

בית הספר לחינוך
ע"ש חיים ונזואן קונסטנטינר
הפקולטה למדעי הרוח
ע"ש לסטר וסאלי אנטוין
אוניברסיטת תל אביב



עבודת גמר לקראת תואר "מוסמך למדעי הרוח" (MA)

החוג לחינוך מיוחד וייעוץ חינוכי

המגמה ללקויות למידה

מתשע מאות ושתיים ל- 90,02:

תהליכים תחביריים ולקויות בכתיבת מספרים

**From nine hundred and two to 90,02: syntactic
processes in number writing and their
impairment**

זהר כהן

בהנחיית ד"ר דרור דותן

יולי, 2023

תקציר

כתיבה של מספרים (משמיעה) היא יכולת בסיסית וחשובה, ושליטה בה בקרב ילדים צעירים מנבאת הצלחה ביכולות אריתמטיות בעתיד. למרות החשיבות המיוחסת ליכולת זו, התחום של כתיבת מספרים לא נחקר דיו, ואין עדיין הבנה טובה של התהליכים הקוגניטיביים המעורבים בכתיבה.

מחקרים קודמים מדווחים על דיסוציאציה בין תהליכי קלט מילולי ופלט ספרתי, ועל דיסוציאציה בין תהליכים לקסיקליים (המעבדים את הזהות של הספרה או מילת המספר) לבין תהליכים תחביריים (שמעבדים את היחסים בין האלמנטים הלקסיקליים). עם זאת, עדיין לא קיים מודל קוגניטיבי מלא המתאר את כלל התהליכים המתרחשים בכתיבה של מספרים משמיעה. באופן ספציפי, לא ידוע האם ההבחנה בין תהליכים תחביריים ללקסיקליים קיימת גם בקלט המילולי וגם בפלט הספרתי. מטרת המחקר הנוכחי היתה לבדוק לעומק את המנגנונים הקוגניטיביים המעורבים בכתיבה של מספרים: בדקנו האם ניתן לזהות מנגנונים תחביריים ספציפית בשלב הקלט המילולי ובשלב הפלט הספרתי.

אנו מדווחים על 4 נשים עם דיסנומריה (לקות בעיבוד מספרים), שביצעו טעויות תחביריות רבות בכתיבת מספרים משמיעה. על מנת לברר את המקור לטעויות אלה, בדקנו את התפקוד שלהן במטלות שונות המערבות את השלבים השונים של תהליך הכתיבה – קלט מילולי ופלט ספרתי. אצל 2 משתתפות נמצאה דיסוציאציה בין טעויות תחביריות רבות במטלות שמערבות קלט מילולי לצד תפקוד תקין במטלות המערבות פלט ספרתי. דפוס זה מראה כי המקור של הטעויות התחביריות שלהן הוא ליקוי סלקטיבי במנגנוני התחביר בקלט המילולי. שתי המשתתפות הנוספות הראו דפוס הפוך: תפקוד תקין במטלות המערבות קלט מילולי, ותפקוד לקוי – עם הרבה טעויות תחביריות – במטלות המערבות פלט ספרתי. דפוס זה מצביע על ליקוי תחבירי סלקטיבי במנגנוני הפלט הספרתי. הדיסוציאציה הכפולה שהראינו מצביעה על כך שהחלוקה למנגנונים לקסיקליים ומנגנונים תחביריים מתקיימת גם בקלט המילולי וגם בפלט הספרתי.

בעקבות ממצאי המחקר הנוכחי, בשילוב המסקנות של מחקרים קודמים, אנו מציעים מודל קוגניטיבי מפורט לכתיבה של מספרים. המודל מבחין בין מנגנוני קלט מילולי ופלט ספרתי, עם הבחנה בין מנגנונים לקסיקליים לתחביריים בכל אחד משני השלבים האלה – גם בקלט המילולי וגם בפלט הספרתי. המודל גם מציג כמה רכיבים משוערים נוספים, שקיומם טרם נבדק אמפירית.

לצד התרומה הקוגניטיבית, המחקר גם מדגיש את חשיבות האבחון המדויק של מקור הקושי בעיבוד מספרים וספציפית בכתיבה. המחקר גם מתאר סוללת כלים לאבחון דיסנומריה בכתיבה, ומציג מספר עקרונות מתודולוגיים שיש להקפיד עליהם בזמן ניתוח מיקומי הליקוי – ביניהם, הקפדה על זיכרון ושימוש באסטרטגיות כמשתנים מתערבים.

Abstract

Writing numbers to dictation is a fundamental aspect of numerical literacy and mastering it among young children predicts success in future arithmetic skills. Despite the importance of this ability, it has not been sufficiently studied and the exact nature of the cognitive processes underlying it is still unclear.

Previous studies reported dissociations between verbal input processes and digit production processes; and between lexical processes, which handle single words/digits, and syntactic processes, which handle the relation between lexical elements. However, the precise cognitive organization of number writing is still poorly understood – in particular, we do not know whether the syntactic/lexical distinction exists also within specific processing stages. The aim of the present study was to understand the cognitive mechanisms involved in writing numbers to dictation; specifically, we examined whether we can identify syntactic mechanisms specifically in the verbal-input level and in the digit-production level.

We report 4 women with dysnumeria, a deficit in processing symbolic numbers (digits / number words), who had many syntactic errors when writing numbers to dictation. In order to find the origin of their syntactic errors, we assessed in detail their performance in a series of tasks, each involving different sub-process of writing numbers to dictation. For two of the women, the origin of the syntactic errors was a selective deficit in syntactic processing at the verbal-input level, with spared digit output mechanisms. The two other women showed an opposite pattern: a selective deficit in syntactic processing at the digit-production level, with spared verbal input.

This double dissociation shows that both the verbal input mechanisms and the digit-production mechanisms are divided into lexical and syntactic processes. Based on this and previous findings, we propose a comprehensive cognitive model for number writing. The model postulates separate mechanisms for verbal input and for digit production, and a distinction between lexical and syntactic processes in each of them. It also suggests additional, hypothetical components whose existence has not yet been empirically tested.

Along with the cognitive importance of this study, it also emphasizes the importance of accurate diagnosis of the precise origin of the difficulty in processing numbers and specifically in writing numbers. The study also presents a battery of tests for detailed cognitive assessment of number writing abilities. Finally, the study emphasizes a number of methodological principles that should be considered when assessing number writing abilities – foremost, considering the participant's memory capacity and their use of strategies as potential confounding factors.

תוכן עניינים

6.....	מבוא	1.
6.....	חשיבות היכולת לקרוא ולכתוב מספרים	1.1
6.....	תהליכים ומנגנונים קוגניטיביים בכתוב מספרים	1.2
6.....	עיבוד מילים לעומת עיבוד ספרות	1.2.1
7.....	תהליכי עיבוד תחבירי לעומת תהליכי עיבוד לקסיקלי	1.2.2
7.....	קריאת מספרים	1.2.3
9.....	המחקר הנוכחי	1.3
10.....	שיטה	2.
10.....	משתתפות	2.1
10.....	מטלת סינון	2.2
10.....	ספאן ספרות	2.2.1
10.....	הכתבת מספרים	2.2.2
11.....	המטלות במחקר	2.3
11.....	ניתוחים סטטיסטיים	2.4
12.....	תוצאות	3.
12.....	קושי בעיבוד מבנה המספר	3.1.
12.....	מטלת הכתבה: בדיקה של כלל תהליכי הכתיבה	3.1.1
14.....	קל יותר לכתוב מספרים עם מבנה פשוט יותר: מטלת הכתבה מפוצלת	3.1.2
16.....	סיכום ביניים	3.1.3
17.....	בדיקת הייצוג התחבירי המרכזי והפלט הספרתי	3.2
17.....	מטלת שיבוץ ספרות	3.2.1
18.....	בדיקת הקלט המילולי והייצוג התחבירי המרכזי	3.3
18.....	חמש-בש	3.3.1
19.....	חזרה מעוכבת	3.3.2
20.....	סיכום ביניים	3.3.3
20.....	בדיקת ייצוג המבנה המרכזי	3.4
20.....	קריאת מספרים בקול	3.4.1
21.....	מיזוג ספרות	3.4.2
22.....	יודעים 10	3.4.3
23.....	סיכום ביניים	3.4.4
23.....	בדיקת תהליכי המבנה בנתח היוזואלי	3.4.5
26.....	דיון	4.
26.....	מנגנוני תחביר בקלט המילולי ובפלט הספרתי	4.1
26.....	ליקויים ספציפיים במנגנוני התחביר	4.1.1
27.....	בקרה על משתנים מתערבים	4.1.2
28.....	דיסוציאציה בין קריאת מספרים לכתוב מספרים	4.2

28.....	דיסוציאציה בין כתיבת מילים לכתיבת מספרים	.4.3
29.....	מודל לכתיבת מספרים	.4.4
30.....	דיסנומריה בכתיבה	.4.5
31.....	השלכות – אבחון דיסנומריה וטיפול בה	.4.6
33.....	ביבליוגרפיה	.5
36.....	נספחים-	.6
36.....	נספח א'. דפוסי פריטים – מטלת חמש בש	
36.....	נספח ב'- מטלות נוספות נתח ויזואלי	
36.....	מטלת זהה שונה (זהות וסדר)	
37.....	מטלת זיהוי רצף	

1. מבוא

1.1. חשיבות היכולת לקרוא ולכתוב מספרים

היכולות להבין, לקרוא ולכתוב מספרים הן יכולות חשובות ושימושיות בחיי היום יום. השימוש במספרים כתובים נעשה לא רק לחישובים מתמטיים אלא גם לצרכים תפקודיים יום יומיים שונים כגון רישום תאריכים, מספרי פלאפון ובטקסטים כתובים. כמו כן, אתגרי העולם המודרני מצריכים עיסוק נרחב במספרים וליכולות אלה תפקיד חשוב בקבלת החלטות, בניהול סיכונים, ואף בניבוי בריאות פיסית ומנטלית (Reyna & Brainerd, 2007; Steiner et al., 2021). חשיבות נוספת ליכולות אלה ניתן לראות בתחום האקדמי: שליטה ביכולת אלה בקרב ילדים בגילים הצעירים מנבאת הצלחה ביכולות מתמטיות בעתיד (Duncan et al., 2007; Habermann et al., 2020; Lin & Göbel, 2019; Yuan et al., 2019).

היכולת של קריאת מספרים נחקרה לעומק, עד לכדי תיאור מפורט של התהליכים הקוגניטיביים המעורבים בקריאה (Dotan & Friedmann, 2018). מודלים קוגניטיביים כאלה מתארים את כלל התהליכים והמנגנונים הקוגניטיביים המעורבים בתהליך קריאת מספרים ובכך מאפשרים אבחון מדויק של קשיים ולקויות בקריאת מספרים (Dotan & Friedmann, 2018). בניגוד לכך, קיימת ספרות מעטה בלבד העוסקת בתהליכי כתיבת מספרים, למרות שכתובת מספרים נחשבת ליכולת יום יומית שימושית וחשובה. עד כה לא קיים מודל קוגניטיבי מלא המתאר את כלל התהליכים הקוגניטיביים המתרחשים בכתובת מספרים. קריאה וכתובה של מספרים הינם תהליכים שונים המערבים מנגנונים קוגניטיביים שונים, כפי שנמצא בדיסוציאציות במחקרים נירופסיכולוגים שונים (Cipolotti et al., 1994; Lochy et al., 2003; McCloskey et al., 1985). מאן, שהמודל לקריאת מספרים לא יכול לשמש לזיהוי התהליכים הקוגניטיביים השונים המעורבים בכתובת מספרים ולאור חשיבותו ותרומותיו עולה הצורך לייצר מודל דומה גם לכתובת מספרים.

1.2. תהליכים ומנגנונים קוגניטיביים בכתובת מספרים

1.2.1. עיבוד מילים לעומת עיבוד ספרות

ניתן להבחין בין שלושה ייצוגים או מערכות נפרדות האחראיות על עיבוד מספרים (Dehaene & Cohen, 1995): ייצוג כמותי, ייצוג מילולי (לדוגמא, תשעים ושמונה) וייצוג ספרתי (לדוגמא, 98). שני האחרונים – ייצוג מילולי וייצוג ספרתי – הם הייצוגים הסימבוליים של המספר. הייצוג המילולי של מספרים כולל מערכת מורכבת בה המספרים מיוצגים על ידי לקסיקון מצומצם של מילות מספר אשר מחולקות לקטגוריות שונות: יחידות, עשרות, מאות ואלפים. כל מספר מיוצג על ידי מילת מספר אחת או רצף של מילות מספר המחוברות על ידי חוקים מורפולוגיים ותחביריים. הייצוג הספרתי של מספרים (רצף הסמלים הכתובים) מורכב מעשר ספרות (0-9) כשהערך של כל ספרה נקבע על פי המיקום שלה ברצף הספרות במספר. במסגרת המנגנונים המעורבים בכתובת מספרים, החלוקה הנ"ל בין עיבוד ספרות לעיבוד מילים באה לידי ביטוי בתור חלוקה בין מנגנוני קלט (מילולי) לבין מנגנוני פלט (ספרתי). מחקרים נירופסיכולוגיים על כתיבה הראו דיסוציאציה בין ביצוע תקין במטלות המערבות קלט מילולי, לדוגמא זיהוי של מספר משמיעה, לעומת ביצוע לקוי במטלות הדורשות

הפקה של מספרים בתור רצפי ספרות, לדוגמה במטלת הכתבת מספרים (Benson & Denckla, 1969; McCloskey et al., 1985; Singer & Low, 1933).

1.2.2. תהליכי עיבוד תחבירי לעומת תהליכי עיבוד לקסיקלי

חלוקה נוספת של המנגנונים המעורבים בכתיבת מספרים היא חלוקה למנגנונים לקסיקליים ותחביריים. תהליכים לקסיקליים מעבדים את הספרה או מילת המספר, בעוד תהליכים תחביריים מעבדים את היחסים בין האלמנטים הלקסיקליים – המיקום היחסי של הספרה במספר, סדר מילות המספר, ומבנה המספר – לדוגמה, קידוד מיקום האפס במספר (McCloskey et al., 1985; Seron & Noel, 1992).

