

TEL AVIV אוניברסיטת
UNIVERSITY תל אביב

בית הספר לחינוך ע"ש חיים וגיואן קונסטנטינר
החוג לחינוך מיוחד וייעוץ חינוכי
המגמה ללקויות למידה

עבודת גמר לקראת תואר "מוסמך למדעי הרוח" (M.A.)

**מגבלות הזיכרון לטווח קצר:
איך זיכרון משפיע על הכתיבה שלנו?**

**The limits of short-term memory:
How does memory affect our writing of
numbers?**

הדר אפודי קלרמן
בהנחיית ד"ר דרור דותן

אוגוסט, 2024

תודות

ברצוני להודות למספר אנשים שסייעו ולקחו חלק משמעותי בתהליך כתיבת התזה :
ראשית, אני רוצה להודות למנחה שלי, די"ר דרור דותן, על האפשרות לקחת חלק במחקר מעניין
ומשמעותי, על הזמינות שלך לסייע בכל סוגיה ועל הנחיה מקצועית, תומכת ומלמדת.
לזהר כהן, תודה על הייעוץ, התמיכה והנכונות לעזור בכל עניין.
אני רוצה להודות גם לשגב, שותפי לחיים, על התמיכה והעזרה הבלתי נגמרת. תודה לך על הסבלנות
והאהבה. לא יכולתי לבקש שותף טוב יותר למסע הזה.
ולבסוף, אני רוצה להוקיר תודה להוריי ולמשפחתי, שהאמינו בי ותמכו בי לאורך כל הדרך.

תקציר

זיכרון לטווח קצר מאפשר להחזיק מידע לפרקי זמן קצרים. יכולת זו חשובה במיוחד כאשר מדובר בהבנה של מספרים וכתיבתם: בין אם מדובר ברישום מספר טלפון, העתקת מספרים, או כתיבת מספרים שלמים שמוכתבים לנו, עלינו לשמור את המידע בזיכרון לטווח קצר עד לכתיבתו. אכן, מחקרים קודמים הראו שזיכרון לטווח קצר קשור בקשר הדוק ליכולת כתיבה של מספרים. עם זאת, טרם ברור מהו בדיוק טיבו של הקשר הזה. במחקר הנוכחי, בדקנו את תפקידו של הזיכרון לטווח קצר בכתיבת מספרים: הראינו את קיומו של באפר קלט מילולי – רכיב זיכרון לטווח קצר בקלט המילולי, והראינו שהוא הכרחי בכתיבת מספרים ואיך הוא פועל.

אנו מדווחים כאן על 2 משתתפים עם דיסנומריה – לקות בעיבוד מספרים סימבוליים, עם טעויות רבות במטלת הכתבת מספרים. כדי לברר את המקור לטעויות אלה, בדקנו את תפקוד המשתתפים במטלות שונות הבודקות מנגנון הקלט המילולי. אצל שני המשתתפים נמצאה דיסוציאציה בין תפקוד לקוי במטלות הבודקות קלט מילולי ותפקוד תקין במטלות הבודקות פלט מילולי וייצוג ליבה של המספר. ממצא זה מראה כי מקור הטעויות נובע ממנגנון הקלט המילולי. בשלב שני, הראינו שהמשתתפים עושים גם טעויות לקסיקליות (החלפת ספרות) וגם טעויות תחביריות (שיבוש מבנה המספר), והסקנו שהרכיב הלקוי הוא כזה שמעבד גם מידע לקסיקלי וגם מידע תחבירי. באפר הקלט הפונולוגי הוא רכיב כזה. לבסוף, הראינו שהמשתתפים מתקשים במיוחד במטלות שמייצרות עומס זיכרון. הסקנו מכך שהליקוי שלהם הוא ברכיב של זיכרון לטווח קצר. השילוב של דפוסי התוצאות האלה מצביע על ליקוי ברכיב זיכרון לטווח קצר בשלב הקלט המילולי-פונולוגי, שמחזיק גם מידע לקסיקלי וגם מידע תחבירי – במילים אחרות, באפר קלט פונולוגי. לפיכך, הממצאים מוכיחים את קיומו של באפר הקלט הפונולוגי.

