (לדוגמה, 54 ← חמש ארבע) – בסך הכל 71 ספרות. המספרים הודפסו על דף בפונט אריאל 22. הוא ביצע את המטלה היטב – טעות לקסיקלית אחת בלבד, ועוד טעות שניתן לפרש בתור לקסיקלית או פונולוגית.

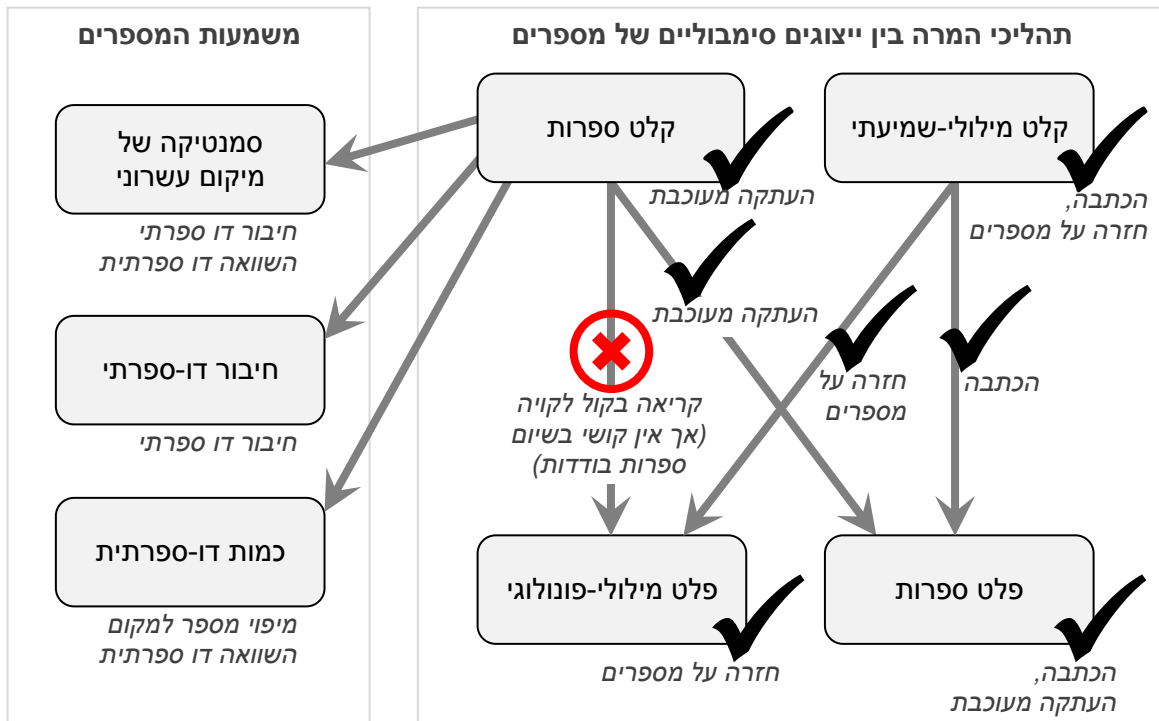
הדפוס העולה ממטלות אלה הוא כי למרות שיואל מצליח לעבד את המספרים הדו-ספרתיים שהוצגו לו, ואף לקרוא אותם בקול בתור ספרות בודדות, הוא לא מצליח לקרוא מספרים דו-ספרתיים בקול במבנה של עשרות-יחידות (5% לעומת 79% טעויות, $\chi^2 = 41.6$, $p < .001$). דפוס התוצאות לא השתנה גם כאשר השוונו את 15 המספרים הדו-ספרתיים שהופיעו בשתי המטלות (טעות אחת בקריאה ספרה-ספרה לעומת 13 טעויות בקריאת המספר במבנה תחבירי תקין של עשרות-יחידות, $p < .001$ Fisher's). כלומר, יואל לא הצליח לקרוא מספר דו ספרתי בקול, אך הצליח לקרוא את אותו מספר בדיוק כאשר התבקש לקרוא אותו ספרה-ספרה. בפרק הבא נברר את מקור הקושי הזה בהפקת מספרים דו-ספרתיים.

3.3 מהו מקור הקושי של יואל בהפקת מספרים מילוליים?

הממצאים לעיל הראו כי יואל מתקשה להמיר מספרים דו-ספרתיים מהייצוג הספרתי לייצוג מילולי-פונולוגי, קושי שמשפיע באופן סלקטיבי על יכולתו להפיק מספרים בני יותר מספרה אחת. הקושי אינו נובע מליקוי במנגנוני הקלט הויזואלי של מספרים, כיוון שיואל הצליח יפה במטלת העתקה מעוכבת, בקריאת מספרים דו-ספרתיים ספרה-ספרה, וכפי שנראה בהמשך (בפרק 4), גם בחיבור דו-ספרתי. הממצא הקריטי בעניין זה הוא העובדה שיואל מצליח להפיק ספרות בודדות ("ארבע, שלוש" = 43). האם ייתכן שהקושי שלו נובע ממנגנוני ההפקה, כלומר שהוא לא מסוגל לשלוף את הצורה הפונולוגית של עשרות ושל מספרי X-עשרה? אם זהו אמנם מקור הקושי, נצפה שיואל ייכשל גם במטלות נוספות שדורשות הפקת מספרים דו-ספרתיים, כגון חזרה על מספרים. לפיכך בדקנו את יכולתו לחזור על מספרים דו-ספרתיים.

חזרה על מספרים. הנסיין אמר בקול את המספרים בין 1 ל-40 בסדר אקראי, ויאל חזר עליהם מייד. הוא הצליח במטלה זו היטב (אם מתעלמים מטעויות ארטיקולציה/פונולוגיות). תפקודו היה בבירור טוב בהרבה מאשר בקריאת מספרים: היו לו כאן 3 טעויות בלבד (אחת לקסיקלית, אחת לקסיקלית או תחבירית, ואחת לקסיקלית או פונולוגית). יש לציין כי במטלה זו יואל לא ניסה אפילו פעם אחת לומר את המספר ספרה-ספרה, כפי שעשה תכופות במטלת הקריאה.

כל מטלה שמערבת הפקת מילות מספר דורשת את שליפת הצורה הפונולוגית שלהן מתוך מאגר פונולוגי (דותן ופרידמן, 2007; Dotan & Friedmann, 2014; McClosky, Sokol, & Goodman, 1986). יואל הצליח לחזור על מספרים באופן תקין (גם אם היו לו טעויות פונולוגיות), דבר שמראה על תקינות תהליכי השליפה הפונולוגיים ותהליכי הארטיקולציה. כיוון שתהליכים אלה תקינים, הם לא יכולים להיות מקור הקושי בהפקת מספרים דו-ספרתיים. לפיכך הקושי נובע משלב מוקדם יותר, בין תהליכי הקלט הויזואלי (התקנים) לבין תהליכי ההפקה (התקנים גם הם). תרשים 1 מסכם את המסקנה הזו ואת הממצאים שהובילו אליה. (לצד כל סימן ✓ או ✗ מופיעות המטלות שלפיהן נקבע אם הרכיב תקין או לקוי).



תרשים 1. תהליכי עיבוד מספרים אצל יואל. באותיות נטויות: המטלות ששימשו לבדיקת מנגנוני העיבוד השונים.

חזרה על מילות תפל דמויות-מספר. לבסוף, שללנו את האפשרות שהצלחתו של יואל במטלת חזרה על מספרים נבעה מאסטרטגיית חזרה תת-לקסיקלית (פונמה-פונמה), שעוקפת את מנגנוני השליפה הלקסיקלית. אילו הוא אכן היה חוזר על מספרים באופן תת-לקסיקלי, החזרה התקינה על מספרים לא היתה יכולה להעיד כי יואל שלף את הייצוגים הפונולוגיים של מילות המספר, ואף לא היתה מעידה על תקינות המנגנונים של הפקת מספרים. כדי לשלול את האפשרות הזאת, השווינו את התפקוד של יואל בחזרה על מספרים עם תפקודו במטלה שלא ניתן לבצע אלא תוך שימוש במסלול החזרה התת-לקסיקלי – חזרה על מילות תפל. לשם כך יצרנו עבור כל מילת מספר מילת תפל מקבילה, שהותאמה למילת המספר מבחינת אורך, מבנה הברה, מיקום טעם, מבנה מורפולוגי, מבנה עיצורים והברות, וצורות עיצורים. לדוגמה, מילת התפל שהותאמה למספר 34 היתה /frifol ve-umdi/. באופן זה יצרנו 40 מילות תפל דמויות-מספר, שהוצגו באותו סדר כמו במטלת חזרה על מספרים.