התהליכים התחביריים והלקסיקליים יכולים להיפגע באופן סלקטיבי וקיימות דיסוציאציות כפולות ביניהם (Benson & Denckla, 1969; Cipolotti et al., 1994; Deloche & Seron, 1982; Granà et al., 2003; McCloskey et al., 1985; Noel & Seron, 1995; Power & Dal Martello, 1990; Singer & Low, 1933). קיימים שני דפוסים סלקטיביים של טעויות בכתיבה: טעויות תחביריות וטעויות לקסיקליות. טעויות לקסיקליות הן טעות בזהות של אחת הספרות 1-9 במספר – החלפתה בספרה אחרת (לדוגמה, במקום לכתוב 268 לכתוב 263). לעומתן, בטעויות תחביריות קיים שיבוש של מבנה המספר המוכתב. למשל, שינוי האורך של המספר על ידי הוספה או השמטה של אפסים (לדוגמה, במקום 2034 לכתוב 234 או 20034), או פירוק מספר ליחידות מילוליות ותרגום נפרד של כל יחידה לספרות (לדוגמה, במקום 2034 לכתוב 2000304) (Cipolotti & Butterworth, 1995; Delazer & Denes, 1998; Deloche & Seron, 1982; Granà et al., 2003; McCloskey et al., 1985; Noel & Seron, 1995; Power & Dal Martello, 1990).

1.2.3. קריאת מספרים

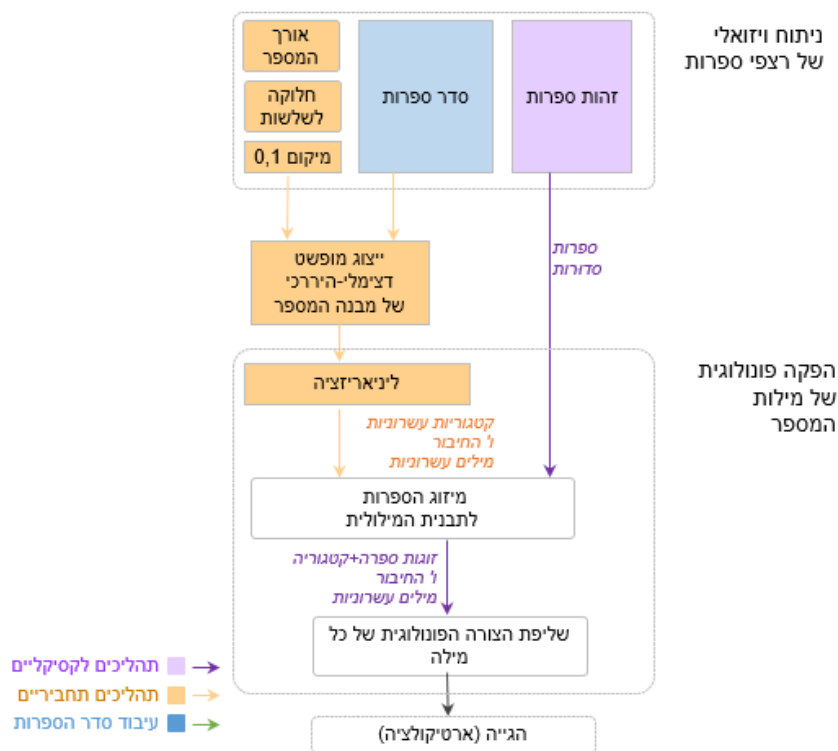
קיימות עדויות ממחקרים נורופסיכולוגיים לדיסוציאציות בין תפקוד תקין בקריאת מספרים וטעויות רבות בכתיבה של מספרים. מכאן שקריאה וכתובה של מספרים הם תהליכים שונים המערבים מנגנונים קוגניטיביים שונים (Cipolotti et al., 1994; Lochy et al., 2003; McCloskey et al., 1985). המחקר הנוכחי מתמקד בכתיבה של מספרים. למרות זאת, נתחיל בתיאור של כלל המנגנונים הקוגניטיביים המעורבים בקריאת מספרים. מנגנונים אלה רלוונטיים לפחות משתי סיבות. ראשית, אנו משערים כי קיים לפחות מנגנון אחד שמשותף לקריאה וכתובה של מספרים – מנגנון ייצוג תחבירי מרכזי (Handelsman & Dotan, 2023b). משום כך, כפי שנראה בהמשך, אבחון מדויק של ליקוי בכתיבת מספרים דורש לעתים להתייחס גם למנגנונים של קריאת מספרים. שנית, המחקר הנוכחי ביקש להציע מודל קוגניטיבי לכתיבת מספרים, והמודל הזה שואב השראה מהמודל הקוגניטיבי של קריאת מספרים (Dotan & Friedmann, 2018). בדומה למודל הקוגניטיבי של קריאת מספרים, גם המודל שנציע כאן מפריד בין תהליכי קלט ופלט ובין מנגנוני עיבוד לקסיקליים ותחביריים המתרחשים בכל אחד מהתהליכים.

תהליך קריאת מספרים כולל בתוכו מספר שלבים (דוטן ופרידמן, בהכנה; Cohen & Dehaene, 1991; Dotan & Friedmann, 2018; McCloskey, 1992). באופן גס ניתן לחלק את התהליך לשני תתי תהליכים:

תהליכי קלט ספרתי שאחראים על ניתוח ויזואלי של רצף הספרות ותהליכי פלט מילולי שאחראים על הפקת המספר בקול. כל אחד מהתהליכים יכול להיפגע באופן סלקטיבי ולגרום לדפוס מסוים של קושי בקריאת מספרים (Dehaene, 1992; Dotan & Friedmann, 2018; McCloskey et al., 1985)

בשלב הניתוח ויזואלי פועלים שלושה תהליכים שאחראיים לקודד את המבנה התחבירי של רצף הספרות: זיהוי מיקומי הספרות 0 ו-1, קביעת אורך המספר (כמה ספרות יש במספר) ואופן החלוקה של המספר לשלוש (במספרים בעלי 4 ספרות ומעלה, החלוקה מתבצעת בהתאם למבנה העשרוני). בנוסף יש 2 תהליכים שלא מקודדים מידע תחבירי אלא את זהות הספרות ואת סדרן. המידע התחבירי מאפשר לייצר ייצוג תחבירי מרכזי של מבנה המספר (Handelsman & Dotan, 2023b). זהו ייצוג לא מילולי ולא ויזואלי, שמשותף לכתיבה וקריאה.

גם השלב של הפקת המספר המילולי-פונולוגי מחולק לתהליכים תחביריים ולקסיקליים. המידע התחבירי מהייצוג המרכזי של מבנה המספר מועבר לרכיב שיוצר את התבנית המילולית של המספר, שהיא רצף הקטגוריות של מילות המספר, וכוללת בתוכה גם את מיקום ו' החיבור ו"מילים עשורניות" (אלף, מיליון). בהמשך, הקטגוריות מהתבנית המילולית עוברות מיזוג עם זהות הספרות לפי סדרן (מידע שמגיע מרכיבי הזהות והסדר בנתח ויזואלי); מיזוג זה יוצר את רצף מילות המספר. בשלב הבא נשלפת הצורה הפונולוגית של מילות המספר, ומידע זה עובר למערכת ההגייה על מנת להפיק את המספר בקול.



תרשים 1. מודל קוגניטיבי לקריאת מספרים (Dotan & Friedmann, 2018).

1.3. המחקר הנוכחי

כאמור לעיל, בכתיבת מספרים ישנה תמיכה אמפירית בשתי דיסוציאציות מרכזיות: קיימים מנגנונים נפרדים לקלט מילולי ולפלט ספרות (Benson & Denckla, 1969; McCloskey et al., 1985; Singer & Low, 1933), וקיימים תהליכים נפרדים לעיבוד לקסיקלי ולעיבוד תחבירי (Benson & Denckla, 1969; Cipolotti et al., 1994; Deloche & Seron, 1982; Granà et al., 2003; Noel & Seron, 1995; Power & Dal Martello, 1990; Singer & Low, 1933). שאלה פתוחה היא האם קיימים תהליכים נפרדים לעיבוד לקסיקלי ולעיבוד תחבירי גם ברמת הקלט וגם ברמת הפלט. המחקר הנוכחי יראה שהבחנה זו אכן קיימת. לשם כך, נראה ליקוי סלקטיבי בעיבוד תחבירי של הקלט המילולי, וליקוי סלקטיבי בעיבוד תחבירי בשלב הפלט הספרתי.

נדווח על 4 משתתפות שמבצעות טעויות תחביריות רבות בכתיבה של מספרים רב ספרתיים משמיעה. לשתיים מהן ליקוי סלקטיבי במנגנוני התחביר בקלט המילולי, ולשתיים האחרות ליקוי סלקטיבי במנגנוני התחביר בפלט הספרתי. כדי להראות את הדיסוציאציות האלה, נתאר את תפקודן של המשתתפות במטלות שונות המערבות מספרים סימבולים.

2. שיטה

2.1. משתתפות

המשתתפות גויסו למחקר דרך רשתות חברתיות באמצעות פנייה בה חפשו משתתפים המתקשים עם מספרים. טבלה 1 מתארת את פרטי המשתתפות. המשתתפת LA היתה מאובחנת עם הפרעת קשב ולקויות למידה, שאר המשתתפות לא דיווחו על לקויות למידה או הפרעת קשב.

כל משתתפת עברה מספר מפגשים בזום, אורך כל מפגש היה בין שעה לשעתיים. כל המשתתפות דוברות שפת עברית כשפת אם ועם יד דומננטית ימין. הן קיבלו תשלום עבור ההשתתפות במחקר. המחקר אושר ע"י ועדת האתיקה של אוניברסיטת ת"א.

טבלה 1. פרטי המשתתפות

משתתפת	גיל	מין	שנות השכלה	תואר	ספאן ספרות לפנים	% טעויות בכתיבת מילים. ^א
NS	27	נקבה	17	שני	8	לא הועבר
LB	23	נקבה	16	שני	5, 5.5 ^ב	0
LA	27	נקבה	16	שני	5, 5.5 ^ב	5.5
SH	32	נקבה	15	ראשון	7	0

^א מטלת הכתבת מילים ("סינון תלתן לכתיבה", פרידמן, גביעון ויכני, 2007).
^ב מטלת ספאן הועברה פעמיים.

2.2. מטלת סינון

המשתתפות עברו מפגש סינון שכלל מטלת הכתבת מספרים ומטלה של זיכרון לטווח קצר (טבלה 1). הכללנו משתתפות שעשו לפחות 10% טעויות במטלת הכתבת מספרים, וקיבלו ציון של לפחות 5 ($z = -1.52$) במטלת ספאן ספרות.

2.2.1. ספאן ספרות

מטרת המטלה (Gvion & Friedmann, 2008) היא להעריך קיבולת זיכרון לטווח קצר. במסגרת המטלה הושמע למשתתפות רצף ספרות בקצב אחיד של ספרה לשנייה והן התבקשו לחזור בקול על הרצף ששמעו. המטלה כללה 8 רמות (רמה ראשונה כוללת רצפים המורכבים מ-2 ספרות ועד לרצפים המורכבים מ-9 ספרות). המעבר מרמה לרמה מתרחש כשהמשתתפת מצליחה לזכור 3 רצפים בזה אחר זה. הציון במטלה נקבע על פי הרמה הגבוהה ביותר בה המשתתפת הצליחה לזכור 3 רצפים, חצי נקודה נוספת אם ברמה האחרונה הצליחה לזכור רק שני רצפים.

2.2.2. הכתבת מספרים

הוכתבו למשתתפות מספרים רב ספרתיים והן התבקשו לכתוב כל מספר על דף, עם פסיק בין ספרות המאות לאלפים, ולהתחיל בכתיבה רק לאחר סיום הקראת המספר. המטלה כללה מספרים בני 3-6 ספרות, עם וללא אפס, שהוצגו בסדר אקראי.

2.3. המטלות במחקר

התפקוד של כל משתתפת בכל אחת מהמטלות הושווה לקבוצת ביקורת. בכל מטלה הוצאנו משתתפי ביקורת חריגים (outliers), שכמות הטעויות שבצעו הייתה גבוהה מהאחוזון ה-75 ב-150% המרחק הבין-רבעוני, ובתנאי שאחוז הטעויות שביצעו היה גבוה מ-7%.

2.4. ניתוחים סטטיסטיים

השוואת התפקוד של כל משתתפת לקבוצת הביקורת נעשתה תמיד על ידי מבחן קרופורד (Crawford & Howell, 1998). כאשר השונו את התפקוד של כל משתתפת בין שתי מטלות שכללו פריטים זהים, השתמשנו במבחן מקנמר (McNemar, 1947).

3. תוצאות

3.1. קושי בעיבוד מבנה המספר

3.1.1. מטלת הכתבה: בדיקה של כלל תהליכי הכתיבה

ראשית, העברנו למשתתפות מטלת הכתבה, שבודקת את כלל תהליכי הקלט השמיעתי והפלט הספרתי.

שיטה. בכל צעד, הוקרא למשתתפת מספרי רב ספרתי (לדוגמא, "מאה עשרים ושלושה אלף ארבע מאות חמישים ושש") והיה עליה להמתין עד סיום ההקראה ואז לכתוב אותו (123,456), כולל פסיק בין ספרת המאות לספרת האלפים. הותר לתקן טעויות, אך בקידוד הטעויות התייחסנו גם לטעות שתוקנה. הפריטים היו מספרים רב ספרתיים בני 3-6 ספרות. חלק מהפריטים כללו את הספרה 0 וחלק כללו את הספרה 1 במיקום העשרות (טבלה 2), הספרות 2-9 הופיעו בכמויות שוות. המספרים הוצגו בסדר אקראי אך אחיד לכל המשתתפים. השתמשנו ב-4 רשימות של מספרים, וכל משתתפת עשתה חלק מהרשימות, לא דווקא בסדר קבוע (טבלה 2). התוצאות במטלה זו הושוו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 56 משתתפים בגיל 27.6 (ס"ת 7.5). הוצאנו מקבוצת הביקורת 2 משתתפים שהיו outliers (יותר מ-16.5% טעויות).

הטעויות סווגו לטעויות לקסיקליות, טעויות סדר, וטעויות תחביריות. **טעויות לקסיקליות** כללו טעויות של *זהות ספרה* – החלפה של אחת הספרות 1-9 בספרה אחרת 1-9, למשל 268 ← 263, כולל מקרים של *הכפלת ספרה*, כלומר מצב בו הספרה השגויה כבר הופיעה במספר (268 ← 266); *הוספה* של אחת הספרות 1-9 (2,684 ← 26,847); ו*השמטה* של אחת הספרות 1-9 (2,684 ← 268). טעויות **בסדר הספרות** הן שינוי בסדר היחסי של הספרות שאינן 0 (למשל 268 ← 286). **טעויות תחביריות** הן שיבושים של מבנה המספר – כלומר, כתיבת מספר שהתבנית המילולית שלו (רצף הקטגוריות של מילות המספר) לא תואמת את מספר המטרה. הן כללו החלפה של 0 בספרה שאינה 0 (260 ← 267) או להיפך (267 ← 260); שינוי הסדר היחסי בין 0 לבין ספרה אחרת (2,060 ← 2600); הוספה או השמטה של ספרה כלשהי (אם הספרה לא היתה 0, זה נספר גם בתור טעות לקסיקלית); פירוק ושרשור – פירוק מספר ליחידות המרכיבות אותו ותרגום נפרד של כל יחידה לספרות (268 ← 200608); כתיבת מספר שלא מחולק היטב לשלוש (למשל 268,37); החלפת הקטגוריה של מילת "עשרה" במילה שאינה עשרה (213 ← 230) או להיפך.