בעקבות ממצאי המחקר הנוכחי, בשילוב המסקנות של מחקרים קודמים, אנו מציעים מודל קוגניטיבי מפורט של תהליכי הקלט המילולי-פונולוגי. מודל זה מתאר את תפקידו המרכזי של הבאפר, ומבחין בין מנגנונים לקסיקליים לתחביריים.

המודל והכלים שפותחו במחקר זה יכולים לסייע באבחון סוגים ספציפיים של לקויות בעיבוד מספרים (דיסנומריה). בנוסף, זיהוי מדויק של ליקויים בבאפר הקלט הפונולוגי עשוי לפתוח את הדלת לאפשרות לפתח אסטרטגיות זיכרון לשיפור מיומנויות כתיבת מספרים. ידע כזה יכול להיות מועיל בסביבות חינוכיות, כיוון שהוא עשוי להשפיע על שיטות הוראה לשיפור אוריינות מספרית וזיכרון.

Abstract

Short-term memory (STM) allows maintaining information for short periods of time. This ability is critical when comprehending numbers and writing them: in many such tasks, e.g., writing down a telephone number, copying numbers, or writing numbers to dictation, we must maintain the number in STM until we write it or use it. Indeed, several studies have shown high correlations between STM and number writing skills. Nevertheless, the precise nature of this relation is still poorly understood. Here, we examined the role of STM in number comprehension and dictation: we showed the existence of a phonological input buffer for number words – an STM process in the verbal-phonological input stage, we showed that this process is necessary for good number processing, and we showed how it works.

We report two individuals with dysnumeria – a disorder in processing symbolic numbers, who made many errors in number dictation. To detect the origin of their errors, we first examined their performance in several tasks that tap different processing stages. Both participants showed poor performance in tasks that tap verbal-phonological input, but good performance in tasks that tap production of digit strings and the core representation of numbers. We conclude that their deficit is at the verbal-phonological input stage. Second, we showed they made both lexical errors (digit substitutions) and syntactic errors (disruptions of the number's structure). We conclude that their deficit is in a process that handles both lexical and syntactic information, such as the phonological input buffer. Third, we showed that their deficit is manifested mainly in tasks that create STM load, indicating that their deficit is in an STM process. Overall, these results show that the participants' deficit was in an STM process at the verbal-phonological input stage, which maintains both lexical and syntactic information – in other words, a phonological input buffer. The results therefore demonstrate the existence of this buffer.

Based on a combination of these conclusions with findings from previous studies, we propose a detailed cognitive model of the processes involved in the verbal-phonological input of multi-digit numbers. The model describes in detail the role of the phonological input buffer, as well as several lexical and syntactic processes at this stage.

This model, and the tools and methods developed in the present study, can help diagnosing specific types of dysnumeria. Precise identification of buffer-related deficits might also open the door to the creation of educational intervention strategies to improve STM and number writing skills. The study could therefore benefit educational environments, by affecting teaching methods aiming to improve numerical literacy and memory.

תוכן עניינים

5	מבוא	1
5	1.1 חשיבותה של הבנת מספרים	1.1
5	1.2 ייחודיות הזיכרון לטווח קצר	1.2
6	1.3 מודל כתיבת מספרים	1.3
7	1.4 המחקר הנוכחי	1.4
9	2. שיטה	2
9	2.1 משתתפים	2.1
9	2.2 מטלות סינון	2.2
9	2.3 הליך וקבוצות ביקורת	2.3
10	2.4 ניתוחים סטטיסטיים	2.4
11	3. רקע נוירופסיכולוגי: שפה וזיכרון	3
11	3.1 מטלות זיכרון לטווח קצר	3.1
11	3.2 מטלות שפה	3.2
13	4. תוצאות	4
13	4.1 הכתבת מספרים	4.1
14	4.2 הקושי נובע מליקוי בשלב הקלט המילולי	4.2
14	4.2.1 יש ליקוי בקלט המילולי-פונולוגי	4.2.1
16	4.2.2 אין ליקוי בייצוג הליבה התחבירי ובפלט המילולי	4.2.2
17	4.2.3 אין ליקוי בכתיבת ספרות (ברמה המוטורית)	4.2.3
19	4.3 הקושי הוא לא רק תחבירי או לקסיקלי	4.3
19	4.3.1 קושי תחבירי ולקסיקלי בהכתבת מספרים	4.3.1
19	4.3.2 קושי תחבירי ולקסיקלי ספציפית בשלב הקלט - מילולי שמיעתי	4.3.2
20	4.4 הקושי מושפע מעומס הזיכרון	4.4
21	4.5 סיכום ביניים	4.5
21	4.6 הבאפר הכרחי לעיבוד מספרים רב-ספרתיים	4.6
22	5. דיון	5
22	5.1 קושי בבאפר הקלט הפונולוגי	5.1
22	5.2 סוגים שונים של באפרים פונולוגיים	5.2
22	5.2.1 דיסוציאציה בין באפר קלט פונולוגי לבאפר פלט פונולוגי	5.2.1
23	5.2.2 הקשר לבאפרים פונולוגיים בעיבוד מילים	5.2.2
23	5.3 חשיבותו של באפר הקלט הפונולוגי	5.3
24	5.4 מודל קוגניטיבי של מנגנון הקלט המילולי	5.4
24	5.4.1 הנחות	5.4.1
24	5.4.2 תיאור המודל	5.4.2
26	5.5 סיכום	5.5
27	ביבליוגרפיה	
30	נספחים	