השוואת שתי המטלות העלתה דפוסי תוצאות שונים מאד. יואל ביצע הרבה יותר החלפות עיצורים בחזרה על מילות תפל מאשר בחזרה על מספרים (13% לעומת 4% מתוך 180 עיצורים, $\chi^2 = 9.3$, $p = .001$ חד זנבי). ממצא זה מראה כי שתי המטלות בוצעו במסלולי עיבוד שונים: חזרה על מספרים בוצעה תוך שימוש במסלול הלקסיקלי, בעוד חזרה על מילות תפל בוצעה תוך שימוש במסלול התת-לקסיקלי, שיצר יותר טעויות פונולוגיות. כלומר, יואל לא חזר על מספרים באמצעות המסלול התת-לקסיקלי. ממצא זה תומך במסקנה כי יואל מסוגל לשלוף את הצורה הפונולוגית של מילות מספר, כולל עשרות ומספרי X-עשרה, כל עוד המטלה אינה מערבת המרה של המספר מהייצוג הספרתי לייצוג המילולי.

ממצא נוסף שסותר את האפשרות של חזרה תת-לקסיקלית נוגע לאופן בו יואל חיבר את מילת העשרות למילת היחידות. בשלושה מקרים במהלך מטלת החזרה הנסיין אמר את ו' החיבור במספרים דו-ספרתיים בהיגוי /u/ (למשל, שלושים ושתיים), אך יואל חזר על המספר תוך הפקת ו' החיבור בהיגוי /ve/. הבדל זה מראה שהוא לא חזר על ו' החיבור בתור הפונמה /u/, אלא התייחס למשמעות הלקסיקלית/תחבירית של ו' החיבור בתור מילת פונקציה. ממצא זה, יחד עם הממצא לגבי דפוסים שונים של טעויות פונולוגיות בחזרה על מספרים לעומת מילות תפל, מראים כי יואל לא השתמש באסטרטגיה תת-לקסיקלית של חזרה על המספרים פונמה-פונמה. לסיום, יש לציין כאן קבוצת מחקרים נוספים שעומדים כנגד ההיפותזה של חזרה תת-לקסיקלית (דותן ופרידמן, 2007; Bencini et al., 2011; Cohen, Verstichel, & Dehaene, 1997; Dotan & Friedmann, 2010, 2014): מחקרים אלה בדקו חולים אפזים עם ליקוי פונולוגי והראו כי אפילו בשלבים מאד פריפריאליים של הפקת דיבור (באפר הפלט הפונולוגי), מילות מספר מעובדות בתור "אבני בניין" פונולוגיות שלמות ולא בתור פונמות בודדות.

הניסויים לעיל מראים כי ליואל יש ליקוי באחד הרכיבים לאורך מסלול ההמרה מספרות למילים. ליקוי זה פוגע באופן סלקטיבי ביכולתו לומר מספרים דו-ספרתיים, אך מאפשר לו לומר מספרים חד ספרתיים. הליקוי נמצא בשלב מאוחר יותר ממנגנוני הקלט היוזאלי של מספרים ספרתיים ומוקדם יותר ממנגנוני הפלט הפונולוגי, כלומר הוא נעוץ בתהליך שממיר ספרות למילות מספר (מסלול זה מסומן בתרשים 1 ע"י ⊗). הליקוי הוא תחבירי, כיוון שהוא לא משפיע על ספרות בודדות אלא רק על מספרים דו-ספרתיים

(וגם על מספרים ארוכים יותר: יואל לא מסוגל לומר גם מספרים בני 3 ספרות ומעלה, למרות שאלה לא נבדקו באופן שיטתי במחקר הנוכחי).

אם כן, בשלב זה אנו יודעים שהליקוי של יואל הוא במנגנון תחבירי בתהליך שממיר מספרים רב-ספרתיים מספרות למילות מספר. ניתן לחשוב על תהליך זה בתור תהליך דו-שלבי: שלב ראשוני שממיר את המספר מרצף ספרות לרצף של זהויות אבסטרקטיות של מילות מספר, ושלב שני שמעביר את המידע הזה למנגנוני ההפקה המורפו-פונולוגיים (דותן ופרידמן, 2007; Cohen & Dehaene, 1991; Dotan & Friedmann, 2010, 2014; McCloskey, Sokol, Caramazza, & Goodman-Schulman, 1990; McCloskey et al., 1986; Sokol & McCloskey, 1988). מהצלחתו של יואל במטלת החזרה נבע כי הליקוי שלו אינו בפלט הפונולוגי עצמו, ולפיכך הליקוי ממוקם לכל המאוחר בתהליך שמעביר את הפלט של תהליך ההמרה, כלומר את רצף הזהויות האבסטרקטיות של מילות מספר, אל מנגנוני הפלט הפונולוגיים של שליפה לקסיקלית.

למרות שהליקוי של יואל הוא במנגנונים תחביריים של עיבוד מספרים, הממצאים שהצגנו פוסלים אפשרות קיצונית לפיה הוא איבד את כל יכולותיו התחביריות: בשתי המטלות של קריאת מספרים (בתור מספרים ובתור ספרות בודדות), יואל מעולם לא אמר את מילת היחידות לפני מילת העשרות. מכאן שהוא הצליח לקודד את הסדר היחסי בין הספרות, מידע שניתן להגדיר בתור מידע תחבירי. בנוסף, הביצוע התקין של יואל בהכתבת מספרים מראה על תקינותם של תהליכי ההמרה התחביריים בכיוון ההפוך, ממילים לספרות. כפי שנראה בפרק הבא, שתי הדוגמאות האלה אינן יכולות העיבוד התחביריות היחידות שנתרו תקינות אצל יואל.

4. הבנת מספרים

בנקודה זו אנו מגיעים אל שאלת המחקר המרכזית: ראינו שיואל אינו מצליח להמיר מספרים דו-ספרתיים למילות המספר המתאימות. האם הוא עדיין מסוגל להבין מספרים דו-ספרתיים? נעסוק כאן בשני היבטים של היכולת של יואל להבין מספרים: (1) האם הוא מבין מספרים דו-ספרתיים? (2) מהו טיבו של התהליך שהוא משתמש בו כדי להבין מספרים? באופן ספציפי יותר, השאלה הראשונה שנשאל היא האם הוא מסוגל להמיר את המיקום היחסי של הספרות לתפקידיהן בתור עשרות ויחידות. שאלה זו נבדקה באמצעות מטלת חיבור דו-ספרתי ובאמצעות מטלת השוואה (ראו בעמודה השמאלית בתרשים 1).

השאלה השנייה מתייחסת לאופן בו יואל ממיר את המספרים הדו-ספרתיים לכמות המתאימה. מספרים דו-ספרתיים ניתנים לקידוד באופן מפורק, בתור כמויות נפרדות של יחידות ועשרות (Meyerhoff, Moeller, Debus, & Nuerk, 2012; Moeller, Klein, Nuerk, & Willmes, 2013; Nuerk & Willmes, 2005; Moeller, Nuerk, & Willmes, 2009), אך ניתן גם לצרף את שתי הספרות לייצוג יחיד, הוליסטי, של הכמות המתאימה (Brysbart, 1995; Dehaene et al., 1990; Reynvoet & Brysbart, 1999; Dotan & Dehaene, 2013). האם יואל מקודד מספרים דו-ספרתיים בתור

כמות הוליסטית? קיומו של ייצוג הוליסטי כזה יראה בבירור שיואל לא רק הצליח לשייך את הספרות לתפקידיהן הדצימליים בתור עשרות ויחידות, אלא הצליח גם לשלב אותן לכמות אחת ולקחת בחשבון את היחסים המתאמים בין הערכים של שתי הספרות. את השאלה השניה הזו בדקנו באמצעות מטלת השוואת מספרים ובאמצעות מטלת מיפוי מספר למקום.

4.1. חיבור דו-ספרתי

מטלת החיבור הדו-ספרתי בדקה את יכולתו של יואל לשייך את שתי הספרות במספר לתפקידיהן בתור יחידות ועשרות, ולהפעיל את התהליכים הנדרשים לפעולת החיבור. התרגילים הוצגו ליואל בספרות, בכתב, ובכל תרגיל הוא התבקש לחבר מספר חד-ספרתי עם מספר חד-ספרתי נוסף או עם מספר דו-ספרתי, ולכתוב את התשובה בספרות. ליואל הוצגו 3 תרגילי חיבור חד-ספרתי $(X+Y)$ עם תוצאה חד-ספרתית, 4 תרגילי חיבור עם מספרים רב-ספרתיים עגולים $(X0+Y)$ או $(X00+Y)$, ו-8 תרגילי חיבור דו-ספרתי $(XY+Z)$, מתוכם חמישה דרשו פעולת העברה (carry), כלומר הסכום של ספרות היחידות היה 10 או יותר). הוא ביצע את המטלה ללא טעויות.