טבלה 2. כמות הפריטים במטלת הכתבה.

רשימה	א'	ב'	ג'	ד'
מספר פריטים	120	120	275	120
3 ספרות	20	20	9	20
4 ספרות	40	40	37	85
5 ספרות	50	50	37	85
6 ספרות	10	10	37	85
פריטים הכוללים את הספרה 0	98	98	102	232
פריטים הכוללים את הספרה 1 בעשרות	20	20	10	32

תוצאות. לכל המשתתפות היו טעויות רבות בהכתבה (טבלה 3). רוב הטעויות היו טעויות תחביריות – כלומר טעויות שמשבשות את מבנה המספר, וברוב המקרים באות לידי ביטוי סביב הספרה אפס (הוספה, השמטה, שיכול והחלפה של 0). לעומת זאת, היו להן טעויות מעטות בלבד בזהות הספרות או בסדר הספרות. דפוס זה של טעויות מצביע על כך שלמשתתפות יש ליקוי בתהליכים התחביריים המעורבים בכתיבה. אחוז הטעויות התחביריות היה גבוה ברשימה הראשונה של כל משתתפת (NS - 22%, LB - 17%, LA - 16% ו-SH 18%) ונשאר גבוה גם בהמשך, כאשר אצל LA ו-LB היה שיפור מסוים במהלך המחקר (תרשים 2).

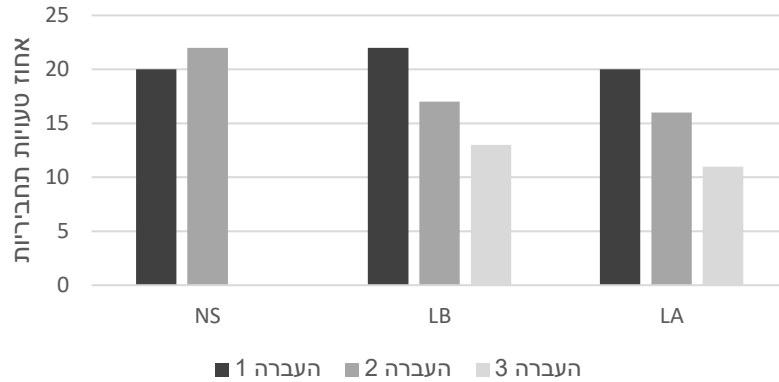
טבלה 3. אחוז הטעויות בהכתבת מספרים. אצל כל המשתתפות, רוב הטעויות היו תחביריות.

משתתפת	SH	LA	LB	NS
כמות פריטים כוללת	120	515	515	395
סה"כ טעויות	19	23	20	24
לקסיקליות	3.0	5.0	2.9	4.5
סדר	0.0	1.0	1.5	0.2
תחביריות	18	16	17	22
רשימה א (120 פריטים)				
סדר העברה ^x	-	1	-	1
סה"כ טעויות		23		23
לקסיקליות		2.5		5.0
סדר		0.8		0
תחביריות		20		20
רשימה ב (120 פריטים)				
סדר העברה ^x	-	-	1	-
סה"כ טעויות			27	
לקסיקליות			7.5	
סדר			0	
תחביריות			22	
רשימה ג (275 פריטים)				
סדר העברה ^x	-	2	2	2
סה"כ טעויות		27	20	25
לקסיקליות		7.6	1.8	4.3
סדר		0.7	2.0	0.3
תחביריות		16	17	22
רשימה ד (120 פריטים)				
סדר העברה ^x				-
סה"כ טעויות	קבוצת ביקורת ממוצע (סטיית תקן)	1	3	3
לקסיקליות	4.7 (3.6)	19***	16***	15**
סדר	1.8 (2.7)	3.0	1.6	0.8
תחביריות	0.2 (0.5)	0.0	0.0	1.6**
	2.9 (2.6)	18***	11**	13***

one-tailed $p < .01$ * $p < .001$

השוואה לקבוצת ביקורת:

^x הסדר בו הועברו הרשימות לכל משתתפת.



תרשים 2. אחוז הטעויות התחביריות במטלת הכתבה לאורך המחקר כפונקציה של סדר העברת המטלות. אצל LA ו-LB היה שיפור לאורך המחקר.

כדי להראות שהטעויות בהכתבה נובעות מקושי תחבירי, וספציפית שהן לא ארטיפקט של עומס זיכרון, בדקנו כיצד המורכבות התחבירית של המספר ועומס הזיכרון שהוא יוצר משפיעים על שיעור הטעויות התחביריות. אצל כל ארבעת המשתתפות אחוז הטעויות היה גבוה יותר בפריטים בעלי מבנה תחבירי מורכב (טבלה 4). כדי לבדוק אם האפקט מובהק סטטיסטית, הגדרנו את טעויות ההכתבה בתור המשתנה התלוי בניחוח רגרסיה לוגיסטית (לכל משתתפת בנפרד), בו המשתנים הבלתי-תלויים היו המורכבות התחבירית (פשוט/מורכב) וכמות מילות המספר ("אלף" נספרה כמילה נפרדת, "מאות/אלפים" נחשבו כסיומות מורפולוגיות ולא כמילים נפרדות). אצל כל המשתתפות נמצא אפקט מובהק של המורכבות התחבירית, ואצל כולן פרט ל-LB נמצא בנוסף גם אפקט מובהק של אורך המספר (טבלה 4). ממצא זה מחזק את המסקנה שהטעויות בהכתבה נבעו מקושי תחבירי.

טבלה 4. אחוזי הטעויות בפריטים עם מבנה תחבירי פשוט / מורכב, ותוצאות רגרסיה לוגיסטית לפי מבנה תחבירי ואורך המספר. אצל כל המשתתפות היו טעויות רבות יותר בפריטים עם מבנה מורכב, והאפקט היה מובהק. אצל כולן פרט ל-LB נמצא אפקט מובהק גם לאורך המספר.

SH	LA	LB	NS	משתתפת
13	19	13	18	פשוט
24	27	26	29	אחוז טעויות לפי מבנה מורכב
2.57	1.65	2.29	2.01	Odss ratio
$\chi^2=3.09$	$\chi^2=5.25$	$\chi^2 = 11.9$	$\chi^2 = 7.7$	Wald test
$p = .079$	$p=.022$	$p<.001$	$p = .006$	
1.99	1.42	1.07	1.34	Odss ratio
$\chi^2=5.9$	$\chi^2=9.9$	$\chi^2 = 0.4$	$\chi^2 = 5.4$	Wald test
$p = .015$	$p = .002$	$p = .53$	$p = .020$	

3.1.2. קל יותר לכתוב מספרים עם מבנה פשוט יותר: מטלת הכתבה מפוצלת

כדי לבסס עוד יותר את הטענה שהטעויות הרבות של המשתתפות נובעות מליקוי באחד מרכיבי המבנה, ולא מגורם אחר כמו עומס זיכרון, העברנו מטלת הכתבה נוספת, בה הוכתבו מספרים בעלי מבנה תחבירי פשוט יותר מהמטלה הקודמת, אבל שלא נבדלים מבחינת עומס הזיכרון (כמות מילות המספר). אם הטעויות בהכתבה אכן נובעות מליקוי ברכיבי המבנה, נצפה לראות פחות טעויות במטלה זו מאשר במטלת ההכתבה הרגילה.

כדי ליצור מספרים עם מבנה פשוט יותר, השתמשנו באותם מספרים ממטלת ההכתבה הרגילה, אבל כל מספר בן 4 ספרות ומעלה הוקרא בתור זוג מספרים על ידי החלפת המילה "אלף" במילה "ואז" – למשל, 4,567 הוקרא כך: "ארבע ואז חמש מאות שישים ושבע". המטלה הזאת מקלה על העיבוד התחבירי כי מוצגים בה מבנים תחביריים תלת-ספרתיים לכל היותר, ולא מוצגים המבנים המורכבים-יותר (4-6 ספרות) שמופיעים בהכתבה הרגילה. עם זאת, מספר המילים בכל פריט, ועומס הזיכרון שנגזר ממנו, היו זהים בשתי המטלות.

שיטה. הפריטים היו אותם פריטים ממטלת ההכתבה הרגילה. מספרים תלת-ספרתיים הוקראו כמו בהכתבה הרגילה. כל מספר ארוך יותר הוקרא כזוג מספרים על ידי שימוש במילה "ואז" במקום המילה אלף / אלפים. אם בתחילת השלשה השנייה הופיעה הספרה 0 או רצף של אפסים, גם ה-0 הוקרא – למשל, 123,040: "מאה עשרים ושלוש ואז אפס ארבעים", 123,004: "מאה עשרים ושלוש ואז אפס ארבע". המשתתפות התבקשו לכתוב את זוג המספרים ברצף, כאילו היו מספר אחד. השוויון את שיעור הטעויות התחביריות של כל משתתפת במטלה זו לטעויות בהכתבה הרגילה.

תוצאות. אחוז הטעויות התחביריות היה נמוך יחסית, ונמוך באופן מובהק מאחוז הטעויות במטלת ההכתבה הרגילה (טבלה 5). ממצא זה מחזק את המסקנה כי הקושי בכתיבת מספרים נובע מליקוי באחד ממנגוני התחביר.

הירידה באחוז הטעויות לא נבעה מהזמן שחלף בין 2 המטלות (אפקט למידה): אחוז הטעויות התחביריות בהכתבה המפוצלת היה נמוך גם מההכתבה הרגילה השניה של כל משתתפת, שהועברה אחרי ההכתבה המפוצלת (טבלה 5).

טבלה 5. אחוז הטעויות במטלת הכתבת מספרים הראשונה ובמטלת הכתבה מפוצלת. אצל כל המשתתפות, אחוז הטעויות התחביריות היה נמוך יותר כשהמבנה התחבירי של המספר היה פשוט יותר.

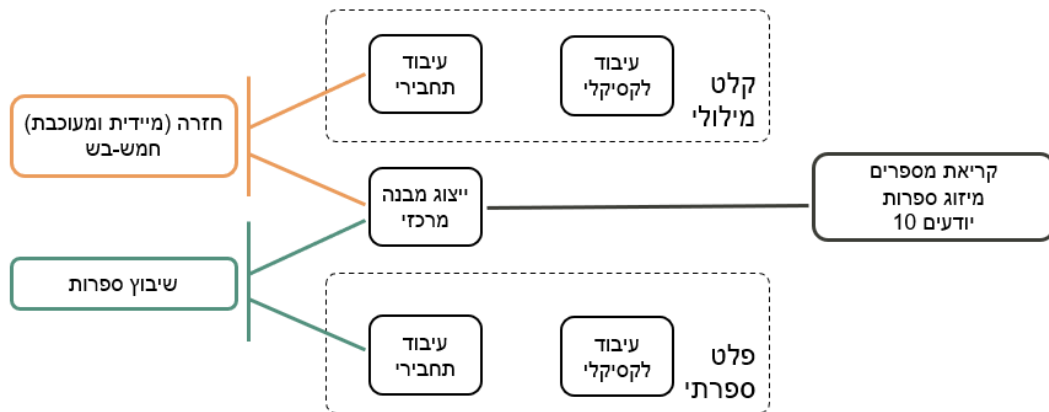
משתתפת	NS	LB	LA	SH
רשימה ראשונה לכל משתתפת	א	ג	א	ב
הכתבה מפוצלת				
סה"כ טעויות	4.0	8.0	1.6	1.6
לקסיקליות	3.0	4.0	0.8	1.6
סדר	0.0	0.8	0.0	0.0
תחביריות	0.8	4.0	0.8	0.0
הכתבה רגילה 1				
טעויות תחביריות:	20	22	20	18
השוואה להכתבה מפוצלת (McNemar 1-tailed p)	< .001	< .001	< .001	< .001
הכתבה רגילה 2				
טעויות תחביריות:	22	17	16	-
השוואה להכתבה מפוצלת (McNemar 1-tailed p)	< .001	< .001	< .001	

3.1.3. סיכום ביניים

הממצאים עד כה מצביעים על כך שלכל המשתתפות יש ליקוי באחד המנגנונים התחביריים שמעורבים בהכתבה. המיקום המדויק של הליקוי התחבירי עשוי להיות בתהליכים התחביריים בקלט המילולי, בפלט הספרתי או בייצוג המבנה התחבירי המרכזי. כדי לזהות את המיקום המדויק של הליקוי התחבירי, העברנו למשתתפות מטלות נוספות שמטרתן לבדוק באופן ספציפי את תהליכי עיבוד המבנה בקלט, בפלט, בפלט ובייצוג המרכזי. ראשית, העברנו מטלה שדורשת שימוש בייצוג התחבירי המרכזי ובמנגנונים התחביריים בפלט הספרתי, אבל לא דורשת שימוש במנגנונים התחביריים בקלט המילולי (ירוק בתרשים 3). אם הליקוי של המשתתפת הוא במנגנון התחבירי המרכזי או בפלט הספרתי, נצפה לטעויות תחביריות במטלה זו. לעומת זאת, אם הליקוי של התחבירי המשתתפת הוא בקלט המילולי, נצפה שהתפקוד במטלה זו יהיה תקין.

לאחר מכן, העברנו מטלות שדורשות שימוש במנגנונים התחביריים בקלט המילולי ובייצוג התחבירי המרכזי, אבל לא דורשת שימוש במנגנונים התחביריים בפלט הספרתי (כתום בתרשים 3). אם הליקוי של המשתתפת הוא בקלט המילולי או במנגנון התחבירי המרכזי, נצפה לטעויות תחביריות במטלות אלה. לעומת זאת, אם הליקוי הוא בפלט הספרתי, נצפה שהתפקוד של המשתתפת יהיה תקין.

לבסוף, העברנו מטלות שדורשות שימוש בייצוג המבנה התחבירי המרכזי אבל לא דורשות שימוש בקלט מילולי וגם לא בפלט ספרתי. אם הליקוי של המשתתפת הוא במנגנון התחבירי המרכזי, נצפה לטעויות תחביריות במטלות אלה, אבל אם הליקוי התחבירי הוא אחר, או בקלט המילולי או בפלט הספרתי, נצפה לתפקוד תקין במטלות אלה.



תרשים 3. מטלות לבדיקת המיקום הספציפי של הליקוי התחבירי, והתהליכים שכל מטלה דורשת שימוש בהם.