1. מבוא

1.1.1 חשיבותה של הבנת מספרים

מתמטיקה היא אחד מהתחומים ההכרחיים בחיי האדם. היא נדרשת לצורך שימוש בכסף, חישוב זמנים, למגוון כישורים אקדמיים ועוד. לכן, כישורי מתמטיקה נחשבים לכישורים כה חשובים ללימוד בבתי הספר (Sokolowski & Ansari, 2017). בנוסף, פיתוח חשיבה מתמטית תורם לפיתוח יכולות הפשטה, יצירתיות, מטא-קוגניציה וחשיבה לוגית, אנליטית וביקורתית (Rohaeti, 2019; Stech, 2008). אף על פי שרוב האנשים מסוגלים לרכוש מיומנויות מתמטיות הנלמדות בבית הספר, ישנה שונות ביכולות המתמטיות בין כלל הילדים כך שישנם ילדים אשר מבטאים יכולת כזו בצורה טובה יותר מאחרים. כבר בגילאי הגן יש פער ברמת הידע המתמטי בין הילדים. פערים ראשוניים אלה עשויים להיות בעלי השפעות ארוכות טווח על אופן הצלחתם בבית הספר ובחיים (Clements & Sarama, 2011).

היכולת להבין מספרים באופן מילולי הכרחית להתפתחות כישורים מתמטיים נוספים, למשל חישוב בעל פה (Jordan et al., 2010) והשוואה בין מספרים (Berch, 2005): ישנו מתאם בין הישגי תלמידים במתמטיקה לבין יכולת הבנת המספרים שלהם (Jordan et al., 2010; Yang et al., 2008), וקושי בהבנה ועיבוד מספרים הוא אחד התסמינים הבולטים אצל ילדים המתקשים במתמטיקה (De Smedt et al., 2009). בנוסף, כתיבה של מספרים (שדורשת הבנה מילולית) וקריאתם בגיל 4 ניבאה הצלחה בפתירת בעיות מילוליות כשנתיים לאחר מכן (Habermann et al., 2020). יכולת הבנת מספרים גם מנבאת גובה שכר ושיעורי אבטלה (Parsons & Bynner, 1997).

הבנת מספרים היא מיומנות בסיסית המשפיעה על תהליכי קריאה וכתיבת מספרים. "הבנת מספרים" הוא מושג נרחב הכולל הבנה ופירוש של מידע מספרי, בעוד ש"קלט מילולי" מתייחס לשלב הראשוני של עיבוד מספרים, לדוגמה במטלת הכתבת מספרים. לקלט המילולי יש תפקיד מכריע בשלבים הראשוניים של עיבוד מספרים; זיהוי מילות המספר, ארגון המבנה התחבירי שלהן ואחסון המידע לזמן מוגבל עד לכתיבתן בשלבי עיבוד מאוחרים יותר. מודלים קוגניטיביים של עיבוד מספרים מתארים את הקלט המילולי כשלב הראשון בתהליכי כתיבה של מספרים (במטלת הכתבה), ומתארים את הקשר בין קריאה וכתיבה לבין הבנה של המספר (Cipolotti & Butterworth, 1995; McCloskey, 1992).