לעומת זאת הוא התקשה מאד במטלת החיבור כאשר התבקש לומר את התשובות בעל-פה. הוא לא הצליח לענות על אף אחד מ-3 תרגילי החיבור הדו-ספרתי שהוצגו לו $(XY+Z)$, ואמר רק את ספרת היחידות (הנכונה) של התשובה. עם זאת הוא הצליח לענות בע"פ וללא טעויות על 3 תרגילי חיבור עם תוצאה חד-ספרתית, וביצע טעות אחת בלבד ב-4 תרגילי חיבור מספרים עגולים. תוצאות אלה מראות כי למרות הקושי של יואל בתרגום מספרים דו-ספרתיים לייצוג מילולי, הוא מצליח לבצע חיבור דו-ספרתי, אפילו כאשר התרגיל דורש פעולת העברה, כל עוד אינו נדרש לומר את התשובה במילים.

4.2. השוואת מספרים דו-ספרתיים

אחת המטלות המקובלות לבדיקת העיבוד ההוליסטי של מספרים דו-ספרתיים היא השוואת מספרים. במטלה בה השתמשנו, יואל התבקש להחליט בכל צעד האם המספר הדו-ספרתי שהוצג על המסך היה גדול או קטן מ-55. מטלה זו דורשת להשוות בין שתי כמויות (המספר ו-55), וזמני התגובה מתקצרים ככל שעולה המרחק בין מספר המטרה לבין 55 (Dehaene et al., 1990; Hinrichs & Novick, 1982; Moyer & Landauer, 1967; Nuerk & Willmes, 2005). במטלה הנוכחית, אם יואל משתמש בייצוג כמות דו-ספרתית, אנו אמורים לראות אפקט מרחק רציף (Dehaene et al., 1990).

4.2.1. שיטה

בכל צעד הוצג על המסך מספר דו-ספרתי, ויואל התבקש להשוות אותו מהר ככל האפשר ל-55. הוא לחץ ביד שמאל על מקש Z כדי לענות "קטן מ-55" או ביד ימין על מקש "?" כדי לענות "גדול מ-55". כל מספר בין 31 ל-79 (להוציא 55) הוצג 4 פעמים, ו-192 הצעדים הוצגו בסדר אקראי. הניסוי הועבר על לפטופ

Macbook Pro עם מסך 13" בעזרת תוכנת Matlab R2012a וחבילת PsychToolbox. המספרים הוצגו במרכז המסך בפונט שחור על רקע אפור. הספרות היו בגובה 2 ס"מ.

4.2.2. תוצאות

ליואל היו 2.6% טעויות בלבד במטלה זו (5 צעדים), ואלה לא נכללו בניתוח התוצאות. זמן התגובה שלו היה 273 ± 877 מילישניות, ללא הבדל מובהק בין יד ימין לשמאל (ימין: 346 ± 909 מילישניות; שמאל: 161 ± 844 מילישניות, $t(185) = 1.66$, $p = .10$, דו-זנבי)².

כדי לנתח את אפקט המרחק (בין מספר המטרה לבין 55), הצעדים חולקו ל-3 קבוצות על פי ההפרש בין המטרה לבין 55 (הקבוצות היו של מרחקים 1-8, 9-16, ו-17-23). זמני התגובה נותחו באמצעות ניתוח שונות עם 2 גורמים: קבוצת המרחק והתשובה הנכונה (גדול/קטן מ-55). בשני הגורמים נמצא אפקט עיקרי מובהק (מרחק: $F(2,181) = 4.2$, $p = .02$ דו זנבי; תשובה נכונה: $F(1,181) = 2.76$, $p = .05$ חד זנבי) ולא נמצאה אינטראקציה ($F(2,181) = 1.11$, $p = .33$). זמני התגובה הממוצעים של 3 קבוצות המרחק היו 865, 954, ו-814 מילישניות בהתאמה, והקונטרסט הליניארי היה מובהק ($F(1,181) = 8.18$, $p = .005$) – כלומר נמצא אפקט מרחק בהתאם לניבוי.

זמני התגובה נותחו גם באמצעות רגרסיה. 14 צעדים הוגדרו כ-outlier (ההגדרה היתה ביחס ל-4 הצעדים עם אותו מספר מטרה, אם הסרת הצעד הפחיתה את סטיית התקן של 4 הצעדים ל-33% או פחות). צעדים אלה לא נכללו בניתוח. המנבאים היו: [א] הלוגריתם של ערכו המוחלט של המרחק בין המטרה לבין 55; [ב] התשובה הנכונה (1 או -1); [ג] המכפלה של שני אלה (כדי לבדוק אינטראקציה). גם בניתוח זה נמצא אפקט מרחק: מנבא א' – לוג(מרחק) – נמצא מובהק ($p = .001$), בעוד שני המנבאים האחרים לא היו מובהקים ($p > .23$).

כדי לבחון את התרומה של ספרת היחידות לאפקט המרחק, ערכנו 2 ניתוחי רגרסיה שהופיעו גם אצל Dehaene et al. (1990). בניתוח הראשון המנבאים היו LogDiz, שמבטא את המרחק בין העשרות, ו-Dunit, שבודק את התרומה של ספרת היחידות³. שני המנבאים היו מובהקים ($p < .04$), כלומר שתי הספרות השפיעו על זמן התגובה (ועל תהליך ההשוואה). הניתוח השני בוצע רק על צעדים שהיו מחוץ לעשרת 50-60. המנבאים היו לוג(הערך המוחלט של המרחק בין המטרה ל-55), התשובה הנכונה (1 או -1), המכפלה של שניהם, ו-Dunit. רק למנבא לוג(מרחק) היתה תרומה מובהקת ($p < .02$); עבור המנבאים האחרים, $p \geq .13$, כלומר המרחק ההוליסטי הדו-ספרתי היה מנבא מספיק טוב כדי להסביר את אפקט המרחק, והייצוג המפורק של ספרת היחידות לא תרם מידע נוסף לניבוי זמן התגובה.

² השונות בתגובות ביד ימין היתה גדולה יותר מיד שמאל ($F(90,95) = 4.64$, $p < .0001$), אולי כתוצאה מהפגיעה בהמיספירה השמאלית.

³ נסמן בתור D, U את ספרת העשרות והיחידות של מספר המטרה (שהשווה ל-55). LogDiz הוא הלוגריתם של $1 + |D - 55|$. Dunit מוגדר בתור 0 כאשר $D=5$ (כלומר כאשר מספר המטרה הוא באותה עשרת כמו 55); מחוץ לעשרת הזו, Dunit מוגדר בתור $4.5 - U$ עבור מספרי מטרה קטנים מ-55 ובתור $4.5 - U$ עבור מספרי מטרה גדולים מ-55.

4.2.3. השוואת מספרים דו-ספרתיים: דיון

מיעוט הטעויות של יואל במטלה זו מראה בבירור שהוא הבין את המספרים הדו-ספרתיים, והצליח לשייך את הספרות לתפקידן העשרוני בתור עשרות או יחידות. שני ממצאים הראו כי דפוס התגובה שלו מתאים להנחה שהוא השתמש בייצוג הוליסטי של הכמות הדו-ספרתית: ראשית, מצאנו אפקט מרחק גם כאשר מספר המטרה היה מחוץ לטווח 50-60 (מצב בו מבחינה עקרונית, ייצוג מפורק היה מאפשר לבצע את ההשוואה גם בהתעלמות מספרת היחידות). שנית, הכמות ההוליסטית היתה גורם מספיק כדי להסביר את השונות בזמני התגובה, וספרת היחידות לא הגדילה את יכולת הניבוי של זמן התגובה מעבר לכך.

4.3. מיפוי מספר למקום

עוד פרדיגמה שמאפשרת לחקור את הייצוג הכמותי של מספרים היא מטלת מיפוי מספר למקום. במטלה זו מציגים למשתתף מספר, והוא מתבקש לסמן את המקום המתאים על פני ציר מספרים חלק (ללא שנתות). האופן בו הנבדק ממקם את המספרים משקף, במידה מסוימת, את המבנה של ציר המספרים המנטלי שלו, ולפיכך הוא משקף גם את האופן בו הנבדק מייצג כמויות (Barth & Paladino, 2011; Booth & Siegler, 2006; Berteletti, Lucangeli, Piazza, Dehaene, & Zorzi, 2010; Dotan & Dehaene, 2013; Cappelletti, Kopelman, Morton, & Butterworth, 2005; von Aster, 2000; Siegler & Opfer, 2003; Siegler & Booth, 2004). יואל ביצע את המטלה על אייפד, ותוכנת הניסוי עקבה אחרי מסלול האצבע שלו מרגע שמספר המטרה הופיע על המסך ועד שהאצבע סימנה מיקום על ציר המספרים. ניתוח מסלול האצבע מאפשר לעקוב אחרי התפתחות הייצוג הכמותי החל מרגע הצגת המספר ולאורך הצעד כולו (Dotan & Dehaene, 2013).