3.2. בדיקת הייצוג התחבירי המרכזי והפלט הספרתי

3.2.1. מטלת שיבוץ ספרות

בכל צעד במטלה, המשתתפת ראתה 2 פריטי מידע: (1) מבנה תחבירי של מספר, שהוצג בתור מספר רב-ספרתי שמורכב מהספרות 2 ו-0 – לדוגמה, 2202. (2) רצף ספרות שצריך לשבץ באותו מבנה, לדוגמה 567. המשתתפת התבקשה לכתוב את המספר שנוצר ע"י שיבוץ הספרות במבנה. במקרה זה, 5607.

הפלט במטלה הוא ספרתי, ויש דרישה שהוא יהיה במבנה תחבירי מסוים. כלומר, המטלה דורשת שימוש במנגנון התחבירי בפלט הספרתי, וייתכן שגם דורשת שימוש בייצוג התחבירי המרכזי. אם למשתתפת יש ליקוי ברכיבים אלה, היא צפויה להפיק מספר במבנה שונה מהמספר שהתבקשה לכתוב – למשל, בדוגמה הנ"ל ייתכן שתכתוב 5,067 או 50,607. לעומת זאת, אם הליקוי הוא במנגנון התחבירי בקלט המילולי, לא נראה טעויות רבות במטלה. לבסוף, אם קיים ליקוי בתהליכים לקסיקליים שמעבדים את זהות הספרות / מילות המספר, נצפה לטעויות החלפת ספרה שלא מערבות את הספרה 0 (כלומר, החלפת ספרה 9-1 בספרה אחרת שאינה 0). כיוון שמטלת ההכתבה הצביעה על כך שלאף אחת מ-4 המשתתפות אין ליקוי לקסיקלי, לא צפינו לטעויות לקסיקליות במטלה הנוכחית, ואכן היו מעט כאלה.

שיטה. בכל צעד במטלה, המשתתפת ראתה למשך 3 שניות מספר רב-ספרתי ("מבנה מטרה") שהורכב מהספרות 0 ו-2 בלבד, ומייד אחריו סדרת ספרות מופרדות במקפים (למשל 2-3-4-5-6-7) (8) המשתתפת התבקשה לכתוב על דף את המספר שנוצר ע"י החלפת כל 2 במספר המקורי בספרה המתאימה מתוך הסדרה, על פי סדרן.

במטלה היו 34 פריטים. במבנה המטרה היו 4, 5, או 6 ספרות (10, 16 ו-8 פריטים, בהתאמה). הספרה 0 הופיעה בכל מבנה פעם אחת (19 פריטים) או פעמיים (15 פריטים), באמצע המספר (23 פריטים) או בסוף המספר (11 פריטים). סדרת הספרות שהופיעה אחריו הייתה תמיד בסדר עולה, ונשארה על המסך ללא הגבלת זמן, כדי להוריד את עומס הזיכרון. כדי שכמות הספרות בסדרה לא תרמוז לגבי מבנה המספר, הופיעו בה לפחות 2 ספרות יותר ממה שהיה נדרש, והמשתתפים הונחו להשתמש בכמות הספרות המתאימה. כדי לוודא שהמטלה מתמקדת בתהליכי הפלט הספרתי, ולמנוע שימוש בתהליכי קלט או פלט מילולי, על המשתתפת היה לחזור לאורך כל המטלה על רצף הברות קבוע (ארטיקולציה מדכאת). התוצאות במטלה זו הושוּו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 27 משתתפים בגיל 24.2 (ס"ת 3.5). הוצאנו מקבוצות הביקורת 3 משתתפים שהיו outliers (יותר מ-28% טעויות).

הטעויות סווגו כמו במטלת הכתבה (פרק 3.1).

תוצאות. המשתתפות LB ו-NS ביצעו טעויות תחביריות רבות במטלה זו (טבלה 6). כיוון שמטלה זו אינה דורש קלט מילולי, דפוס זה מצביע על ליקוי בייצוג מבנה מרכזי או במנגנון עיבוד המבנה בפלט הספרתי.

לשתי המשתתפות האחרות (LA, SH) היו טעויות תחביריות מעטות בלבד – כלומר אין להן ליקוי תחבירי בעיבוד מרכזי או בעיבוד המבנה בפלט הספרתי. על דרך השלילה ניתן להסיק שהקושי התחבירי שלהן בכתיבה נובע מליקוי במנגנון תחבירי בשלב הקלט המילולי.

אחוז טעויות הזרות היה נמוך אצל כל המשתתפות. כלומר, בהתאמה לממצאים ממטלת ההכתבה, אין להן ליקוי בעיבוד לקסיקלי בשלב עיבוד מרכזי או במנגנוני הפלט הספרתי.

טבלה 6. אחוז הטעויות במטלת פלט ספרתי ללא קלט מילולי.

משתתפת	NS	LB	LA	SH	ממוצע (סטיית תקן)	ביקורת
סה"כ טעויות	50***	38***	12	6.0	10.4 (6.9)	
לקסיקליות	3.0	3.0	3.0	0	2.2 (2.9)	
סדר	0	0	0	0	0.1 (0.5)	
תחביריות	47***	35***	9.0	6.0	7.9 (6.4)	

***one-tailed $p < .001$

השוואה לקבוצת ביקורת:

3.3. בדיקת הקלט המילולי והייצוג התחבירי המרכזי

בשלב הבא העברנו מטלות הדורשות קלט מילולי ולא דורשות הפקה של פלט ספרתי. אם הליקוי של משתתפת הוא בקלט המילולי או במנגנון התחבירי המרכזי, נצפה לטעויות תחביריות במטלות אלה. לעומת זאת, אם הליקוי הוא בפלט הספרתי, נצפה שהתפקוד יהיה תקין.

3.3.1. חמש-בש

בכל צעד במטלה המשתתפת שמעה מספר והתבקשה לזהות מהי מילת המספר שחסרה בו (מקבילה לספרה 0). לדוגמא, במספר "ארבע מאות וחמש" חסרה מילת העשרות. כדי להצליח במטלה, המשתתפת צריכה לייצג את מבנה המספר – לפחות ברמת הקלט המילולי, וייתכן שגם ברמת הייצוג התחבירי המרכזי של המספר – ולזהות מה האלמנט החסר באותו מבנה.

שיטה. המטלה כללה 42 מספרים בני 4-6 ספרות במבנים תחביריים שונים (11, 14, ו-6 מספרים בני 4, 5, ו-6 ספרות, בהתאמה; נספח א'). הספרה 0 הופיעה פעם אחת בכל מספר, במיקומים שונים (במיקום היחידות, העשרות, המאות, האלפים, ועשרות האלפים ב-9, 9, 15, 6, ו-3 פריטים, בהתאמה), כלומר בכל מספר חסרה מילת מספר אחת בלבד. על מנת לציין איזו מילת מספר חסרה, המשתתפת ענתה "חמש", "חמישים", "חמש מאות", "חמשת אלפים" או "חמישים אלף". לדוגמא, אם מספר המטרה היה 3609, התשובה הנכונה היא 50. התוצאות במטלה זו הושאו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 45 משתתפים בגיל 26.4 (ס"ת 7.1). הוצאנו מקבוצת הביקורת 2 משתתפים שהיו outliers (יותר מ-20% טעויות). שיעור הטעויות הממוצע בקבוצת הביקורת היה 5.9% (ס"ת 5.1).

תוצאות. LA ו-SH עשו טעויות רבות במטלה. ל-SH היו 26% טעויות ($t(44) = 3.89$, one-tailed $p < .001$) ול-LA היו 24% טעויות ($t(44) = 3.89$, one-tailed $p < .001$), מה שמצביע על ליקוי במנגנון תחבירי בשלב הקלט המילולי או בעיבוד המרכזי. לעומתן, המשתתפות NS ו-LB הפגינו תפקוד תקין (NS: 2%, LB: 9%), שמצביע על כך שאין להן ליקוי התחבירי בשלב הקלט המילולי או בעיבוד המרכזי.

כלומר הליקוי התחבירי שלהן הוא בשלב עיבוד אחר – בפלט המילולי. ממצאים אלה תואמים את המסקנות מהמטלה הקודמת (שיבוץ ספרות).

3.3.2. חזרה מעוכבת

בכל צעד במטלה זו, המשתתפת שמעה מספר והתבקשה לחזור עליו. המטלה דורשת שימוש במנגנוני הקלט המילולי, הפלט המילולי, ובייצוג המבנה המרכזי. כדי למנוע אסטרטגיה פונולוגית, של חזרה על סמך ייצוג פונולוגי שטחי (חזרה על הצלילים) תוך "עקיפת" ייצוגי המבנה, המשתתפת התבקשה לחזור על משפט קבוע ("איזה יום יפה היום") אחרי ששמעה את המספר ולפני שחזרה עליו. החזרה על המשפט אמורה "למחוק" את הבאפר הפונולוגי. אם למשתתפת יש ליקוי תחבירי באחד הרכיבים המעורבים במטלה – קלט מילולי, ייצוג מבנה מרכזי, או פלט מילולי – היא צפויה לעשות טעויות תחביריות. לעומת זאת, אם רכיבים אלה תקינים (למשל אם הליקוי התחבירי של המשתתפת הוא רק במנגנוני הפלט הספרתי), לא נצפה לטעויות תחביריות במטלה זו, אם כי עדיין ייתכנו טעויות לקסיקליות עקב עומס הזיכרון שהמטלה יוצרת.

שיטה. המטלה כללה 120 מספרים רב ספרתיים בני 6-3 ספרות (20, 40, 50, ו-10 פריטים בני 3, 4, 5, ו-6 ספרות, בהתאמה), במבנים תחביריים מגוונים. מתוכם, 98 פריטים כללו את הספרה 0 ו-20 פריטים כללו את הספרה 1 כספרת העשרות. שאר הספרות (9-2) הופיעו בכמויות שוות פחות או יותר. התוצאות במטלה זו הושוו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 34 משתתפים בגיל 25.6 (ס"ת 6.4). הוצאנו מקבוצות הביקורת 3 משתתפים שהיו outliers (יותר מ-14% טעויות).

תוצאות. טעויות תחביריות. כמות הטעויות התחביריות של המשתתפת NS הייתה נמוכה ולא גבוהה מזו של קבוצת הביקורת. תפקודה של המשתתפת LB היה בטווח המעט נמוך של הנורמה. לעומתן, המשתתפות LA ו-SH ביצעו טעויות תחביריות רבות. טעויות תחביריות אלה, בצירוף התפקוד שלהן במטלות הקודמות, מחזקות את המסקנה כי למשתתפות אלה ליקוי במנגנון התחבירי בשלב הקלט המילולי או העיבוד המרכזי, ושוללות את האפשרות שהליקוי התחבירי שלהן הוא רק במנגנוני הפלט הספרתי.

טעויות לקסיקליות. למשתתפות LA ו-NS היתה כמות גבוהה של טעויות לקסיקליות במטלה. טעויות אלה לא נובעות מליקוי תחבירי, אלא ככל נראה משקפות קושי בזיכרון לטווח קצר – קושי שבא לידי ביטוי כאן, אבל לא במטלות הקודמות, כי מטלת החזרה המעוכבת יוצרת עומס זיכרון רב. אכן, כאשר הקלנו על עומס הזיכרון, ע"י כך שהמשתתפות לא התבקשו לומר את המשפט "איזה יום יפה היום" לפני שחזרו על המספר (מטלת "חזרה מיידית"), כמות הטעויות הלקסיקליות היתה נמוכה יותר (טבלה 7). גם התוצאות במטלת החזרה המיידית הושוו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 26 משתתפים בגיל 26.6 (ס"ת 7.5). הוצאנו מקבוצות הביקורת משתתף אחד שהיה outlier (יותר מ-7% טעויות).

טבלה 7. אחוז הטעויות במטלת קלט מילולי ללא פלט ספרתי עם ובלי עומס זיכרון.

ביקורת ממוצע (סטיית תקן)	SH	LA	LB	NS	משתתפת
					חזרה מעוכבת
5.5 (3.1)	18***	27***	8.3	7.5	סה"כ טעויות
4.4 (4.4)	3.3	5.8	2.5	6.6	לקסיקליות
0.3 (0.6)	2.5***	2.5***	0.8	0	סדר
2.2 (1.9)	11***	20***	4.1	1.6	תחביריות
					חזרה מיידית
0.4 (0.8)	0.8	6.6***	3.3***	2.5	סה"כ טעויות
0.3 (1.1)	0.8	2.5*	0.8	1.6	לקסיקליות
0.06 (0.2)	0	0	0.8	0.8	סדר
0.09 (0.2)	0	2.5***	0	0	תחביריות

* one-tailed $p < .05$ *** $p < .001$

השוואה לקבוצת ביקורת:

3.3.3. סיכום ביניים

LB ו-NS הפגינו תפקוד תקין (מבחינה תחבירית) במטלות "חמש בש" וחזרה מעוכבת, שדורשות שימוש בקלט המילולי ובייצוג המבנה המרכזי. כמו שראינו בפרק הקודם – התפקוד שלהן היה לקוי במטלת שיבוץ ספרות, שדורשת שימוש במנגנוני הפלט הספרתי. דפוס זה מצביע על תפקוד תקין של מנגנוני המבנה בקלט המילולי ורכיב ייצוג מבנה מרכזי, וליקוי ברכיב המבנה בפלט הספרתי. לעומתן, SH ו-LA הפגינו את הדפוס ההפוך: טעויות תחביריות רבות במטלות הקלט – "חמש בש" וחזרה מעוכבת, ותפקוד תקין במטלת שיבוץ ספרות. דפוס זה מצביע על ליקוי ברכיב התחבירי בקלט המילולי.

3.4. בדיקת ייצוג המבנה המרכזי

לגבי כל המשתתפות הראינו כי הליקוי התחבירי שלהן לא נובע ממנגנון עיבוד המבנה המרכזי – המשתתפות NS ו-LB הפגינו תפקוד תקין במטלה שדרשה קלט מילולי וייצוג מרכזי ("חמש בש" וחזרה מעוכבת) והמשתתפות SH ו-LA הפגינו תפקוד תקין במטלה שדרשה ייצוג מבנה מרכזי ופלט ספרתי (שיבוץ ספרות).

כדי לחזק את המסקנה שייצוג המבנה המרכזי תקין אצל כולן, העברנו גם 3 מטלות שבודקות את הייצוג הזה: קריאת מספרים בקול, שדורשת את הייצוג המרכזי (ההנחה היא שייצוג זה משותף לקריאה וכתובה של מספרים, (Handelsman & Dotan, 2023b)), ובנוסף את המנגנונים התחביריים בקלט הספרתי ובפלט המילולי; ושתי מטלות נוספות שדורשות את ייצוג המבנה המרכזי ואת מנגנוני הפלט המילולי. כל המטלות בחלק זה הן מתוך סוללת "מים" (דותן ופרידמן, 2014).