הבנת מספרים קשורה גם לזיכרון. במטלה זו הזיכרון לטווח קצר משחק תפקיד מהותי, כיוון שנדרש לאחסן מידע פונולוגי אודות המספר עד לשלב כתיבתו. בהתאמה, ישנן עדויות למתאם בין זיכרון לטווח קצר לבין הצלחה במטלת הכתבת מספרים (Batista et al., 2023; Camos, 2008; Moura et al., 2013; Pixner et al., 2011). עם זאת, טיבו המדויק של הקשר בין זיכרון לטווח קצר לבין קלט מילולי של מספרים טרם הובהר. זהו הנושא של המחקר הנוכחי.

1.2 ייחודיות הזיכרון לטווח קצר

היכולת שלנו להבין מספרים נשענת על מנגנון של זיכרון לטווח קצר שמאחסן את המידע פונולוגי של המספר לזמן מוגבל עד לשלבי עיבוד הבאים. כפי שצוין לעיל, ישנם מחקרים המתארים מתאם בין זיכרון לטווח קצר לבין הצלחה במטלות קריאה וכתיבת מספרים.

קשה למצוא מטלה יומיומית שאינה דורשת קידוד ואחסון מידע בזיכרון לטווח קצר. אנשים משתמשים בזיכרון לטווח קצר כדי לזכור את המשפט האחרון שקראו, או כדי לנסות להיזכר היכן הניחו חפץ כלשהו. גם מטלות אקדמיות מסתמכות על זיכרון לטווח קצר לעיתים קרובות, למשל כאשר התלמידים מעתיקים מהלוח הם צריכים לזכור מה רשום כדי לרשום זאת במחברת (Wood & Eriksen, 2005). קיימת הבחנה בין זיכרון קצר לטווח לבין זיכרון ארוך טווח. זיכרון לטווח קצר שונה מזיכרון לטווח ארוך על פי שני פרמטרים: זמן אחסון המידע, ותכולת המידע שכל אחד מהמאגרים יכול לשמור (Cowan, 2008). יש הטוענים כי שני סוגי הזיכרון פועלים בנפרד אך באינטראקציה המגבשת מידע ישן-חדש משני סוגי הזיכרון. על פי סברה אחרת, הזיכרון לטווח קצר הוא סוג של זיכרון לטווח ארוך אשר מוגבל בתכולת המשאבים הקשבים העומדים לרשותו (Jones & Macken, 2015). הבחנה נוספת היא בין זיכרון לטווח קצר לזיכרון פעיל. הזיכרון לטווח קצר הוא סט של מערכות המאחסנות מידע, וזיכרון פעיל הוא זה שמאפשר לשמור את המידע באופן שמאפשר לבצע עליו פעולות קוגניטיביות. בנוסף לכך, ישנה הבחנה בין זיכרון לטווח קצר לבין זיכרון חושי; זיכרון חושי הוא ספציפי ותלוי ייצוג (חזותי/אודיטורי) והוא נתפס רק לפרק זמן של חלקי השנייה (Casella & Al Khalili, 2019).

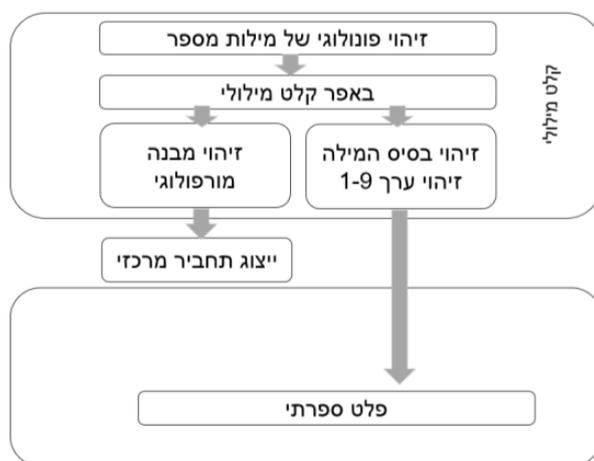
הבאפרים הפונולוגיים הם הרכיבים של זיכרון לטווח קצר שמאחסנים מידע פונולוגי במטלות עם קלט או פלט מילולי (Baddeley & Hitch, 1974). לבאפר פונולוגי, כמו כל רכיבי הזיכרון לטווח קצר, יש מגבלה עיקרית והיא הקיבולת שלו. בעבר, אומדן מקובל של הקיבולת הזאת היה 7 פריטים פלוס מינוס 2 (Miller, 1956), אבל מחקרים עדכניים יותר הראו שהקיבולת האמיתית היא 3-4 פריטים, וניתן להגדיל אותה אפקטיבית ל-7 פריטים ע"י אסטרטגיות ציאנקינג (Cowan, 2001). הדרך המקובלת למדוד את קיבולת הזיכרון לטווח קצר, גם ברמת קבוצה וגם ברמה של אדם ספציפי, היא בתור מספר הפריטים שהמשתתף יכול לשחזר מייד לאחר הצגתם במטלת חזרה. מטלות אלה נקראות ספאן (Frick, 1984). במטלות עיבוד מספרים, לאורך המספר יש השפעה גדולה על ביצועי הזיכרון לטווח קצר: למשל, במטלת הכתבה, במספרים ארוכים יותר יש יותר שגיאות בהשוואה לפריטים קצרים יותר (Granà et al., 2003).