4.3.1. שיטה

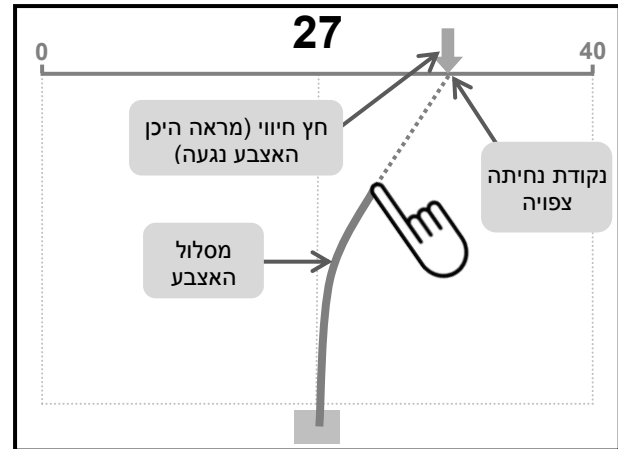
המספר הופיע תמיד בראש המסך (ראו תרשים 2א). כל צעד התחיל כאשר יואל נגע באצבעו במלבן אפור בחלק המרכזי-תחתון של המסך. ברגע שהאצבע התחילה לזוז למעלה, מספר המטרה הופיע מעל אמצע ציר המספרים ויואל גרר את אצבעו למעלה עד שזו נגעה בציר. ברגע זה נעלם מספר המטרה, ובמקומו הופיע חץ חיווי שהראה באיזה מקום יואל נגע. כל אחד מ-41 מספרי המטרה בין 0 ל-40 הוצג 4 פעמים, בסדר אקראי. 4 צעדים לא נכללו בניתוח כיוון שיואל נגע במסך עם יותר מאצבע אחת, או התחיל את הצעד בהזזת אצבע הצידה במקום למעלה. מספרי המטרה של צעדים אלה הופיעו שוב בהמשך הניסוי, כך שהמספר הכולל של צעדים תקינים עדיין היה 164.

התוצאות של יואל הושאו לתוצאות של 15 נבדקי ביקורת. נבדקים אלה הותאמו ליואל מבחינת יד דומיננטית (ימין), גיל (2 ± 4 ; 70; מגיל 6; 66 עד 79), שפה (דוברי עברית שפת אם), השכלה (תואר ראשון או שני) ועיסוק (כולם עבדו בעבודות עם אוריינטציה מספרית: 9 מהנדסים, 3 מורים לחשבון בחטיבת ביניים או תיכון, 2 כלכלנים, ומנהלת חשבונות אחת).

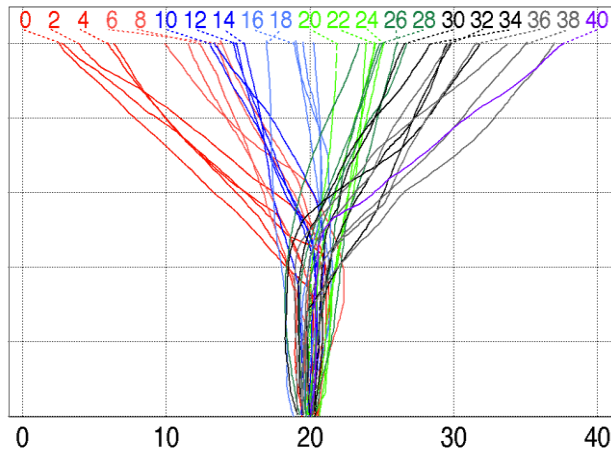
4.3.2. תוצאות

זמן התנועה של אצבעו של יואל היה 1320 ± 220 מילישניות – דומה לנבדקי הביקורת (1290 ± 210), בניתוח t של Crawford & Garthwaite (2002) נמצא $t_{(14)} = .14$, $p = .45$ (חד זנבי). תרשים ב' מראה את מסלולי האצבע של יואל: עבור כל מספר מטרה חישבנו מסלול ממוצע (חציוני) ע"י תרגום קצב הדגימה של המסלולים למספר קבוע של נקודות, וחישב הקואורדינטות החציוניות בכל נקודת זמן כזו.

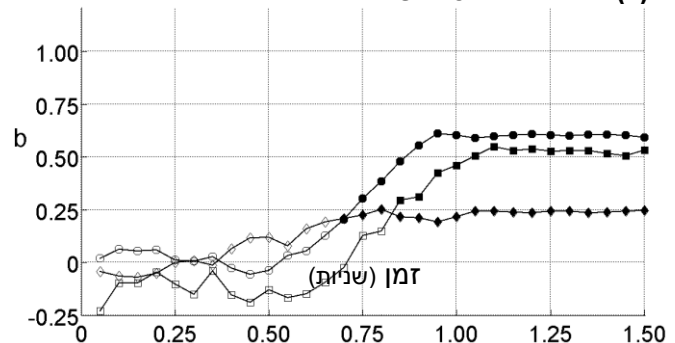
(א) ארגון המסך



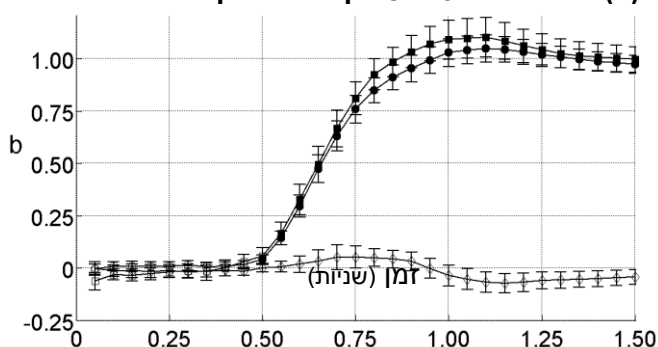
(ב) מסלולי האצבע החציוניים של יואל



(ג) תוצאות רגרסיה של יואל



(ד) תוצאות רגרסיה של קבוצת הביקורת



תרשים 2. [א] המטלה ותצורת המסך. יואל ראה מספרים דו ספרתיים והתבקש לסמן את המיקום המתאים על ציר מספרים שנמשך בין 0 ל-40. הוא התחיל צעד ע"י נגיעה במלבן שבתחתית המסך. מספר המטרה הופיע כאשר הוא התחיל להזיז את אצבעו למעלה, לעבר ציר המספרים. [ב] מסלולי האצבע החציוניים של יואל עבור כל מספר מטרה. [ג-ד] ערכי b של תוצאות הרגרסיה לניתוח המטלה. כל טור של 3 נקודות מציין תוצאות עבור נקודת זמן אחת מרגע הצגת הגירוי. התוצאות הן של רגרסיה בודדת (בתרשים ג') או ממוצע התוצאות של רגרסיה אחת לכל נבדק (בתרשים ד'). ערכי b מובהקים ($p \leq .05$) מסומנים ע"י נקודות שחורות.

כדי לנתח את הייצוג הכמותי בדקנו, באמצעות רגרסיה, אילו גורמים השפיעו על תנועת האצבע. המשתנה התלוי בניתוח זה היה נקודות הסיום של המסלולים (endpoints, המיקומים שיואל סימן על ציר המספרים), והיו 3 מנבאים. שני המנבאים הראשונים מבטאים את ייצוג הכמות הליניארית: העשרת של מספר המטרה (0, 10, 20, 30 או 40) וספרת היחידות. השתמשנו בשתי הספרות בתור מנבאים שונים כדי לתת מקום לאפשרות של ייצוג מפורק בו התרומה של כמות היחידות וכמות העשרות אינה ביחס של 1:10. המנבא השלישי היה לוג(מספר המטרה+1), שהותאם לטווח 0-40 באמצעות טרנספורמציה ליניארית. מנבא זה בודק ייצוג כמות הוליסטי-לוגריתמי (לפירוט מלא של שיטה זו של ניתוח רגרסיה ושל בחירת המנבאים, ראו אצל Dotan & Dehaene, 2013). הרגרסיה הראתה תרומה מובהקת של כל שלושת המנבאים ($p < .001$).