3.4.1. קריאת מספרים בקול

שיטה. כל משתתפת קראה בקול 120 מספרים רב ספרתיים (6-3 ספרות) שהוצגו על דף, כתובים בטור, ללא פסיק בין ספרות המאות לספרות האלפים. הפריטים היו מגוונים מבחינת מבנה המספר (אורך, מיקום הספרות 0 ו-1). הספרות 2-9 הופיעו בכמויות שוות פחות או יותר. לא היתה הגבלת

זמן, אך המשתתפות התבקשו לקרוא בקצב סביר. כמות הטעויות הושוותה לקבוצת ביקורת של 118 משתתפים (Handelsman & Dotan, 2023a).

תוצאות. המשתתפות NS ו-LA הפגינו יכולת קריאת מספרים תקינה – כמות הטעויות שלהן לא היתה גבוהה מזו של קבוצת הביקורת (טבלה 8). למשתתפת LB ולמשתתפת SH היה אחוז טעויות קצת גבוה יותר, אך כפי שנראה להלן, סביר להניח שטעויות אלה לא נובעות מליקוי ברכיב המבנה המרכזי.

טבלה 8. אחוז הטעויות במטלת קריאת מספרים.

משתתפת	NS	LB	LA	SH	ביקורת ממוצע (סטיית תקן)
מיקום ליקוי	פלט ספרות	פלט ספרות	קלט מילולי	קלט מילולי	
סה"כ טעויות	6.7	20***	5.8	13	6.6 (4.3)
טעויות מבנה	2.5	11*	1.6	11*	4.4 (3.4)
החלפת ספרה כולל הכפלות	4.1*	4.1*	2.5	0.8	1.6 (1.5)
סדר ספרות	0.8	7.5***	1.6	0.8	0.7 (1.0)
קטגוריה: עשרוני ספרה 1	1.6	11***	0.8	6.6*	2.4 (2.1)
קטגוריה: עשרוני אחר	0.8	0.8	0.8	3.3**	0.7 (0.1)
אלף	0	0.8	0	0	1.16 (1.8)

השוואה לקבוצת ביקורת: *** $p < .001$ ** $p < .05$ * one-tailed

3.4.2. מיזוג ספרות

שיטה. בכל צעד, המשתתפת שמעה רצף ספרות (למשל "שתיים, שלוש, ארבע") ואמרה את המספר הרב ספרתי המתקבל מרצף הספרות ("מאתיים שלושים וארבע"). המטלה דורשת שימוש בייצוג המבנה המרכזי וברכיבי הפלט המילולי. אם קיים ליקויי תחבירי באחד מהרכיבים הללו, נצפה לראות טעויות תחביריות. כדי להקל על עומס הזיכרון, הרצפים תמיד כללו ספרות בסדר עולה או יורד. במטלה 60 פריטים באורכים 3,4,5 ספרות (26 פריטים, 26 פריטים ו-10 פריטים). התוצאות במטלה זו הושאו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 31 משתתפים בגיל 24.3 (ס"ת 3.7). הוצאנו מקבוצת הביקורת 2 משתתפים שהיו outliers (מעל 32.5% טעויות).

תוצאות. כמות הטעויות התחביריות של SH, LA ו-LB היתה בטווח התקין, מה שמצביע על תפקוד תקין של ייצוג המבנה המרכזי (וגם של הפלט המילולי). שיעור הטעויות התחביריות של NS היה גבוה יותר (טבלה 9), וההבדל בינה לבין קבוצת הביקורת התקרר למובהקות ($p = .06$).

טבלה 9. אחוז הטעויות במטלת "מיזוג ספרות", שבדוקת את ייצוג המבנה המרכזי. אצל כל המשתתפות פרט ל-NS אחוז הטעויות התחביריות היה בטווח התקין.

משתתפת	NS	LB	LA	SH	ביקורת ממוצע (סטיית תקן)
מיקום ליקוי	פלט ספרות	פלט ספרות	קלט מילולי	קלט מילולי	
סה"כ טעויות	.18	13	16	10	10.0 (8.0)
טעויות מבנה	15 ⁺	8.3	6.6	5.0	6.7 (5.2)
החלפת ספרה כולל הכפלות	0	3.3	0	5.0	1.5 (3.0)
סדר ספרות	5.0	5.0	8.3	1.6	3.3 (3.6)
קטגוריה: עשרוני ספרה 1	12	8.3	6.6	3.3	6.1 (4.7)
קטגוריה: עשרוני אחר	0	0	0	0	0.1 (0.4)
אלף	1.6	0	0	1.6	0.3 (0.9)

⁺ one-tailed $p < .10$

השוואה לקבוצת ביקורת:

3.4.3. יודעים 10

שיטה. בכל צעד (60 פריטים) המשתתפת ראתה מספר רב ספרתי ולצדו הנחיה אם להוסיף לו 0 או להוריד ממנו אפס, למשל: "(+0) 690". היא הקריאה את התרגיל, ואחרי שקיבלה מהנסיינית אישור שהקריאה אותו נכון – אמרה את התשובה (בדוגמה זו: 6,900). תהליך האישור נועד למנוע טעויות שנובעות מהנתח היוזאלי, ולמקד את המטלה רק בייצוג המבנה המרכזי ובפלט המילולי. בנוסף, כדי להקל עוד יותר על הנתח הוויזאלי, הפריטים הופיעו עם פסיק המפריד בין ספרת המאות לאלפים. אם קיים ליקויי ברכיב ייצוג מבנה מרכזי או ברכיבי פלט המילולי נצפה לראות טעויות תחביריות. התוצאות במטלה זו הושאו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 36 משתתפים בגיל 27.3 (ס"ת 6.3).

תוצאות. דפוס התוצאות היה זהה למטלת "מיזוג ספרות". כמות הטעויות התחביריות של SH, LA ו-LB היתה בטווח התקין, מה שמצביע על תפקוד תקין של ייצוג המבנה המרכזי. שיעור הטעויות התחביריות של NS היה גבוה יותר (טבלה 10), אך עדיין לא שונה מקבוצת הביקורת (one-tailed $p = .19$, $t(35) = 0.88$).

טבלה 10. אחוז הטעויות במטלת "יודעים 10", שבדוקת את ייצוג המבנה המרכזי. אצל כל המשתתפות פרט ל-NS, אחוז הטעויות התחביריות היה בטווח התקין.

משתתפת	NS	LB	LA	SH	ביקורת ממוצע (סטיית תקן)
מיקום ליקוי	פלט ספרות	פלט ספרות	קלט מילולי	קלט מילולי	
סה"כ טעויות	10	1.6	0	3.3	4.4 (4.6)
טעויות מבנה	8.3	1.6	0	3.3	4.2 (4.6)
החלפת ספרה כולל הכפלות	0	0	0	0	0.1 (0.4)
סדר ספרות	1.6 ^{***}	0	0	0	0.09 (0.3)
קטגוריה: עשרוני ספרה 1	3.3	1.6	0	1.6	1.9 (2.3)
קטגוריה: עשרוני אחר	0	0	0	1.6	2.2 (4.1)
אלף	5 ^{***}	0	0	0	0.3 (0.8)

^{***} one-tailed $p < .001$

השוואה לקבוצת ביקורת:

3.4.4. סיכום ביניים

למשתתפות LA ו-NS לא היו הרבה טעויות תחביריות בקריאה – כלומר, רכיב ייצוג המבנה המרכזי שלהן תקין. אצל LA, תמיכה נוספת בכך התקבלה גם מהמטלות האחרות שבדקו את ייצוג המבנה המרכזי – מיזוג ספרות ו"יודעים 10". אצל NS אחוז הטעויות התחביריות בשתי המטלות האלה היה מעט גבוה – "במטלות יודעים 10" רמת התפקוד שלה היתה בטווח הנמוך של הנורמה, ובמטלת מיזוג ספרות הקושי היה על סף מובהקות. ייתכן שהטעויות במטלות אלה נבעו מעומס הזיכרון שהן יוצרות (כיוון שלא רואים את המספר שיש לומר), במיוחד במטלת "מיזוג ספרות", כיוון של-NS יש קיבולת נמוכה של זיכרון פעיל (ספאן ספרות לאחר $z = -1.28$). לגבי השאלה המרכזית לענייננו – האם רכיב המבנה המרכזי תקין או לא – כיוון שהתפקוד של NS במטלת הקריאה היה תקין, והתפקוד במטלות הנוספות שדורשות את רכיב המבנה המרכזי (יודעים 10, מיזוג ספרות) לא היה מאד נמוך אלא גבולי, סביר להניח שרכיב המבנה המרכזי תקין, והטעויות לא נובעות ממנו אלא ממנגנון אחר.

למשתתפות SH ו-LB היה שיעור מעט גבוה של טעויות תחביריות במטלת הקריאה בקול ($z = -1.88$). עם זאת, ב-2 המטלות הנוספות שבדקו את ייצוג המבנה המרכזי ואת הפלט המילולי, "מיזוג ספרות" ו"יודעים 10", אחוז הטעויות התחביריות שלהן היה בטווח התקין. המסקנה היא שהטעויות התחביריות שלהן בקריאה לא נובעות בליקוי בייצוג המבנה המרכזי אלא, ככל הנראה, מליקוי באחד מרכיבי המבנה בנתח היוזאלי. כדי לבסס את המסקנה הזאת עוד יותר, העברנו למשתתפות אלה מטלות שבדקו את הנתח היוזאלי.

3.4.5. בדיקת תהליכי המבנה בנתח היוזאלי

בנתח היוזאלי יש 3 תהליכים תחביריים: זיהוי מיקומי הספרות 0 ו-1, קביעת אורך המספר ואופן חלוקת המספר לשלוש. בנוסף יש בו גם 2 תהליכים שלא מקודדים מידע תחבירי אלא את זהות הספרות ואת סדרן (Dotan & Friedmann, 2018).

הטעויות התחביריות של המשתתפות SH ו-LB היו בעיקר טעויות מסוג הזזה עשונית בספרה הראשונה. אם דפוס טעויות זה נובע מליקוי באחד מרכיבי הנתח, הרכיבים שליקוי בהם עלול להוביל לדפוס זה הם רכיב זיהוי אורך המספר ורכיב החלוקה לשלוש. לפיכך ערכנו בירור של שני הרכיבים האלה. השתמשנו במטלות שדורשות ניתוח ויזאלי של רצף הספרות, אבל לא כוללות פלט מילולי של מילות מספר.

בנוסף, הועברו גם מטלות נוספות לבדיקת תפקודים אחרים של הנתח היוזאלי. במטלות אלה לא נדון כאן והן מופיעות בנספח ב'.

3.4.5.1. מטלת קריאה עם פסיק

שיטה. המשתתפות קראו בקול 120 מספרים שהוצגו עם פסיק מפריד בין ספרת המאות לאלפים. הפסיק אמור להקל על רכיב החלוקה לשלוש ועל רכיב קידוד אורך המספר, כלומר אם למשתתפת יש ליקוי באחד הרכיבים האלה, היא צפויה לעשות פחות טעויות תחביריות במטלה זו מאשר במטלת הקריאה-בקול הרגילה (ללא פסיק, סעיף 3.4.1). הפריטים היו אותם פריטים ממטלת הקריאה הרגילה.

תוצאות. שתי המשתתפות עשו פחות טעויות תחביריות כאן מאשר בקריאה רגילה (LB: 6.6%, McNemar one-tailed $p = .002$; SH: 3.3%, McNemar one-tailed $p = .03$). ממצא זה תואם את ההנחה שהליקוי שלהן הוא בנתח היוזואלי – או ברכיב קידוד אורך המספר או ברכיב החלוקה לשלשות.

אצל SH, הירידה בשיעור הטעויות התחביריות הובילה גם לשיעור טעויות כללי נמוך יותר, שהגיע לטווח הנורמה (5%). אצל LB, שיעור הטעויות הכללי נותר גבוה (18%), בעיקר בגלל טעויות מסוגים אחרים (סדר: 6%, החלפה: 6%), שלא נעסוק בהן כאן.

3.4.5.2. רכיב חלוקה לשלשות בנתח היוזואלי: מטלת "איפה הפסיק"

שיטה. המשתתפת ראתה 44 מספרים רב ספרתיים באורכים שונים והתבקשה לסמן, מהר ככל האפשר, את הפסיק במקום המתאים בין ספרת המאות לספרת האלפים בכל אחד מהמספרים. המטלה בודקת את הרכיב בנתח היוזואלי שאחראי על חלוקת רצף הספרות לשלשות בהתאם למבנה העשרוני של המספר (כלומר עם גבול שלשה בין ספרת המאות לאלפים). המספרים הודפסו על דף A4, וכדי למנוע אסטרטגיה יוזואלית, הודפסו בפונטים שונים בגדלים שונים. התוצאות הושאו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 28 משתתפים בגיל 26 (ס"ת 3.7). הוצאנו מקבוצת הביקורת 3 משתתפים שהיו outliers (מעל 7.7% טעויות). שיעור הטעויות הממוצע בקבוצת הביקורת היה 2.3% (ס"ת 1.9), ואחוז ההיסוסים היה אפסי.

תוצאות. ל-SH היו 6 טעויות (14%) – שיעור טעויות גבוה מזה של קבוצת הביקורת (SH בקריאת מספרים נובעות מליקוי ברכיב החלוקה לשלשות בנתח היוזואלי. ל-LB לא היו טעויות, אבל היו לה 3 היסוסים, תופעה שלא נצפתה כלל בקבוצת הביקורת. כלומר, ייתכן שגם הטעויות שלה נובעות מליקוי ברכיב החלוקה לשלשות.

3.4.5.3. רכיב קידוד אורך המספר בנתח היוזואלי: מטלת זהה-שונה

שיטה. בכל צעד, המשתתפת ראתה זוג מספרים רב ספרתיים, אחד אחרי השני, והתבקשה לקבוע האם הם זהים או שונים. בזוגות הקריטיים, שני המספרים נבדלו זה מזה רק בארכם, ללא הבדל בזהות הספרות או בסדרן היחסי (9949-99949, 60 פריטים). בזוגות הביקורת, שני המספרים נבדלו בזהות של ספרה (9949-9959, 60 פריטים) או היו זהים (120 פריטים). כל מספר הופיע על המסך למשך שניה אחת, עם הפסקה של חצי שניה ביניהם. הזוגות הקריטיים בודקים ספציפית את הרכיב בנתח היוזואלי שמזהה כמה ספרות יש במספר. התוצאות הושאו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 21 משתתפים בגיל 25.8 (ס"ת 5.0). הוצאנו מקבוצת הביקורת משתתף אחד שהיה outlier (מעל 12% טעויות).