1.3 מודל כתיבת מספרים

העיבוד הקוגניטיבי של מספרים מתרחש באמצעות שלושה ייצוגים שונים של המספר, שנשלטים על ידי אזורים שונים במוח: ייצוג כמותי, ייצוג מילולי של מילות מספר, וייצוג ספרתי. הייצוג בו נשתמש תלוי במטלה הספציפית (Cipolotti et al., 1994; Noel & Seron, 1995). במסגרת הייצוג המילולי של מילות המספר, ישנם מנגנונים קוגניטיביים נפרדים להבנה של מספרים הנאמרים כמילים (קלט) ולהפקה מילולית של מספרים כאלה (Cipolotti & Butterworth, 1995; McCloskey et al., 1985). הפרדה זו בין תהליכי קלט מילולי ופלט מילולי מתקיימת גם בהיבטים אחרים של שפה: למשל, מחקרים נוירופסיכולוגיים העוסקים בזיכרון לטווח קצר של מילים מראים כי תהליכים הקשורים בהבנת קלט מילולי הינם נפרדים מתהליכי עיבוד של פלט מילולי (Jacquemot & Scott, 2006). בנוסף, קיימת הבחנה בין תהליכי עיבוד לקסיקלי, המעבדים מילות מספר וספרות בודדות, ותהליכי עיבוד תחבירי, המעבד את היחסים בין האלמנטים הלקסיקליים (מילות המספר והספרות, למשל סדר מילות המספר וכמותן, Cipolotti et al., 1994; Noel & Seron, 1995).

כהן (2023) הציעה מודל קוגניטיבי לתיאור התהליך של כתיבת מספרים במטלת הכתבה. מודל זה (תרשים 1) מתאר מנגנוני קלט ופלט נפרדים, וגם מבחין בין תהליכי עיבוד לקסיקליים ותחביריים. לפי המודל, שלב הקלט המילולי מתחיל בזיהוי פונולוגי של כל מילת מספר. מילות המספר שזוהו נשמרות בבאפר קלט מילולי – מנגנון של זיכרון לטווח קצר. בשלב הבא יש פירוק של כל מילת מספר לתכונות שלה. רכיב אחד, תחבירי (זיהוי מורפולוגי), מאתר את המוספיות המורפולוגיות של מילת המספר ומזהה את הקטגוריה שלה (יחידות \ עשרות \ מאות \ אלפים). רכיב שני, לקסיקלי, מזהה את בסיס המילה (זיהוי ערך 1-9). לדוגמה, כששומעים את המילה "שלושים", הרכיב המורפולוגי יזהה שמדובר בקטגוריית עשרות, והרכיב הלקסיקלי יזהה 3. בהמשך, נוצר ייצוג של מבנה המספר, ואחריו ישנם אוסף תהליכים שמתרגמים את המספר לרצף ספרות.

מודל זה מציע את האפשרות שקיים באפר קלט פונולוגי שמאחסן את המידע בזיכרון לטווח קצר, אך קיומו של רכיב זה טרם הוכח אמפירית. המחקר הנוכחי שם למטרה לבדוק האם קיים באפר קלט פונולוגי ואם כן, לנסות להבין איך בדיוק הוא עובד.