ניתוח רגרסיה דומה בדק איך מתפתח ייצוג הכמות של יואל מרגע הצגת המספר ועד שהאצבע נוגעת בציר המספרים. לשם כך ערכנו ניתוח רגרסיה אחד עבור כל נקודת זמן מרגע הופעת מספר המטרה (בהפרשים של 50 מילישניות בין נקודת זמן לבאה אחריה). השתמשנו באותם 3 מנבאים, והמשתנה התלוי היה נקודת הנחיתה הצפויה (implied endpoint) – המיקום על ציר המספרים אליו האצבע היתה מגיעה אילו המשיכה לנוע בכיוונה הנוכחי θ_t . הכיוון θ_t הוגדר בתור וקטור הכיוון בין מיקום האצבע לפני 50 מילישניות לבין מיקומה בזמן t . בנוסף, הגבלנו את נקודת הנחיתה הצפויה לטווח $[-2, 42]$ והוא לא היה מוגדר כאשר האצבע נעה הצידה ($|\theta| > 80^\circ$). אותה רגרסיה הורצה גם על כל אחד מנבדיקי הביקורת. כדי לבדוק את מובהקות ערכי b בקבוצת הביקורת, השווינו אותם עם אפס בעזרת מבחן t . השתמשנו ב- p חד זנבי כאשר ערך b הממוצע היה גדול מ-0, וב- p דו זנבי כאשר ערך b הממוצע היה קטן מ-0.

ניתוח מסלולי האצבע של יואל באמצעות רגרסיה זו (תרשים ג'2) הראה תרומה מובהקת של המנבא הלוגריתמי החל מ-650 מילישניות מרגע הצגת הגירוי ועד שהאצבע הגיעה לציר המספרים, תרומה מובהקת של העשרות החל מ-700 מילישניות, ותרומה מובהקת של ספרת היחידות החל מ-850 מילישניות. קבוצת הביקורת (תרשים ד'2) הראתה אפקט מוקדם יותר של העשרות (מ-500 מילישניות) והיחידות (מ-550 מילישניות), ולא הראתה אפקט מובהק של המנבא הלוגריתמי. בניתוח של כל אחד מנבדיקי הביקורת בנפרד, רק אצל 4 מהם נמצא אפקט לוגריתמי מובהק ב-2 נקודות זמן או יותר.

4.3.3. יואל מייצג כמות דו-ספרתית הוליסטית

קיומו של האפקט הלוגריתמי מראה בבירור שיואל מייצג כמות הוליסטית תוך אינטגרציה של ספרת העשרות וספרת היחידות: פונקציה לוגריתמית אינה ניתנת לתיאור בתור צירוף ליניארי של כמות העשרות עם כמות היחידות, ולכן גורם לוגריתמי ברגרסיה בהכרח משקף פונקציה לוגריתמית (או פונקציה דומה) של הכמות ההוליסטית.

⁴ במחקר קודם, שבדק נבדקים ללא ליקוי, ניתוח הרגרסיה גילה גם פקטור רביעי, שמבטא אסטרטגייה מרחבית של כיוון האצבע בחלקים האחוריים של המסלול (פקטור שנקרא "the spatial reference points", Dotan & Dehaene, 2013, סעיף 3.2.6). בניגוד לממצאים שם, אצל יואל לא נמצא אפקט מובהק של המנבא הזה על נקודות הסיום של מסלולי האצבע ($b < .001, p > .93$), והוא גם לא נמצא מובהק בניתוח המסלולים שמתואר בפיסקה הבאה (12). $p >$ בכל נקודות הזמן). לפיכך, במחקר הנוכחי לא השתמשנו במנבא זה.

התפקוד של יואל במטלה הושווה לקבוצת הביקורת של 15 נבדקים ללא ליקוי קוגניטיבי. לצורך ההשוואה השתמשנו ברגרסיה הנ"ל, עם המנבאים עשרות+יחידות+לוג, והשווינו את מקדמי המנבאים של יואל לקבוצת הביקורת עם מבחן t (Crawford & Garthwaite, 2002). ערכי $b[\log]$ של יואל היו גבוהים מאלה של קבוצת הביקורת ב-250 מילישניות ובכל נקודות הזמן שלאחר מכן, והבדל זה היה מובהק באופן שולי החל מ-1250 מילישניות ($t \geq 1.83, p \leq .1$ דו זנבי). בניתוח נפרד של כל נבדק ביקורת, אצל 4 נבדקי ביקורת נמצא אפקט לוג מובהק ב-2 נקודות זמן או יותר. האפקט הלוגריתמי של יואל נשאר עד סוף תנועת האצבע והופיע גם בניתוח של נקודות הקצה (המיפוי הסופי לציר המספרים), זאת בשונה מנבדקי הביקורת, אצלם האפקט הלוגריתמי (הלא-מובהק) הופיע רק בחלון זמן מסויים ואח"כ נעלם (ראו תרשים 2 ד').

בדקנו ושללנו פירוש אלטרנטיבי לתוצאות, הטוען שיואל ייצג את הכמות של כל ספרה באופן נפרד אך באופן לוגריתמי. לפי פירוש זה, הגורם הלוגריתמי בתרשים 2 ג' הוא תוצר-לואי של המתאם בין המנבא "לוג (מספר מטרה + 1)", בו השתמשנו ברגרסיה, לבין הגורמים שבאמת השפיעו על תנועת האצבע – צירוף ליניארי כלשהו של הלוגריתם של העשרות והלוגריתם של היחידות. כדי לשלול אפשרות זו הרצנו ניתוח רגרסיה נוסף: המשתנה התלוי נותר implied endpoint, ונותרו גם המנבאים עשרות, יחידות, ו-לוג(מספר מטרה+1), אך נוספו שני מנבאים חדשים: לוג(עשרות) ולוג(יחידות). רגרסיה אחת הורצה עבור כל נקודת זמן מרגע הופעת מספר המטרה (בהפרשים של 50 מילישניות בין נקודת זמן לבאה אחריה). ניתוח זה הראה השפעה מובהקת של לוג(כמות הוליסטית) ב-800 מילישניות ובכל נקודות הזמן החל מ-900 מילישניות. הממצא החשוב כאן הוא שבאף נקודת זמן לא היתה תרומה מובהקת של הלוגריתמים של הספרות הבודדות (עשרות או יחידות). למעשה, ערכי b של שני המנבאים האלה היו שליליים בכל נקודות הזמן החל מ-900 מילישניות.

שללנו גם פירוש נוסף של התוצאות, שמייחס את האפקט הלוגריתמי לעיבוד מהיר יותר של מספרים קטנים. לפי פירוש זה, קידוד הכמות הוא מהיר יותר עבור מספרים קטנים, ולכן מסלולי האצבע של מספרים אלה מתעקלים הצידה בזמן מוקדם יותר מאשר מספרים גדולים. כתוצאה מכך, כאשר בוחנים נקודת זמן מסוימת, המסלולים של המספרים הקטנים רחוקים זה מזה יותר מהמסלולים של המספרים הגדולים, דפוס שדומה לפונקציה לוגריתמית ולכן יוצר את הגורם הלוגריתמי בניתוח רגרסיה. כדי לנטרל את ההבדלים בזמן הקידוד של הכמויות, התאמנו את המסלולים זה לזה עפ"י נקודת הזמן בה התחילה התנועה האופקית בכל צעד. לשם כך חישבנו עבור כל צעד את נקודת הזמן הראשונה בה ניתן להבחין בתנועה מובהקת של האצבע בציר האופקי. ראשית, חישבנו את המהירות האופקית של האצבע לאורך המסלול ע"י החלקה של קואורדינטות x באמצעות מיצוע על פני כל חלון זמן של 30 מילישניות, וחישבו נגזרת לפי זמן של הקואורדינטות המוחלקות. כדי למצוא את נקודת הזמן של תזוזה אופקית ראשונה בכל צעד, מצאנו קודם כל את המהירות המכסימלית בכל צעד (רק אם זו היתה מובהקת, כלומר עברה את האחוזון העליון של המהירויות ב-300 המילישניות הראשונות של כל הצעדים של אותו משתתף). לאחר מכאן מצאנו את נקודת הזמן המאוחרת ביותר בה המהירות האופקית טרם עברה את סף 5% מאותה מהירות מכסימלית, ונקודה זו הוגדרה בתור נקודת הזמן של תחילת התזוזה האופקית. הוצאנו מהניתוח צעדים בהם לא נמצאה מהירות

מכסימלית גבוהה עד כדי מובהקות, צעדים בהם המהירות המכסימלית היתה בכיוון שגוי (מבחינת ימין-שמאל), וצעדים בהם לא נמצאה אף נקודת זמן שעמדה בקריטריון ה-5%, או שנקודת הזמן הזו היתה מוקדמת מ-300 מילישניות.