תוצאות. כמות הטעויות שביצעו LB ו-SH בזוגות הקריטיים לא הייתה גבוהה מזו של קבוצת הביקורת (טבלה 11). ממצא זה מצביע על תפקוד תקין של רכיב קידוד אורך המספר.

טבלה 11. אחוז הטעויות במטלת זהה-שונה שבודקת את רכיב קידוד אורך המספר

משתתפת	LB	SH	ביקורת ממוצע (סטיית תקן)
מיקום ליקוי	פלט ספרתי	קלט מילולי	
זוגות קריטיים: נבדלים באורך המספר	3	5	4.4(4.5)
זוגות נבדלים בזהות ספרה	25***	2	2.7(2.8)
זוגות זהים	4	3	5.1(6.1)

***one-tailed $p < .001$

השוואה לקבוצת ביקורת:

3.4.5.4. סיכום ביניים: תפקוד הנתח היוזואלי

אצל שתי המשתתפות, LB ו-SH, שיעור הטעויות העשרוניות בקריאה בקול של מספרים היה נמוך יותר כאשר המספרים הוצגו עם פסיק מפריד בין ספרת המאות לאלפים – מניפולציה ויזואלית שאמורה להשפיע על הנתח היוזואלי – וגבוה יותר במספרים ללא פסיק. שתיהן גם התקשו במטלת "איפה הפסיק", שבודקת את רכיב החלוקה לשלוש: ל-SH היו טעויות, ול-LB לא היו טעויות אך נצפתה איטיות בביצוע. המסקנה היא שהטעויות שלהן בקריאה נובעות מליקוי באחד מרכיבי התחביר בנתח היוזואלי – ספציפית, רכיב החלוקה לשלוש. התפקוד התקין שהפגינו 2 המשתתפות במטלה לבדיקת רכיב קידוד אורך המספר (מטלת זהה שונה) מעיד כי רכיב קידוד האורך תקין אצל שתיהן, והוא לא מקור הטעויות.

ממצא זה מחזק את המסקנה לפיה למרות שלמשתתפות LB ו-SH היו טעויות תחביריות גם בהכתבה וגם בקריאה בקול של מספרים, אין להן ליקוי בייצוג המבנה המרכזי של המספר – המנגנון התחבירי המשותף לשתי המטלות, אלא הטעויות התחביריות נובעות ממקורות שונים בכל אחת משתי המטלות. במטלת קריאה בקול, הטעויות התחביריות נובעות מליקוי סלקטיבי בנתח היוזואלי, תהליך שמעורב ספציפית בקריאה ולא משפיע על מטלת ההכתבה. במטלת ההכתבה, הטעויות התחביריות נובעות ממקור שונה אצל כל אחת משתי המשתתפות – ליקוי במנגנון המבנה בפלט הספרתי אצל LB וליקוי במנגנון המבנה בקלט המילולי אצל SH.

4. דיון

מטרת המחקר הייתה לבדוק לעומק את המנגנונים הקוגניטיביים המעורבים בכתיבה של מספרים, ובאופן ספציפי לאתר מהם המנגנונים התחביריים המעורבים בכתיבת מספרים. בדקנו האם ניתן לזהות מנגנונים תחביריים ספציפית בשלב הקלט המילולי ובשלב הפלט הספרתי. לצורך כך, בדקנו את תפקודן של 4 משתתפות שמבצעות טעויות תחביריות רבות בכתיבה של מספרים רב ספרתיים משמיעה. הממצאים הצביעו על כך שאכן ניתן להבחין בין מנגנונים לקסיקליים לתחביריים, לא רק באופן כללי אלא גם ספציפית בתוך תהליכי הקלט השמיעתי ובתהליכי הפלט הספרתי.

4.1. מנגנוני תחביר בקלט המילולי ובפלט הספרתי

4.1.1. ליקויים ספציפיים במנגנוני התחביר

לכל המשתתפות היה ליקוי באחד המנגנונים התחביריים שמעורבים בכתיבה. מסקנה זו נסמכת על שני ממצאים: ראשית, לכולן היו טעויות תחביריות רבות בהכתבה, ומעט מאד טעויות לא-תחביריות. שנית, אחוז הטעויות התחביריות היה נמוך יותר בהכתבת מספרים עם מבנה תחבירי פשוט, וגבוה יותר בהכתבת מספרים עם מבנה תחבירי מורכב. אפקט המורכבות התחבירית נמצא גם בהשוואה בין הכתבה רגילה להכתבה מפוצלת, וגם בנייתוח הפריטים בתוך מטלת ההכתבה הרגילה.

למשתתפות NS ו-LB היה ליקוי סלקטיבי במנגנוני המבנה בפלט הספרתי, עם תפקוד תקין של מנגנוני המבנה בקלט המילולי ושל רכיב ייצוג המבנה המרכזי: הן הפגינו תפקוד תקין במטלות שדרשו קלט מילולי וייצוג מרכזי (מטלת חזרה מעוכבת, מטלת "חמש-בש" שדרשה זיהוי מילה חסרה במספר), ותפקוד לקוי במטלה שדרשה גם שימוש במנגנוני הפלט ספרתי (מטלת שיבוץ ספרות). לעומתן, המשתתפות SH ו-LA הציגו דפוס הפוך, שהצביע על ליקוי במנגנון המבנה בקלט המילולי ותפקוד תקין של הייצוג התחבירי המרכזי ומנגנוני התחביר בפלט הספרתי: היו להן טעויות תחביריות רבות במטלות שדרשו קלט מילולי וייצוג מבנה מרכזי, ותפקוד תקין במטלה שדרשה ייצוג מבנה מרכזי ופלט ספרתי.

יחדיו, שני זוגות המשתתפות – NS ו-LB עם ליקוי תחבירי סלקטיבי בפלט הספרתי, ו-SH ו-LA, עם ליקוי תחבירי סלקטיבי בקלט המילולי, מהוות דיסוציאציה כפולה בין מנגנוני העיבוד התחבירי בקלט המילולי ובפלט הספרתי. המסקנה היא שקיימים מנגנונים נפרדים לעיבוד המבנה התחבירי בקלט ובפלט: מנגנון אחד מעבד את המבנה של המספר המילולי בשלב הקלט המילולי, ומנגנון נפרד מעבד את המבנה התחבירי של רצף הספרות בשלב הפלט הספרתי.

מנגנון תחבירי נוסף הוא הייצוג המרכזי של מבנה המספר. במחקר הנוכחי לא הראינו ליקוי סלקטיבי במנגנון זה, אבל ליקוי כזה נמצא במחקרים אחרים (Handelsman & Dotan, 2023b).

מסקנות אלה מתיישבות עם טענות של מחקרים קודמים לגבי ליקויים סלקטיביים במנגנוני התחביר בפלט הספרתי לצד פלט מילולי תקין (Cipolotti & Butterworth, 1995; Cipolotti et al., 1994; Delazer & Denes, 1998; Granà et al., 2003; McCloskey et al., 1985; Noel & Seron, 1995). המחקר הנוכחי גם מחדש ב-2 היבטים. היבט אחד הוא מציאתו של ליקוי סלקטיבי במנגנון תחבירי ברמת הקלט השמיעתי – ממצא שדווח כאן בפעם הראשונה ולא דווח במחקרים קודמים. ההיבט השני

קשור למהימנות האבחנה של הליקוי התחבירי הסלקטיבי בפלט: האבחנה הזאת היא יותר מהימנה כאן, כיוון ששיפרנו את המחקרים הקודמים במספר היבטים מתודולוגיים. ראשית, כדי להוכיח שהקלט תקין והליקוי התחבירי הוא בפלט, השתמשנו בבדיקה מעמיקה יותר, שכללה מגוון גדול של פריטים במבנים תחביריים שונים. שיפור זה נדרש כיוון שהמחקרים הקודמים שהציגו מסקנות דומות השתמשו במבנים פשוטים-מדי, או שלא היה פירוט של מאפייני הפריטים (Cipolotti et al., 1994; Granà et al., 2003; McCloskey et al., 1985), אבל כמו שראינו כאן, שימוש בפריטים מורכבים מבחינה תחבירית עשוי להיות קריטי כדי לזהות את קיומו של ליקוי. שנית, עשינו בקרה על ליקוי בזיכרון כמשתנה מתערב. כמו שראינו כאן, עומס זיכרון הוא משתנה מתערב שמשפיע על התוצאות; בחלק מהמחקרים הקודמים לא נעשתה ביקורת כזאת, לכן אין לדעת אם הקושי של המשתתפים היה תחבירי או בזיכרון (Delazer & Denes, 1998; Noel & Seron, 1995). שלישית, עשינו בקרה על שימוש באסטרטגיות פיצוי שונות בהן המשתתפים עשויים להשתמש במהלך המטלות על מנת לעקוף את הקושי. באופן ספציפי, מטלת חזרה מיידית מאפשרת שימוש באסטרטגיה פונולוגית, של חזרה על סמך ייצוג פונולוגי שטחי (חזרה על הצלילים) תוך "עקיפת" ייצוגי המבנה; וגם במטלת זהה-שונה שמיעתי המשתתפות מצליחות להפעיל אסטרטגיה פונולוגית ולעקוף את ייצוג המבנה (ומשום כך לא דיווחו כאן על הממצאים של מטלה זו) (Cipolotti & Butterworth, 1995; Delazer & Denes, 1998; Granà et al., 2003; Noel & Seron, 1995).

4.1.2. בקרה על משתנים מתערבים

בניתוח מיקומי הליקוי, הקפדנו לערוך בקרה על עקרונות מתודולוגיים שאמורים לתת מענה למשתנים מתערבים שעלולים להשפיע על תפקוד המשתתף במטלות ועל אופן ניתוח הנתונים. ספציפית, זיכרון ושימוש באסטרטגיות.

כדי לוודא שהממצאים לא מוטים ע"י קיבולת זיכרון נמוכה של המשתתפות, השתמשנו ב-3 טכניקות. ראשית, כל המשתתפות עמדו בסף מסוים של קיבולת זיכרון לטווח קצר (ציון של 5 ומעלה במטלת ספאן ספרות לפני, Gvion & Friedmann, 2008). שנית, במטלות שיוצרות עומס על הזיכרון הקפדנו לא לכלול פריטים עם יותר מ-5 מילות מספר, שעלולים להעמיס על הזיכרון. שלישית, מטלת ההכתבה נבנתה כך שתכלול גם פריטים עם הרבה מילים, שמעמיסים על הזיכרון, וגם פריטים עם מעט מילים, והתייחסנו למשתנה זה בניתוח הטעויות התחביריות כדי לוודא שהזיכרון לא מהווה הסבר אלטרנטיבי לטעויות אלה.

לגבי אסטרטגיות, השימוש בהן עלול לפגוע בתקפות הממצאים כיוון שישנן אסטרטגיות פיצוי שונות בהן ניתן להשתמש על מנת לעקוף את הקושי שנגרם כתוצאה מהליקוי. כדי להתמודד עם אפשרות זו, השתמשנו בשתי טכניקות שמקשות על שימוש באסטרטגיה. ראשית, ברוב המטלות הכנסנו הגבלת זמן, כיוון שהרבה אסטרטגיות דורשות זמן כדי להפעיל אותן (למשל, לדמיין את המספר ו"לכתוב אותו מהדמיון", או לחזור פונולוגית על המספר). במטלות בהן לא היתה הגבלת זמן, עדיין דרשנו תגובה מיידית והתייחסנו למצבים של היסוס לפני התגובה. טכניקה שניה, שנועדה ספציפית למנוע שימוש באסטרטגיות פיצוי מילוליות (דיבור פנימי או חזרה פונולוגית), היתה שימוש בארטיקולציה מדכאת (למשל במטלת "שיבוץ ספרות").

4.2. דיסוציאציה בין קריאת מספרים לכתיבת מספרים

המשתתפות NS ו-LA הפגינו תפקוד תקין במטלת קריאת מספרים לצד טעויות תחביריות רבות במטלת הכתבה. דפוס זה תואר גם במחקרים נוספים (Lochy et al., 2003; Cipolotti et al., 1994; MCloskey et al. 1985: הניבדק VO). דיסוציאציה זו מצביעה על כך שיש תהליכים תחביריים שונים המעורבים בקריאת מספרים ובכתיבתם. הליקוי הספציפי של המשתתפת NS היה במנגנוני התחביר בפלט הספרתי, והליקוי הספציפי של LA היה במנגנוני התחביר בקלט המילולי – כלומר שני המנגנונים הספציפיים האלה מעורבים בהכתבת מספרים אבל לא מעורבים בקריאה בקול.

הממצאים האלה שוללים את האפשרות של מנגנונים תחביריים משותפים לקלט ולפלט, או לעיבוד מילולי וספרתי. ספציפית, הם שוללים 4 אפשרויות: שקיים מנגנון תחבירי יחיד שאחראי על כל סוגי הקלט – גם ספרתי וגם מילולי; שקיים מנגנון תחבירי אחד יחיד שאחראי על כל סוגי הפלט, ספרתי ומילולי; שקיים מנגנון תחבירי יחיד שאחראי על כל העיבוד המילולי, גם בקלט וגם בפלט; או שקיים מנגנון יחיד שאחראי על כל העיבוד הספרתי, גם בקלט וגם בפלט.

4.3. דיסוציאציה בין כתיבת מילים לכתיבת מספרים

שתי המשתתפות, SH ו-LB, בצעו טעויות תחביריות רבות במטלת הכתבת מספרים. לעומת זאת, לא היו להן טעויות במטלת הכתבת מילים ומילות תפל. משתתפות אלה מצטרפות ל-3 מקרים שכבר תוארו בספרות של ליקוי ספציפי בכתיבת מספרים ללא ליקוי בכתיבת מילים (Cipolotti et al., 1994; Granà et al., 2001; Noel & Seron, 1995). בדומה ל-3 עדויות אלה ממחקרים קודמים, גם במחקר הנוכחי הליקוי של המשתתפות בכתיבת מספרים היה בתהליכים התחביריים, ספציפית אצל SH במנגנון התחבירי בקלט המילולי ואצל LB במנגנון התחבירי בפלט הספרתי.

עד כה לא תוארו עדויות משכנעות של הדפוס ההפוך – קושי בכתיבת מילים ללא קושי בכתיבת מספרים. במחקרים בהם כן תואר דפוס כזה, תוארה דיסוציאציה בין כתיבת ספרות ואותיות (Anderson et al., 1990; Delazer et al., 2002; Granà et al., 2001), או בין כתיבת מילים לכתיבת מספרים קטנים יחסית, בטווח 1-20, שהמבנה התחבירי שלהם פשוט (Zangwill, 1954). יוצא דופן הוא Anderson et al. (1990), שבדק גם כתיבה של מספרים בני 2-5 ספרות, אך המאפיינים התחביריים של המספרים לא פורטו.