תרשים 1. מודל מוצע לכתיבת מספרים (כהן, 2023)

1.4 המחקר הנוכחי

המחקר יתאר את רכיב באפר הקלט הפונולוגי ואת תרומתו לתהליך עיבוד מספרים מילולי, על ידי ניתוח טעויות של משתתפים אשר מפגינים תפקוד לקוי של רכיב זה. שאלת המחקר העיקרית שלנו היא האם יש באפר קלט מילולי-פונולוגי לעיבוד מספרים?

בתהליך העיבוד של מילים, ישנן עדויות מסוימות לקיומו של באפר הקלט-הפונולוגי; רכיב המהווה חלק ממנגנון הזיכרון לטווח קצר ואחראי על שימור יחידות המידע הפונולוגיות עד אשר הן מזוהות בלקסיקון הקלט הפונולוגי. באשר לעיבוד מספרים, טרם נמצאו ראיות לקיומו של באפר קלט פונולוגי. מטרת המחקר הנוכחי היא לבדוק האם ישנו רכיב כזה גם בתהליך עיבוד מספרים. כדי להראות זאת, זיהינו אנשים עם ליקוי סלקטיבי בבאפר הקלט הפונולוגי. כדי להראות שזה אכן הליקוי, המשתתף היה צריך לעמוד ב-3 הקריטריונים הבאים:

1. הטעויות בהכתבת מספרים נובעות משלב הקלט המילולי-פונולוגי. ליקוי בבאפר חייב לקיים את הקריטריון הזה מאחר והבאפר הוא רכיב הפועל במנגנון הקלט המילולי-פונולוגי.

כדי להראות שזה המצב, העברנו למשתתפים מטלות שבודקות את מנגנון הקלט המילולי-פונולוגי והראינו שקיים קושי בכל המטלות האלה. העברנו גם מטלות הבודקות את שלבי העיבוד הבאים המעורבים במטלת הכתבה, כלומר רכיבי ייצוג ליבה והפלט הספרתי, והראינו שאין ליקוי ברכיבים אלה, ואם יש – הוא קיים בנוסף לליקוי בפלט המילולי.

2. הקושי הוא לא רק תחבירי או רק לקסיקלי, אלא משפיע גם על המידע התחבירי וגם על המידע הלקסיקלי.

ניתן לחלק את הטעויות במטלת הכתבת מספרים לשני סוגי טעויות עיקריים: לקסיקליות ותחביריות. טעויות לקסיקליות הן שיבושים של זהות הספרות 1-9, כלומר החלפת ספרה שבין 1-9 בספרה אחרת (למשל המספר 372 ייכתב 375). טעויות תחביריות הן שיבוש של מבנה המספר – לדוגמה, במקום לכתוב 4086 יכתוב 40084 או 4000804 (Cipolotti & Butterworth, 1995; Delazer & Denes, 1998; McCloskey et al., 1985). מחקרים על כתיבה הראו דיסוציאציה בין טעויות תחביריות לטעויות לקסיקליות, כלומר עדויות לליקוי סלקטיבי בכל אחד משני התהליכים הללו (Granà et al., 2003; McCloskey et al., 1985; Noel & Seron, 1995). דיסוציאציות אלה מחזקות מראות שיש מנגנונים לקסיקליים ותחביריים נפרדים.

באפר הקלט הפונולוגי הוא לא תהליך תחבירי או לקסיקלי: הוא מנגנון זיכרון לטווח קצר ששומר את המידע המלא לגבי מילות המספר. לכן, ליקוי בבאפר הקלט הפונולוגי לא צפוי להתאפיין רק בטעויות תחביריות או לקסיקליות, אלא יגרום למגוון סוגי טעויות – גם תחביריות וגם לקסיקליות.

3. רמת הקושי תושפע מעומס הזיכרון המילולי. כיוון שהבאפר הוא רכיב זיכרון, ליקוי בבאפר יגרום לקושי משמעותי במיוחד במטלות הדורשות עומס זיכרון.

כדי להראות זאת, הראנו שהטעויות במטלות הקלט באות לידי ביטוי בעיקר במצבים שיוצרים עומס זיכרון. בנינו זוגות מטלות עם שתי גרסאות שונות בכל זוג, הנבדלות זו מזו בעומס הזיכרון, והראינו שהקושי של המשתתפים בא לידי ביטוי בגרסה עם עומס גבוה אבל לא בגרסה עם עומס נמוך. המניפולציה בה השתמשנו כדי להגדיל את עומס הזיכרון הייתה להגדיל את אורך ה-delay במטלה וכך את משך הזמן שהמשתתפים צריכים לשמור את המידע בזיכרון, ואת כמות הפריטים שמצטברים בזיכרון במהלך הזמן הזה.