לאחר שמצאנו את תחילת התנועה האופקית בכל צעד, הרצנו מחדש את הרגרסיה עשרות+יחידות+לוג תוך "יישור" כל צעד לפי נקודת הזמן הזו (כלומר רגרסיה אחת עבור נקודת תחילת התנועה האופקית של כל צעד, ורגרסיות נוספות בקפיצות של 50 מילישניות החל מאותה נקודת זמן). מצאנו כי אפילו ברגרסיות אלה, שמנטרלות הבדלים אפשריים בין הצעדים מבחינת זמני תחילת התנועה, עדיין נמצא אפקט לוגריתמי אצל יואל ($b[\log] > .12$, $p < .05$), חד זנבי בכל נקודות הזמן החל מ-700 מילישניות, $p < .07$ החל מ-500 מילישניות). ממצא זה פוסל את הטענה כי הבדלים בזמני תחילת התנועה הם שאחראים לגורם הלוגריתמי בתוצאות.

הממצאים לעיל מוכיחים באופן ברור שיואל השתמש בקידוד כמותי הוליסטי של המספרים הדו-ספרתיים, וכי היכולת לקודד כמות הוליסטית לא נפגעה ביחס לקבוצת הביקורת.

4.3.4. קידוד כמות לינארית מפורקת

בתרשים 2 ג' דומה כי השפעת ספרת היחידות אצל יואל מעוכבת מעט בהשוואה לספרת העשרות. כדי לבדוק את המובהקות של הפרש זה, שינינו את המנבאים ברגרסיה הקודמת להיות לוג(מספר המטרה + 1), מספר המטרה, וספרת היחידות U . ברגרסיה זו, המנבא U משקף מצבים בהם התרומה היחסית של ספרת העשרות והיחידות אינה ביחס של 10:1. מצב כזה אכן התקיים: תרומת ספרת היחידות $b[U]$ היתה קטנה מ-0 בכל נקודות הזמן, ואפקט זה היה מובהק בחלון זמן מסויים ($p < .05$). דו זנבי ב-800 ו-900 מילישניות; $p < 0.1$ מ-650 עד 950 מילישניות, להוציא 750 מילישניות). ממצאים אלה מראים כי יואל עיבד את כמות העשרות בנפרד מכמות היחידות, וייתכן שעיבד את שתי הספרות באופן סדרתי, בזו אחר זו.

למרות זאת, העיכוב בעיבוד ספרת היחידות לא היה שונה באופן מובהק מקבוצת הביקורת. כאשר השוונו את ערכי $b[U]$ של יואל ברגרסיה הנ"ל (לוג + עשרות + יחידות) אל קבוצת הביקורת, לא נמצא הבדל מובהק באף נקודת זמן (אפילו אם נניח שערך $b[U]$ של יואל אמור להיות נמוך מקבוצת הביקורת, ובהתאם לכך נשתמש בערך p חד זנבי, נמצא הבדל מובהק באופן שולי בלבד ב-3 נקודות זמן בלבד – 800, 900, ו-950 מילישניות – $t \leq -1.49$, $p < .1$ (Crawford & Garthwaite's (2002)). ניתוח אינדיבידואלי של כל אחד מנבדקי הביקורת מצא 3 נבדקים עם $b[U] < 0$ מובהק בשתי נקודות זמן או יותר. לפיכך, גם אם נראה כאילו יואל מעבד עשרות ויחידות באופן סדרתי יותר מקבוצת הביקורת, הבדל זה הינו קטן ביותר.

4.3.5. דיוק

"שגיאת הקצה" של יואל – ההפרש בין המרחק האבסולוטי בין הנקודה שסומנה ע"י יואל לבין המיקום הנכון של מספר המטרה – היתה 2.43 ± 3.13 (לפי הסקלה 0-40). אלה הם ערכים פחות מדויקים מקבוצת הביקורת, שם שגיאת הקצה היתה $1.94 \pm .53$ ($t(14) = 2.17$, $p = .02$) (Crawford & Garthwaite (2002)).

לא נמצא מתאם בין שגיאת הקצה לבין מספר המטרה ($r = -.05, p = .53$), וגם לא נמצאה ביניהם תלות לא-ליניארית (בניתוח שונות חד גורמי, $F(40,123) = 1.33, p = .12$).

4.3.6. דיון במטלת מיפוי מספר למקום

התפקוד של יואל במטלה זו הראה שהוא מקודד מספרים דו-ספרתיים בתור כמות הוליסטית. לא נמצאה כל עדות לכך שהייצוג הכמותי ההוליסטי שלו פגוע ביחס לנבדקי הביקורת – למעשה, האפקט ההוליסטי-לוגריתמי בניתוח מסלולי האצבע של יואל היה אפילו גדול במעט מזה של קבוצת הביקורת. בפרק הקודם ראינו שליואל יש ליקוי תחבירי חמור בהמרת מספרים דו-ספרתיים מספרות למילים. לפיכך, ניתן להגיע כאן למסקנה החשובה ביותר של המחקר הנוכחי: **ניתן לבנות בהצלחה ייצוג כמותי הוליסטי של מספר דו-ספרתי, וקיומו של ליקוי תחבירי בהמרת ספרות למילים לא פוגע ביכולת זו.** ניתוח של הגורם הליניארי במטלה זו הרבה כי יואל היה דומה לקבוצת הביקורת מבחינת יכולתו לעבד את ספרת העשרות והיחידות במקביל.

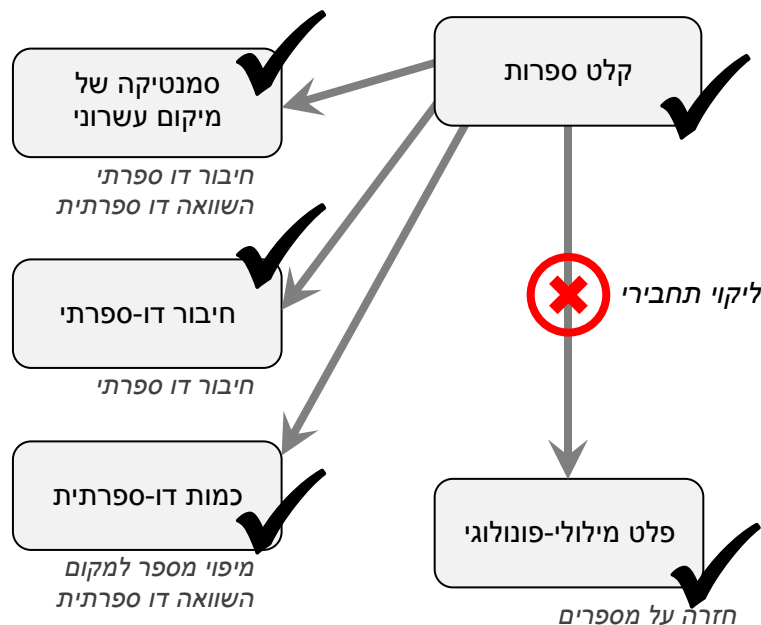
5. דיון

מחקר זה הציג ניתוח מקרה של יואל, אדם עם אפזיה שהראה ליקוי תחבירי סלקטיבי בהמרת מספרים דו-ספרתיים מייצוג ספרתי לייצוג מילולי-פונולוגי. יואל מצליח לקרוא בקול מספרים חד ספרתיים אך יש לו קושי ניכר בקריאת מספרים דו-ספרתיים במבנה תחבירי תקין של עשרות+יחידות. הקושי משפיע גם על מספרים ארוכים יותר (3 ספרות ומעלה), למרות שהמחקר הנוכחי התמקד בבדיקה שיטתית של מספרים דו-ספרתיים בלבד. אבחון נוירופסיכולוגי מדוקדק הראה כי הליקוי של יואל אינו במנגנון הקלט הויזואלי של מספרים ספרתיים וגם לא במנגנוני הפלט הפונולוגיים: הוא הצליח להעתיק מספרים דו-ספרתיים, לכתוב אותם כאשר הם מוקראים לו בקול, ולחזור עליהם. מכאן הסקנו כי הקושי התחבירי שלו נובע מתהליך מרכזי שממיר את הספרות לרצף של זהויות אבסטרקטיות של מילות מספר (the number word frame, דותן ופרידמן, 2007; Cohen & Dehaene, 1991; Dotan & Friedmann, 2010, 2014), או משלב מאוחר יותר שמשמש בזהויות מופשטות אלה לצורך גישה אל מנגנוני ההפקה הפונולוגיים. הליקוי של יואל אינו ליקוי גלובלי בעיבוד תחבירי של מספרים: מטלת ההכתבה הראתה כי יש לו יכולת תחבירית תקינה בכיוון ההפוך (המרת מילים לספרות). דיסוציאציה זו, בין המרת ספרות למילים לבין המרת מילים לספרות, מצטרפת למחקרים קודמים שהראו ממצאים דומים (Cipolotti, 1995).