במחקר הנוכחי הראינו דיסוציאציה בין תהליכי כתיבה של מילים ומספרים. מחקרים אחרים הראו דיסוציאציה בין מילים למספרים גם בתהליכי הקריאה, בשני הכיוונים – קריאת מילים תקינה וקריאת מספרים לקויה, ולהיפך (Anderson et al., 1990; Cipolotti, 1995; Cipolotti et al., 1995; Dotan & Friedmann, 2019). כל הדיסוציאציות האלה מצביעות על כך שהיכולות לקריאת מילים ומספרים הינן יכולות נפרדות המסתמכות על מנגנונים קוגניטיביים שונים ומסלולי עיבוד נפרדים – גם בקריאה וגם בכתיבה.

4.4. מודל לכתיבת מספרים

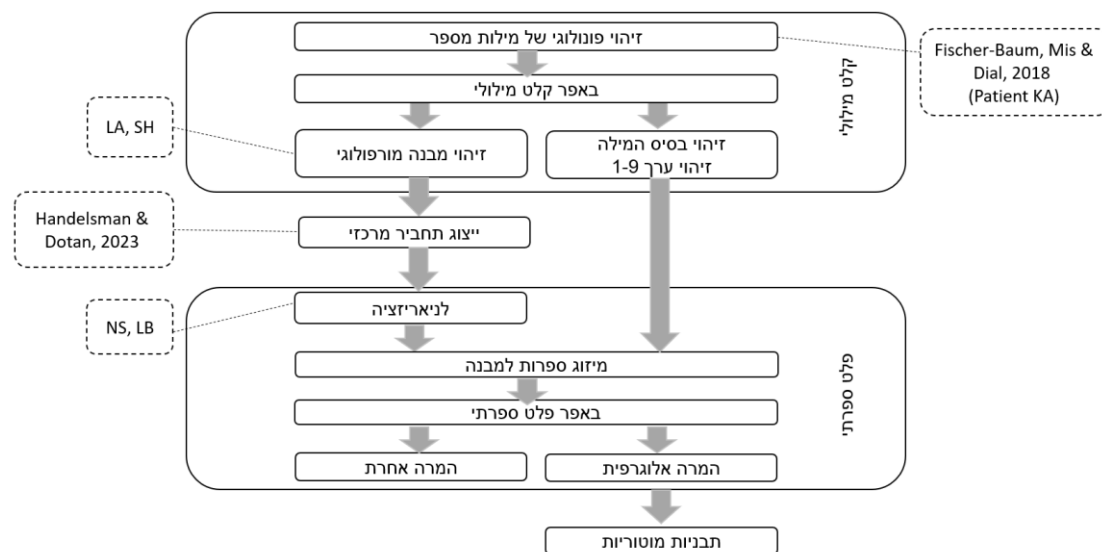
להלן אנו מציעים מודל קוגניטיבי מפורט של המנגנונים הקוגניטיביים המעורבים בכתיבת מספרים משמיעה (תרשים 4). המודל מתבסס על מודלים קודמים, בעיקר (McCloskey et al., 1985), ולוקח בחשבון את הממצאים של המחקר הנוכחי ומחקרים קודמים.

שתי הבחנות בסיסיות במודל הן בין מנגנוני קלט מילולי ומנגנוני פלט ספרתי ולמנגנונים לקסיקליים (Benson & Denckla, 1969; McCloskey et al., 1985; Singer & Low, 1933); ובין מנגנונים תחביריים (Benson & Denckla, 1969; Cipolotti et al., 1994; Deloche & Seron, 1982; Granà et al., 2003; McCloskey et al., 1985; Noel & Seron, 1995; Power & Dal Martello, 1990; Singer & Low, 1933).

השלב הראשון במודל הוא הקלט המילולי-פונולוגי. שלב זה מעבד את מילות המספר המושמעות בעזרת מספר רכיבים. ראשית, אנו מזהים את כל אחת ממילות המספר. מנגנון זה הוא נפרד ממנגנון העיבוד הראשוני של מילים מושמעות (Fischer-Baum et al., 2018). המילים שזוהו נשמרות בבאפר קלט מילולי – רכיב זיכרון שמחזיק את האינפורמציה הפונולוגית לזמן קצר על מנת לאפשר את העיבוד שלה. המידע בבאפר הקלט מעובד ע"י שני תהליכים: רכיב אחד, תחבירי, מזהה את המוספית המורפולוגית של מילת המספר, שקובעת את הקטגוריה שלה (יחידות, עשרות, מאות, אלפים, עשרה). הרכיב השני, הלקסיקלי, מזהה את בסיס המילה (ערך 1-9).

המידע המורפולוגי לגבי מילות המספר מאפשר ליצור את הייצוג המרכזי של המבנה התחבירי של המספר (Handelsman & Dotan, 2023b). הייצוג הזה מופשט במובן זה שהוא לא מילולי ולא ספרתי. הוא מתאר את מבנה המספר בצורה היררכית, מעין "עץ תחבירי" (מנדלסון-ברש, 2020), בדומה לעץ התחבירי שמתאר את המבנה התחבירי של משפטים (Chomsky, 1956). בשלב הבא, רכיב הליניאריזציה יוצר – על סמך הייצוג התחבירי המרכזי – את המבנה הספרתי של המספר. ייצוג זה כולל, לכל הפחות, את המידע לגבי אורך המספר ומיקום האפסים בו. המידע הזה עובר מיזוג עם המידע הלקסיקלי של ערכי 1-9 של מילות המספר – למעשה, שיבוץ הספרות בתוך המבנה התחבירי. רצף הספרות שנוצר נשמר בבאפר הפלט הספרתי, עובר המרה אלוגרפית לצורה הספציפית של הספרה, ומתורגם לתבניות מוטוריות הדרושות לכתיבה.

לגבי חלק מהתהליכים הללו, ישנם עדויות כי אלה הם תהליכים נפרדים מעיבוד מילים כלומר הם ספציפיים לעיבוד של מספרים: זיהוי מבנה מורפולוגי (Fischer-Baum et al., 2018), ייצוג מבנה מרכזי (Handelsman & Dotan, 2023b), זיהוי מבנה מורפולוגי וליניאריזציה (המשתתפות SH, LB במחקר זה) והמרה אלוגרפית (Delazer et al., 2002).



תרשים 4. מודל לכתיבת מספרים

4.5 דיסנומריה בכתיבה

ליקוי בכל אחד מהמנגנונים הנ"ל נקרא דיסנומריה, ויגרום לטעויות בהבנה או כתיבה של מספרים (המונח "דיסנומריה" משמש גם לתאר ליקויי בקריאה, Dotan & Friedmann, 2018). ליקויים במנגנונים שונים במודל – סוגים שונים של דיסנומריה – יגרמו לדפוסי טעויות שונים, וישפיעו על התפקוד במטלות שונות, בהתאם למנגנונים הנדרשים עבור כל מטלה. להלן נפרט את הליקויים האפשריים השונים ואת דפוס הטעויות המשוער בהינתן כל ליקוי.

ליקוי בכל אחד ממנגנוני הקלט המילולי-פונולוגי יפגע במטלות הדורשות הבנת מספרים משמיעה. ליקוי ברכיב הזיהוי הפונולוגי של מילות מספר (דיסנומריית זיהוי פונולוגי) יגרום ללקות בזיהוי של מילות המספר, ויוביל לטעויות של החלפת מילת מספר במילה אחרת – בין אם ההחלפה היא של זהות הספרה או של הקטגוריה של מילת המספר. ליקוי ברכיב זיהוי בסיס המילה (דיסנומריית זיהוי מילולי-לקסיקלי) יגרום לזיהוי שגוי של בסיס מילת המספר המושמעת, ויוביל לטעויות מסוג החלפת ספרה. ליקוי ברכיב זיהוי מבנה מורפולוגי (דיסנומריית זיהוי מורפולוגי) יגרום לזיהוי שגוי של המוספית המורפולוגית של מילת המספר, ויוביל לטעויות תחביריות – החלפות, שיכולים, הוספות והשמטות של הספרה 0.

ליקוי בייצוג המבנה המרכזי של המספר (דיסנומריית מבנה מרכזי) יגרום לטעויות תחביריות. הייצוג המרכזי משותף לקריאה וכתובה של מספרים, לכן נצפה לטעויות כאלה גם בקריאה וגם בכתיבה, וגם במטלות שדורשות קלט או פלט מילולי או קלט או פלט ספרתי, כל עוד יש שימוש גם בייצוג המבנה המרכזי. עם זאת, לא נצפה לטעויות במטלות שדורשות שימוש רק בשלבים הראשונים של הקלט, ולא מחייבות להעביר את המידע לייצוג המרכזי – לדוגמה, הכרעת זהה-שונה (בין אם הגרוי מוצג בספרות או במילים).

ליקוי בכל אחד ממנגנוני הפלט הספרתי יפגע במטלות הדורשות הפקה בכתב של מספרים. ליקוי ברכיב הליניארזציה בפלט (דיסנומריית ליניארזציה ספרתית) יגרום לשיבוש המבנה של רצף הספרות, של

מיקום האפס במספר ושל אורך המספר; ברמה הקונקרטית-יותר, זה יתבטא בטעויות בספרה 0 (הוספות והמשטות, החלפות שיכולים של 0 עם ספרה אחרת) ובחלוקה שגויה של רצף הספרות לשלשות. ליקוי ברכיב מיזוג ספרות למבנה (דיסנומריית מיזוג ספרות) יפגע באינטגרציה שבין הספרות לתבנית ויוביל לטעויות מסוג החלפת ספרה ושיכולים של הספרות 0-9, כמו כן אולי יופיעו גם טעויות של הוספה והשמטה של ספרות. ליקוי ברכיב באפר הפלט הספרתי (דיסנומריית באפר פלט ספרתי) יגרום לקושי בשמירה של רצף הספרות, כך שהמידע ישמר בצורה חלקית או לא מדויקת. דפוס הטעויות שעלולים להופיע הם החלפות, שיכולים, הוספות והשמטות של כל הספרות 0-9. ליקוי ברכיב המרה אלוגרפית יגרום לקושי בבחירת צורת הספרה הספציפית ובעיצובה. לבסוף, ליקוי בתבניות המוטוריות יגרום לשיבוש של צורת הספרות ויבוא לידי ביטוי לא רק בכתיבת ספרות אלא גם בכתיבת אותיות ומילים.

4.6. השלכות – אבחון דיסנומריה וטיפול בה

דיסנומריה היא לקות שפוגעת ביכולת לכתוב או לקרוא מספרים (או בשתייהן). היא נגרמת בעקבות ליקוי באחד המנגנונים הקוגניטיביים האחראיים על קריאה או כתיבה של מספרים. באבחון יש לשים לב כי דיסנומריה בכתיבה היא לקות ספציפית ומובחנת, שעשויה להופיע בנפרד מהלקויות האחרות – ללא דיסגרפיה (SH, LB) וללא דיסנומריה בקריאה של מספרים (LA, NS).

כדי לסייע באבחון דיסנומריה, פיתחנו במסגרת המחקר הנוכחי סוללת אבחון שמאפשרת לבדוק האם קיימת דיסנומריה בכתיבת מספרים ולזהות את הסוג המדויק שלה ("מים כתיבה", דותן, הנדלסמן וכהן, 2022). הסוללה כוללת 5 מטלות (הכתבה רגילה, הכתבה מפוצלת, הכתבת ספרה ספרה, חמש-בש ושיבוץ ספרות), ונתוני ביקורת של 164 משתתפים במטלות השונות. הסוללה נגישה ב-<http://www.mathinklab.org/mim>.

המחקר הנוכחי לא עסק בדרכי הטיפול בדיסנומריה, עם זאת, מעצם היותה לקות נפרדת וספציפית שעשויה להופיע בנפרד מלקויות אחרות, ניתן לשער כי נדרש לה טיפול ייעודי. כמו כן, סביר להניח כי נדרש טיפול שונה לסוגי דיסנומריה שונים. לדוגמא, טיפול בדיסנומריה שמקורה בלקות בתהליכים לקסיקליים תהיה שונה מטיפול בדיסנומריה שנובעת מלקות בתהליכים התחביריים (Benson & Denckla, 1969; Cipolotti et al., 1994; Deloche & Seron, 1982; Granà et al., 2003; McCloskey et al., 1985; Noel & Seron, 1995; Power & Dal Martello, 1990; Singer & Low, 1933). גם הטיפול בדיסנומריה שנובעת מלקות בתהליכים תחביריים עשוי להיות שונה בהתאם לשלב העיבוד התחבירי בו קיים הליקוי – למשל, סביר להניח שטיפול בדיסנומריה שנגרמת עקב לקות בתהליכי העיבוד בקלט יהיה שונה מטיפול בדיסנומריה שנובעת מלקות בעיבוד התחבירי בפלט. זיהוי מדויק של מיקום הליקוי עשוי להיות חשוב כדי להתאים את הטיפול המתאים.

למרות האמור לעיל, ישנם מקרים ספציפיים בהם הטיפול בלקויות הכתיבה עשוי להיות משותף לטיפול בלקויות אחרות. מצב זה צפוי לקרות כאשר יש ליקוי במנגנון קוגניטיבי שמשרת גם כתיבת מספרים וגם תפקודים אחרים. לדוגמא, אם הקושי נובע מליקוי ספציפי ברכיב המבנה המרכזי (רכיב המשותף לקריאה ולכתיבה של מספרים), טיפול שיינתן לליקוי זה אמור להועיל גם לקריאה וגם לכתיבה של

מספרים. מקרה נוסף כזה עשוי להיות ליקוי באחד המנגנונים הפריפראליים שלוקחים חלק גם בכתיבה של מספרים וגם בכתיבה של מילים. לדוגמא, דיסנומריה שנובעת מליקוי ברכיב תבניות מוטוריות. גם כאן, הקושי בעצוב ושיבוש צורת הספרה עלול לבוא לידי ביטוי גם בכתיבת מילים ואותיות ואז הטיפול עשוי להיות משותף.