השילוב של שלושת הקריטריונים האלה הוא תנאי מספיק כדי להראות שהליקוי הוא בבאפר הקלט הפונולוגי (וכך להראות את קיומו של באפר כזה). באפר קלט פונולוגי הוא הרכיב היחיד שתואם את 3 הקריטריונים האלה: רכיב שנמצא בקלט המילולי-פונולוגי, שומר גם מידע תחבירי וגם מידע לקסיקלי, והוא רכיב של זיכרון לטווח קצר.

שאלה נוספת שהמחקר הנוכחי בדק היא האם באפר הקלט הפונולוגי נפרד מבאפר הפלט הפונולוגי. בעיבוד שפה, באפרים שונים בשלב הקלט ובשלב הפלט, וליקוי בכל אחד מהם יביא לקשיים שונים (Gvion & Friedmann, 2012). גם בהקשר של עיבוד מספרים, ניתן לשער הבחנה בין באפר

קלט פונולוגי לבין באפר פלט פונולוגי. ישנן עדויות לקיומו של באפר פלט פונולוגי של מספרים, וגם דיסוציאציה בינו לבין באפר קלט – כלומר ליקוי סלקטיבי בבאפר הפלט הפונולוגי, שלא משפיע על הקלט המילולי (Dotan & Friedmann, 2015). עם זאת, העדויות לדיסוציאציה בין הבאפרים אינן מלאות, כלומר טרם ידוע האם אותו באפר אחראי גם לקלט המילולי וגם לפלט המילולי. המחקר הנוכחי בדק האם בעיבוד מספרים, שני הבאפרים מופרדים זה מזה או שמדובר בבאפר אחד. כדי לעשות זאת, הראנו שייתכן ליקוי סלקטיבי לא רק בבאפר הפלט הפונולוגי, כפי שכבר נמצא בעבר, אלא גם בבאפר הקלט הפונולוגי.

2. שיטה

2.1. משתתפים

המשתתפים גויסו דרך הרשתות החברתיות באמצעות פנייה למשתתפים עם קשיים במתמטיקה. הקריטריונים הראשוניים להשתתפות היו שפת אם עברית ודיווח עצמי על קושי עם מספרים או קושי במתמטיקה. כל המשתתפים נתנו את הסכמתם להשתתף בניסוי וקיבלו תשלום עבור השתתפותם. כל מפגש ארך בין שעה לשעה וחצי והועבר בזום. המחקר אושר ע"י ועדת האתיקה של אוניברסיטת ת"א.

למחקר נכנסו 2 משתתפים: NANI, בן 33 עם 20 שנות לימוד, לא מדווח על לקות למידה/קשב; ו-BIMA, בת 33, סטודנטית לתואר ראשון (16 שנות לימוד) עם לקות למידה / הפרעת קשב.

2.2. מטלות סינון

המשתתפים עברו מפגש סינון שכלל 2 מטלות זיכרון לטווח קצר – ספאן ספרות וספאן מילים (מתוך סוללת פריגבי, פרידמן וגביעון, 2008). בכל פריט במטלה, המשתתף שמע רצף ספרות / מילים וחזר עליו. בכל רמה במטלה יש 5 פריטים עם אותה כמות ספרות/מילים בכל פריט – 2 מילים/ספרות בפריטים ברמה הראשונה, ועד 9 ספרות / 7 מילים ברמה האחרונה. הציון במטלה הוא הרמה הגבוהה ביותר בה המשתתף הצליח לזכור 3 פריטים, פלוס חצי נקודה נוספת אם ברמה האחרונה הצליח לזכור שני פריטים. כל אחת מ-2 המטלות הועברה פעמיים, בשני מפגשים שונים. הקריטריון להשתתפות במחקר היה ציון נמוך ($z < -1.0$) בשתי המטלות בכל אחת משתי ההעברות.