למרות הליקוי בהמרת ספרות למספרים מילוליים, יואל הפגין הבנה תקינה של מספרים, כמו גם כמה וכמה יכולות תקינות של עיבוד תחבירי של מספרים. ראשית, הוא הצליח לבצע תרגילי חיבור של מספר דו-ספרתי עם מספר חד-ספרתי, אפילו אם התרגיל חייב שימוש בפרוצדורת העברה (carry), כל עוד לא נדרש ממנו פלט מילולי. מכאן הסקנו כי הוא מבין את המערכת העשרונית ומסוגל להתאים את הספרות לתפקידיהן העשרוניים בתור עשרות ויחידות, כמו גם לבצע את פעולת החיבור. ממצא זה מוסיף על מחקרים שהראו שחיבור רב-ספרתי אינו תלוי בייצוגים פונולוגיים (Klessinger et al., 2012);

(Varley et al., 2005) ואורתוגרפיים (Varley et al., 2005) של מספרים מילוליים. אך בעוד מחקרים אלה הראו כי פעולת החיבור אינה תלויה בקידוד פונולוגי של מספרים, אנו הראינו כי היא לא תלויה אפילו בשלב מוקדם יותר – התהליך התחבירי שמעורב בהמרת ספרות למילות מספר. במובן זה, הממצאים שלנו דומים לאלה של Brysbaert et al.'s (1998), שהראו כי חיבור אינו מושפע מהמבנה התחבירי של מספרים מילוליים בשפה מסויימת. עם זאת, המסקנה של Brysbaert et al. היתה מושתתת על כך שלא מצאו אפקט שפה בחישוב לא-מילולי, ואילו כאן הצלחנו להראות ממש דיסוציאציה בין עיבוד תחבירי פגוע לבין יכולות חיבור תקינות.

נקודה מרכזית היא כי למרות הפגיעה שלו בתחביר מספרים, יואל מצליח להבין מספרים דו-ספרתיים ויש לו יכולות תקינות של עיבוד תחבירי של מספרים דו-ספרתיים. הראינו זאת באמצעות קיומו של אפקט מרחק דו-ספרתי רציף במטלת השוואת מספרים דו-ספרתיים, ובאמצעות קיומו של גורם לוגריתמי במטלת מיפוי מספר דו-ספרתי למקום על ציר מספרים. הביצוע התקין של יואל במטלות אלה הצביע גם על יכלתו להתאים את הספרות לתפקידים העשרוניים שלהם. תרשים 3 מראה את המסקנות האלה.



תרשים 3. למרות הקושי התחבירי של יואל בהמרת מספרים ספרתיים לייצוג מילולי, הוא מצליח לשייך את הספרות לתפקידים העשרוניים שלהן (עשרות ויחידות), לקודד כמויות דו-ספרתיות הוליסטיות, ולבצע חיבור דו-ספרתי.

ממצאים אלה מובילים למסקנות מעניינות בנוגע לרמת הספציפיות של המנגנונים לעיבוד תחבירי של מספרים. מספרים רב-ספרתיים מחייבים עיבוד תחבירי כאשר ממירים אותם למילות מספר, כאשר מתרגמים אותם לכמות, וכאשר משתמשים בהם במסגרת תרגילי חיבור. הממצאים שהצגנו כאן מראים דיסוציאציה ברורה בין יכולות תחביריות מסויימות – שיוך הספרות לתפקידיהן העשרוניים ותרגום מספר

דו-ספרתי לכמות הוליסטית (שנותרו תקינות) – לבין תהליכים תחביריים המעורבים בהמרת ספרות למילות מספר (שהיו פגועים).

תוצאות אלה עולות בקנה אחד עם שורה של מחקרים קודמים שהראו דיסוציאציות בין הבנת מספרים ספרתיים לבין תהליכי ההמרה של ספרות למילות מספר. כמה מחקרים דיווחו על חולים עם פגיעה בהמרת ספרות למילים, שעדיין הראו הבנת מספרים תקינה (Cohen, Dehaene, & Verstichel, 1994); מחקרים אחרים דיווחו על חולים עם ליקוי תחבירי בהמרת מילים לספרות (החולה SAM אצל Cipelotti & Butterworth, 1995; והחולה SF אצל Cipelotti, 1995), שהצליחו בכל זאת לבצע מטלות הבנת מספרים – השוואה רב ספרתית (SF), חיבור דו ספרתי (SAM), והשוואת מספרים (שניהם). כלומר, למרות הליקוי התחבירי של SAM ו-SF, הם עדיין הצליחו לשייך את הספרות של מספרים רב-ספרתיים לתפקידיהן העשורניים. המחקר הנוכחי שיחזר את הממצאים הנ"ל ואף הוסיף עליהם, בעיקר בזכות השימוש במטלת מיפוי מספר למקום שהראתה המרה תקינה של מספרים דו-ספרתיים לכמות הוליסטית.

ממצאים נוספים ופסיכולוגיים מהסוג שהוצג כאן מראים כי התהליכים התחביריים המעורבים בהמרת ספרות למילים ולכמות הינם נפרדים, לפחות באופן חלקי, וכי לפחות חלק מההיבטים של הבנה דו-ספרתית אפשריים גם בלי לתרגם את המספר לייצוג מילולי. מסקנה זו עולה בקנה אחד עם מחקרים קודמים שהראו דיסוציאציה בין תחביר שפה לבין היבטים שונים של עיבוד תחבירי נומרי (Brysbaert et al., 1998); קיומו של מנגנון גלובלי אחד שאחראי על כל סוגי העיבוד התחבירי (Hauser et al., 2002); ומתאימים יותר לתמונת עולם מבוזרת בה קיימים מנגנונים תחביריים רבים. (Houdé & Tzourio-Mazoyer, 2003; Varley et al., 2005; Monti et al., 2012; Maruyama et al., 2012).

6. מקורות

דותן, ד. ופרידמן, נ. (2007). שלושת הדובים וארבעת הזבובים: טעויות פונולוגיות וסמנטיות – דיסוציאציה בין מילים למספרים. *שפה ומוח*, 6, 16–3.

פרידמן, נ. (1998). *כפל יא – בטריות פרידמן לאגרמטיזם*. אוניברסיטת תל אביב.

פרידמן, נ. וגביעון, א. (2003). *תלתן: סוללה לאבחון דיסלקסיות*. אוניברסיטת תל אביב.

פרידמן, נ., דותן, ד., ובירן, מ. (2011). שליפה לקסיקאלית וסוגים שונים של אנומיה נרכשת והתפתחותית. *שפה ומוח*, 10, 139–168.

Barth, H. C., & Paladino, A. M. (2011). The development of numerical estimation: Evidence against a representational shift. *Developmental Science*, 14(1), 125–135. doi:10.1111/j.1467-7687.2010.00962.x

Bencini, G. M. L., Pozzan, L., Bertella, L., Mori, I., Pignatti, R., Ceriani, F., & Semenza, C. (2011). When two and too don't go together: A selective phonological deficit sparing number words. *Cortex*, 47(9), 1052–1062. doi:10.1016/j.cortex.2011.03.013

Berteletti, I., Lucangeli, D., Piazza, M., Dehaene, S., & Zorzi, M. (2010). Numerical estimation in preschoolers. *Developmental Psychology*, 46(2), 545–551. doi:10.1037/a0017887

- Booth, J. L., & Siegler, R. S. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental Psychology*, 42(1), 189–201. doi:10.1037/0012-1649.41.6.189
- Brannon, E. M., & Terrace, H. S. (2000). Representation of the numerosities 1–9 by rhesus macaques (*Macaca mulatta*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 26(1), 31–49. doi:10.1037/0097-7403.26.1.31
- Brysbaert, M. (1995). Arabic number reading: On the nature of the numerical scale and the origin of phonological recoding. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124(4), 434–452. doi:10.1037/0096-3445.124.4.434
- Brysbaert, M., Fias, W., & Noël, M. P. (1998). The Whorfian hypothesis and numerical cognition: Is “twenty-four” processed in the same way as “four-and-twenty”? *Cognition*, 66(1), 51–77. doi:10.1016/S0010-0277(98)00006-7
- Cappelletti, M., Kopelman, M. D., Morton, J., & Butterworth, B. (2005). Dissociations in numerical abilities revealed by progressive cognitive decline in a patient with semantic dementia. *Cognitive Neuropsychology*, 22(7), 771–793. doi:10.1080/02643290442000293
- Cipolotti, L. (1995). Multiple routes for reading words, why not numbers? Evidence from a case of Arabic numeral dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 12(3), 313–342. doi:10.1080/02643299508252001
- Cipolotti, L., & Butterworth, B. (1995). Toward a multiroute model of number processing: Impaired number transcoding with preserved calculation skills. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124(4), 375–390. doi:10.1037/0096-3445.124.4.375
- Cohen, L., & Dehaene, S. (1991). Neglect dyslexia for numbers? A case report. *Cognitive Neuropsychology*, 8(1), 39–58. doi:10.1080/02643299108253366
- Cohen, L., & Dehaene, S. (1995). Number processing in pure alexia: The effect of hemispheric asymmetries and task demands. *Neurocase*, 1(2), 121–137. doi:10.1080/13554799508402356
- Cohen, L., & Dehaene, S. (2000). Calculating without reading: Unsuspected residual abilities in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology*, 17(6), 563–583. doi:10.1080/02643290050110656
- Cohen, L., Dehaene, S., & Verstichel, P. (1994). Number words and number non-words. *Brain*, 117(2), 267–279. doi:10.1093/brain/117.2.267
- Cohen, L., Verstichel, P., & Dehaene, S. (1997). Neologistic jargon sparing numbers: A category-specific phonological impairment. *Cognitive Neuropsychology*, 14(7), 1029–1061. doi:10.1080/026432997381349
- Colomé, A., Laka, I., & Sebastián-Gallés, N. (2010). Language effects in addition: How you say it counts. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(5), 965–983. doi:10.1080/17470210903134377
- Crawford, J. R., & Garthwaite, P. H. (2002). Investigation of the single case in neuropsychology: confidence limits on the abnormality of test scores and test score differences. *Neuropsychologia*, 40(8), 1196–1208. doi:10.1016/S0028-3932(01)00224-X
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1-2), 1–42. doi:10.1016/0010-0277(92)90049-N
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3), 371–396. doi:10.1037/0096-3445.122.3.371
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83–120.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33(2), 219–250.
- Dehaene, S., Dupoux, E., & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(3), 626–641.