למרות שהמחקר הנוכחי לא בדק איך כדאי לטפל בלקויות בכתיבת מספרים, חלק מהמצאים שלנו עשויים להצביע על כיווני התמודדות אפשריים. המשתתפות LA ו-LB הפגינו שיפור באחוז הטעויות התחביריות במטלת הכתבת מספרים לאורך המחקר. אנו משערים כי שיפור זה חל בעקבות האימון האינטנסיבי בכתיבת מספרים שנעשה לאורך המפגשים (כל אחת מהן כתבה 514 מספרים במסגרת המחקר). השיפור לא היה תלוי במיקום הספציפי של הליקוי; לשתי המשתתפות מיקום ליקוי שונה. הליקוי הספציפי של LA היה במנגנוני התחביר בקלט המילולי, והליקוי הספציפי של LB היה במנגנוני התחביר בפלט הספרתי. נראה שאפילו אימון פשוט וקצר יחסית של כתיבת מספרים במבנים תחביריים שונים ובאזורים שונים עשוי להשיג ירידה משמעותית באחוז הטעויות התחביריות. לממצא זה, "שיפור ספונטני" במהלך האבחון, יש גם חשיבות מתודולוגית לגבי אופן העברת אבחון דיסנומריה והסקת המסקנות ממנו: על המאבחנת לשים לב למועד העברת המטלה כמשתנה מתערב פוטנציאלי.

עם זאת, אימון מהסוג הנ"ל לא עוזר בכל המקרים – למשל, אצל המשתתפת NS לא היה שיפור. מכאן עולה השאלה: למי אימון עוזר ולמי לא, מתי ולמה? שאלה נוספת שעולה היא מה טכניקת האימון הרצויה: האם יש להציג מבנים תחביריים מעורבים (כמו שנעשה במחקר זה) או ללמוד באופן הדרגתי, כלומר בכל שלב לומדים מבנה תחבירי ספציפי?

סוגיה נוספת שיש להתחשב בה באבחון ובטיפול של לקויות בכתיבת מספרים היא האם למאבחן יש מספיק ידע לגבי המבנה העשירי של המספר. חוסר ידע עשוי לבוא לידי ביטוי בטעויות בכתיבה ובקריאה של מספרים. יש לשים לב כי כיוון שהקושי העיקרי בעיבוד מספרים הוא קושי תחבירי – לפחות בקריאה (Handelsman & Dotan, 2023b), ולפי נתוני הביקורת שהצגנו כאן, גם בכתיבה – הידע הרלוונטי הוא בדרך כלל ידע תחבירי. בנוסף, יש לשים לב כי הידע הרלוונטי אינו ידע כללי לגבי מבנה המערכת העשירי (למשל להבין איזו כמות כל מיקום עשירי מייצג, או לדעת לשיים ספרות לפי מיקום עשירי), אלא ידע תחבירי-מילולי ספציפי לגבי האופן בו יש לתרגם מבנה מילולי מסוים לרצף ספרות מסוים או להיפך (שליט, 2022). חוסר ידע כזה מופיע כשלב התפתחותי תקין אצל ילדים, אך במקרים מסוימים ייתכן שיופיע גם אצל מבוגרים. אם הקושי אכן נובע רק מחוסר ידע ולא מליקוי במנגנון קוגניטיבי, הוראה מפורשת של הידע החסר עשויה לגרום לשיפור והפחתה בטעויות בכתיבה ובקריאה של מספרים.

5. ביבליוגרפיה

- גביעון, א., ופרידמן, נ. (2008). פריגבי-סוללה לאבחון זיכרון עבודה פונולוגי. שפה ומוח, 7, 161-181.
- דותן, ד., הנדלסמן, נ., וכהן, ז. (2022). מים – מבדק יכולות מספריות בכתיבה. אוניברסיטת תל אביב.
- דותן, ד., ופרידמן, נ. (2014). מים – מבדק יכולות מספריות. אוניברסיטת תל אביב.
- מנדלסון-ברש, ת. (2020). מודל לכתובת מספרים רב-ספרתיים, המבוסס על ייצוג היררכי תחבירי של המספר. עבודת גמר לקבלת תואר "מוסמך", אוניברסיטת תל אביב.
- פרידמן, נ., גביעון, א., ויכני, מ. (2007). תלתן – סוללת מבדקים לדיסגרפיה. אוניברסיטת תל-אביב
- שליט, א. (2022). כיצד ילדים לומדים לקרוא מספרים: רכישת ידע פורמלי לעומת התפתחות קוגניטיבית. עבודת גמר לקבלת תואר "מוסמך", אוניברסיטת תל אביב.
- Anderson, S. W., Damasio, A. R., & Damasio, H. (1990). Troubled letters but not numbers: Domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex. *Brain*, 113(3), 749–766. <https://doi.org/10.1093/brain/113.3.749>
- Benson, D. F., & Denckla, M. B. (1969). Verbal Paraphasia source of calculation disturbance. *Archives of Neurology*, 21(1), 96–102. <https://doi.org/10.1001/archneur.1969.00480130110011>
- Chomsky, N. (1956). Three models for the description of language. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2(3), 113–124. <https://doi.org/10.1109/TIT.1956.1056813>
- 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. <https://doi.org/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, 375–390. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.124.4.375>
- Cipolotti, L., Butterworth, B., & Warrington, E. K. (1994). From “One thousand nine hundred and forty-five” to 1000,945. *Neuropsychologia*, 32(4), 503–509. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(94\)90094-9](https://doi.org/10.1016/0028-3932(94)90094-9)
- Cipolotti, L., Warrington, E. K., & Butterworth, B. (1995). Selective Impairment in Manipulating Arabic Numerals. *Cortex*, 31(1), 73–86. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(13\)80106-2](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(13)80106-2)
- Crawford, J. R., & Howell, D. C. (1998). Comparing an Individual’s test score against norms derived from small samples. *The Clinical Neuropsychologist*, 12(4), 482–486. <https://doi.org/10.1076/clin.12.4.482.7241>
- Cohen, L., & Dehaene, S. (1991). Neglect dyslexia for numbers? A case report. *Cognitive Neuropsychology*, 8(1), 39–58. <https://doi.org/10.1080/02643299108253366>
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1–2), 1–42.

- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, *1*(1), 83–120.
- Delazer, M., & Denes, G. (1998). Writing Arabic numerals in an agraphic patient. *Brain and Language*, *64*(2), 257–266. <https://doi.org/10.1006/brln.1998.1971>
- Delazer, M., Lochy, A., Jenner, C., Domahs, F., & Benke, T. (2002). When writing 0 (zero) is easier than writing O (o): A neuropsychological case study of agraphia. *Neuropsychologia*, *40*(12), 2167–2177. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00044-1)
- Deloche, G., & Seron, X. (1982). From one to 1: An analysis of a transcoding process by means of neuropsychological data. *Cognition*, *12*(2), 119–149. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(82\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0010-0277(82)90009-9)
- Dotan, D., & Friedmann, N. (2018). A cognitive model for multidigit number reading: Inferences from individuals with selective impairments. *Cortex*, *101*, 249–281. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.10.025>
- Dotan, D., & Friedmann, N. (2019). Separate mechanisms for number reading and word reading: Evidence from selective impairments. *Cortex*, *114*, 176–192. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.05.010>
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., Pagani, L. S., Feinstein, L., Engel, M., Brooks-Gunn, J., Sexton, H., Duckworth, K., & Japel, C. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental Psychology*, *43*(6), 1428–1446. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.6.1428>
- Fischer-Baum, S., Mis, R., & Dial, H. (2018). Word deafness with preserved number word perception. *Cognitive Neuropsychology*, *35*(8), 415–429. <https://doi.org/10.1080/02643294.2018.1515734>
- Granà, A., Girelli, L., Gattinoni, F., & Semenza, C. (2001). Letter and number writing in agraphia: A single-case study. *Brain and Cognition*, *46*(1–2), 149–153. [https://doi.org/10.1016/S0278-2626\(01\)80054-3](https://doi.org/10.1016/S0278-2626(01)80054-3)
- Granà, A., Lochy, A., Girelli, L., Seron, X., & Semenza, C. (2003). Transcoding zeros within complex numerals. *Neuropsychologia*, *41*(12), 1611–1618. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(03\)00109-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(03)00109-X)
- Habermann, S., Donlan, C., Göbel, S. M., & Hulme, C. (2020). The critical role of Arabic numeral knowledge as a longitudinal predictor of arithmetic development. *Journal of Experimental Child Psychology*, *193*, 104794. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.104794>
- Handelsman, N., & Dotan, D. (2023a). Reading numbers is hard, and the difficulty is a syntactic one: A descriptive analysis of number-reading patterns in readers with and without dyscalculia [Preprint]. *PsyArXiv*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/87dzw>
- Handelsman, N., & Dotan, D. (2023b, February). *Core number syntax and its dissociation from language syntax*. Presented at the 10th Conference on Cognition Research of the Israeli Society for Cognitive Psychology., Akko, Israel.
- Lin, C.-Y., & Göbel, S. M. (2019). Arabic digits and spoken number words: Timing modulates the cross-modal numerical distance effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *72*(11), 2632–2646. <https://doi.org/10.1177/1747021819854444>

- Lochy, A., Domahs, F., & Delazer, M. (2003). Peripheral agraphia in writing numbers: Role of processing load. *Brain and Language*, *87*(1), 150–151. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(03\)00244-X](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(03)00244-X)
- McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing: Evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, *44*(1–2), 107–157. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90052-J](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90052-J)
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, *4*(2), 171–196. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(85\)90069-7](https://doi.org/10.1016/0278-2626(85)90069-7)
- McNemar, Q. (1947). Note on the sampling error of the difference between correlated proportions or percentages. *Psychometrika*, *12*(2), 153–157. <https://doi.org/10.1007/BF02295996>
- Noel, M. P., & Seron, X. (1995). Lexicalization Errors in Writing Arabic Numerals—A Single-Case Study. *Brain and Cognition*, *29*(2), 151–179. <https://doi.org/10.1006/brcg.1995.1274>
- Power, R. J. D., & Dal Martello, M. F. (1990). The dictation of Italian numerals. *Language and Cognitive Processes*, *5*(3), 237–254. <https://doi.org/10.1080/01690969008402106>
- Reyna, V. F., & Brainerd, C. J. (2007). The importance of mathematics in health and human judgment: Numeracy, risk communication, and medical decision making. *Learning and Individual Differences*, *17*(2), 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2007.03.010>
- Seron, X., & Noel, M. P. (1992). Language and numerical disorders: A neuropsychological approach. Analytic approaches to human cognition. Amsterdam: Elsevier.
- Singer, H. D., & Low, A. A. (1933). Acalculia (Henschen): A clinical study. *Archives of Neurology & Psychiatry*, *29*(3), 467–498.
- Steiner, A. F., Finke, S., Clayton, F. J., Banfi, C., Kemény, F., Göbel, S. M., & Landerl, K. (2021). Language effects in early development of number writing and reading. *Journal of Numerical Cognition*, *7*(3), 368–387. <https://doi.org/10.5964/jnc.6929>
- Yuan, L., Prather, R. W., Mix, K. S., & Smith, L. B. (2019). Preschoolers and multi-digit numbers: A path to mathematics through the symbols themselves. *Cognition*, *189*, 89–104. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.03.013>
- Zangwill, O. L. (1954). Agraphia due to a left parietal glioma in a left-handed man. *Brain*, *77*(4), 510–520. <https://doi.org/10.1093/brain/77.4.510>

6. נספחים-

נספח א'. דפוסי פריטים – מטלת חמש בש

מספר ספרות	דפוסים	כמות פריטים
4 ספרות	xxx0	3
	xx0x	3
	x0xx	5
5 ספרות	xxxx0	3
	xxx0x	3
	xx0xx	5
	x0xxx	3
6 ספרות	xxxxx0	3
	xxxx0x	3
	xxx0xx	5
	x0xxxx	3
	xx0xxx	3

נספח ב'- מטלות נוספות נתח ויזואלי

מטלת זהה שונה (זהות וסדר)

שיטה. המשתתפת ראתה דף עם זוגות של מספרים בני ארבע ספרות. המשתתפת התבקשה להקיף בעיגול את הזוגות בהם המספרים זהים. בזוגות השונים, שני המספרים נבדלו זה מזה במיקום (2563-2653, 18 פריטים) או בזהות של אחת הספרות (2387-2687, 18 פריטים). השאר הזוגות היו זהים (72 פריטים). המשתתפת התבקשה לא לקרוא את המספרים בקול רם או בלב. התוצאות הושאו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 31 משתתפים בגיל 27 (ס"ת 5.4).

תוצאות. בזוגות שנבדלו במיקום היו לשתי המשתתפות אחוז טעויות גבוה מזה של קבוצת הביקורת. ל-SH היו גם טעויות זהות רבות מאלה של קבוצת הביקורת.

טבלה 12. אחוז הטעויות במטלת זהה שונה זוגות נבדלים בזהות ובסדר הספרות.

משתתפת	LB	SH	ביקורת ממוצע (סטיית תקן)
מיקום ליקוי	פלט ספרתי	קלט מילולי	
זוגות זהים	0	8	3.2 (5.0)
זוגות נבדלים בזהות ספרה	0	6**	0.8 (2.0)
זוגות נבדלים במיקום ספרה	22 ⁺	39**	9.4 (9.3)

השוואה לקבוצת ביקורת: ** $p < .01$ * one-tailed $p < .10$

מטלת זיהוי רצף

שיטה. המשתתפת ראתה דף ועליו שלושה טורים של מספרים בני ארבע ספרות. המשתתפת התבקשה להקיף בעיגול את המספרים שמהווים רצף של ספרות בסדר עולה (לדוגמא, 60,6789, 60 פריטים). במספרים בהם הספרות לא היו רצף בסדר עולה, הפריט נגזר מתוך רצף ע"י שיכול של 2 ספרות סמוכות (30,4576, 30 פריטים) או החלפה של אחת הספרות בספרה אחרת (30,4967, 30 פריטים). גם כאן המשתתפת התבקשה לא לקרוא את המספרים בקול רם או בלב. התוצאות הושאו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 20 משתתפים.

תוצאות. בזוגות שנבדלו במיקום היו לשתי המשתתפות אחוז טעויות גבוה מזה של קבוצת הביקורת. כמו כן אצל המשתתפת SH נמצא אחוז טעויות גבוה גם בפריטים בהם היה הבדל בזהות הספרות. המשתתפת LB טענה שהיא אומרת לעצמה בלב ספרה ספרה, אסטרטגיה שעלולה לפגוע בתוקף של המטלה.

טבלה 13. אחוז הטעויות במטלת זיהוי רצף.

משתתפת	LB	SH	ביקורת ממוצע (סטיית תקן)
מיקום ליקוי	פלט ספרתי	קלט מילולי	
זוגות זהים	8	27**	3.3 (3.9)
זוגות נבדלים בזהות ספרה	0	0	0 (0)
זוגות נבדלים במיקום ספרה	10*	17***	2.7 (3.4)
השוואה לקבוצת ביקורת:			
		*** $p < .001$	* one-tailed $p < .05$