- Dehaene, S., Izard, V., Spelke, E., & Pica, P. (2008). Log or linear? Distinct intuitions of the number scale in Western and Amazonian indigene cultures. *Science*, 320, 1217–1220. doi:10.1126/science.1156540
- Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., & Wilson, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 14(2), 218–224. doi:10.1016/j.conb.2004.03.008
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3), 487–506. doi:10.1080/02643290244000239
- Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., & Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 284(5416), 970–974.
- Dotan, D., & Dehaene, S. (2013). How do we convert a number into a finger trajectory? *Cognition*, 129(3), 512–529. doi:10.1016/j.cognition.2013.07.007
- Dotan, D., & Friedmann, N. (2010). Words and Numbers in the Phonological Output Buffer. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 6, 82–83. doi:10.1016/j.sbspro.2010.08.042
- Dotan, D., & Friedmann, N. (2014). *Steps towards understanding the phonological output buffer and its role in the production of numbers, morphemes, and function words*. Manuscript submitted for publication.
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–314. doi:10.1016/j.tics.2004.05.002
- Gordon, P. (2004). Numerical cognition without words: Evidence from Amazonia. *Science*, 306, 496–499. doi:10.1126/science.1094492
- Gvion, A., & Friedmann, N. (2012). Phonological short-term memory in conduction aphasia. *Aphasiology*, 26(3-4), 579–614. doi:10.1080/02687038.2011.643759
- Hauser, M. D., Carey, S., & Hauser, L. B. (2000). Spontaneous number representation in semi-free-ranging rhesus monkeys. *Proceedings of the Royal Society of London: Biological Sciences*, 267(1445), 829–833. doi:10.1098/rspb.2000.1078
- Hauser, M. D., Chomsky, N., & Fitch, W. T. (2002). The faculty of language: what is it, who has it, and how did it evolve? *Science*, 298(5598), 1569–1579. doi:10.1126/science.298.5598.1569
- Hinrichs, J. V., & Novick, L. R. (1982). Memory for numbers: Nominal vs. magnitude information. *Memory and Cognition*, 10(5), 479–486.
- Houdé, O., & Tzourio-Mazoyer, N. (2003). Neural foundations of logical and mathematical cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(6), 507–514. doi:10.1038/nrn1117
- Klessinger, N., Szczerbinski, M., & Varley, R. A. (2012). The role of number words: The phonological length effect in multidigit addition. *Memory and Cognition*, 40(8), 1289–1302. doi:10.3758/s13421-012-0228-y
- Lemer, C., Dehaene, S., Spelke, E., & Cohen, L. (2003). Approximate quantities and exact number words: Dissociable systems. *Neuropsychologia*, 41(14), 1942–1958. doi:10.1016/S0028-3932(03)00123-4
- Loetscher, T., Bockisch, C. J., Nicholls, M. E. R., & Brugger, P. (2010). Eye position predicts what number you have in mind. *Current Biology*, 20(6), R264–R265. doi:10.1016/j.cub.2010.01.015
- Maruyama, M., Pallier, C., Jobert, A., Sigman, M., & Dehaene, S. (2012). The cortical representation of simple mathematical expressions. *NeuroImage*, 61(4), 1444–1460. doi:10.1016/j.neuroimage.2012.04.020
- McCloskey, M., Sokol, S. M., Caramazza, A., & Goodman-Schulman, R. A. (1990). Cognitive representations and processes in number production: Evidence from cases of acquired dyscalculia. In A. Caramazza (Ed.), *Cognitive neuropsychology and neurolinguistics: Advances in models of cognitive function and impairment* (pp. 1–32). Hillsdale, NJ, England: Erlbaum.

- McCloskey, M., Sokol, S. M., & Goodman, R. A. (1986). Cognitive processes in verbal-number production: Inferences from the performance of brain-damaged subjects. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115(4), 307–330. doi:10.1037/0096-3445.115.4.307
- Meyerhoff, H. S., Moeller, K., Debus, K., & Nuerk, H. C. (2012). Multi-digit number processing beyond the two-digit number range: A combination of sequential and parallel processes. *Acta Psychologica*, 140(1), 81–90. doi:10.1016/j.actpsy.2011.11.005
- Moeller, K., Klein, E., Nuerk, H. C., & Willmes, K. (2013). Magnitude representation in sequential comparison of two-digit numbers is not holistic either. *Cognitive Processing*, 14(1), 51–62. doi:10.1007/s10339-012-0535-z
- Moeller, K., Nuerk, H. C., & Willmes, K. (2009). Internal number magnitude representation is not holistic, either. *European Journal of Cognitive Psychology*, 21(5), 672–685. doi:10.1080/09541440802311899
- Monti, M. M., Parsons, L. M., & Osherson, D. N. (2012). Thought beyond language: Neural dissociation of algebra and natural language. *Psychological Science*, 23(8), 914–922. doi:10.1177/0956797612437427
- Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, 215(5109), 1519–1520. doi:10.1038/2151519a0
- Nieder, A., & Dehaene, S. (2009). Representation of number in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, 32, 185–208. doi:10.1146/annurev.neuro.051508.135550
- Noël, M. P., & Seron, X. (1993). Arabic number reading deficit: A single case study or when 236 is read (2306) and judged superior to 1258. *Cognitive Neuropsychology*, 10(4), 317–339. doi:10.1080/02643299308253467
- Nuerk, H. C., & Willmes, K. (2005). On the magnitude representations of two-digit numbers. *Psychology Science*, 47(1), 52–72.
- Reynvoet, B., & Brysbaert, M. (1999). Single-digit and two-digit Arabic numerals address the same semantic number line. *Cognition*, 72(2), 191–201.
- Ruiz Fernández, S., Rahona, J. J., Hervás, G., Vázquez, C., & Ulrich, R. (2011). Number magnitude determines gaze direction: Spatial-numerical association in a free-choice task. *Cortex*, 47(5), 617–620. doi:10.1016/j.cortex.2010.10.006
- Shaki, S., Fischer, M. H., & Petrusic, W. M. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(2), 328–331. doi:10.3758/PBR.16.2.328
- Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child Development*, 75(2), 428–444. doi:10.1111/j.1467-8624.2004.00684.x
- Siegler, R. S., & Opfer, J. E. (2003). The development of numerical estimation: Evidence for multiple representations of numerical quantity. *Psychological Science*, 14(3), 237–250. doi:10.1111/1467-9280.02438
- Sokol, S. M., & McCloskey, M. (1988). Levels of representation in verbal number production. *Applied Psycholinguistics*, 9(03), 267–281. doi:10.1017/S0142716400007840
- Varley, R. A., Klessinger, N. J. C., Romanowski, C. A. J., & Siegal, M. (2005). Agrammatic but numerate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(9), 3519–24. doi:10.1073/pnas.0407470102
- Viswanathan, P., & Nieder, A. (2013). Neuronal correlates of a visual “sense of number” in primate parietal and prefrontal cortices. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(27), 11187–11192. doi:10.1073/pnas.1308141110
- Von Aster, M. (2000). Developmental cognitive neuropsychology of number processing and calculation: Varieties of developmental dyscalculia. *European Child and Adolescent Psychiatry*, 9, 41–57. doi:10.1007/s007870070008
- Whorf, B. L. (1940). Science and linguistics. *Technology Review*, 42, 229–248.