2.3. הליך וקבוצות ביקורת

המטלות הועברו לכל משתתף בנפרד, במפגשים פרונטליים או בזום. כל מפגש ארך כשעה. הביצועים בכל מטלה הושוו לביצועים של קבוצת ביקורת עם לפחות 30 משתתפים, בגילאים 60 - 20 ללא לקות למידה ו/או הפרעות קשב וריכוז. בכל מטלה, הוצאנו מקבוצת הביקורת משתתפים שהיו חריגים (outliers) באותה מטלה – כלומר עם כמות טעויות גבוהה מהאחוזון ה-75 ביותר מ- 150% המרחק הבין-רבעוני. טבלה 1 מציגה את נתוני קבוצות הביקורת בחלק מהמטלות.

טבלה 2. משתתפים חריגים (outliers) במטלות הכתבה וחזרה

מציגה את כמות המשתתפים החריגים שהוצאו ואת הסף להוצאת חריגים.

טבלה 1. ביצועי קבוצת הביקורת במטלות זיכרון ואחוז טעויות במטלות שפה

מטלה	מס' משתתפים	גיל	ממוצע (ס"ת)	ערך מינימלי נורמטיבי
ספאן ספרות	202	+18	6.6 (1.06)	5
ספאן מילים	128	20-40	5.44 (0.69)	4.5
ספאן מאצ'ינג ספרות	20	20-40	6.85 (0.37)	7
ספאן מאצ'ינג מילים	22	20-40	6.36 (1.0)	5
חזרה על מילות תפל	20	21-49	4.6% (3.5%)	10.8%
הכתבת מילות תפל	52	+18	1.2% (2.1%)	5%
הכתבת מילים קיימות	66	+18	2.4% (2.2%)	7%

טבלה 2. משתתפים חריגים (outliers) במטלות הכתבה וחזרה

מטלה	משתתפים שהוכללו		Outliers	
	מס'	גיל (ס.ת)	מס'	סוף (%) טעויות
הכתבת מספרים מעוכבת	56	27.6 (7.5)	2	7
הכתבת ספרה -ספרה מיידית	31	29.7 (9.9)	1	6.5
הכתבת מספרים קצרים	31	29.6 (9.8)	1	6.5
חזרה מעוכבת	34	25.6 (6.4)	3	14
חזרה מיידית	26	26.6 (7.5)	1	7

2.4. ניתוחים סטטיסטיים

השוואת התפקוד של כל אחד מהמשתתפים לקבוצת הביקורת נעשתה על ידי מבחן קרופורד (Crawford & Howell, 1998). כשהשווינו את התפקוד של משתתף בין שתי מטלות שונות, השתמשנו במבחן חי בריבוע.

3. רקע נוירופסיכולוגי: שפה וזיכרון

המשתתפים הראו קושי במטלות הדורשות שימוש בזיכרון לטווח קצר בספרות ובשפה. בשתי ההעברות של מטלת הספאן (מילים/ספרות, פרק 2.2), שני המשתתפים הציגו רמת ביצוע נמוכה (טבלה 3).

טבלה 3. ביצועי המשתתפים (ספאן / % טעויות) במטלות זיכרון ושפה

העברה	NANI		BIMA	
	ביצוע	ציון תקן	ביצוע	ציון תקן
ספאן ספרות	1	5	5	-1.51
	2	4.5*	5.5	-1.04
ספאן מילים	1	4*	4*	-2.08
	2	4*	4*	-2.08
ספאן מאצ'ינג ספרות		5***	4***	-7.70
ספאן מאצ'ינג מילים		4*	4*	-2.36
חזרה על מילות תפל		8.3	8.3	3.65
הכתבת מילות תפל		10%***	15%***	6.57
הכתבת מילים		4.3	0.86	

השוואה לקבוצת הביקורת: $p < .001$ *** $p < .01$ ** $p < .05$ *

3.1 מטלות זיכרון לטווח קצר

העברנו מטלת ספאן (matching) התאמת מילים והתאמת ספרות (סוללת פריגבי, פרידמן וגביעון, 2008). מטרת המטלה היא לבדוק ספציפית את באפר הקלט הפונולוגי ללא הפקה מילולית (כלומר ללא שימוש בבאפר הפלט הפונולוגי). בכל פריט במטלה, מקריאים למשתתף 2 רשימות של ספרות/מילים, עם הפרש של שניה אחת בין המילים בתוך הרשימה ושתי שניות בין הרשימות. על המשתתף להחליט האם בשתי הרשימות שהוקראו לו הפריטים הופיעו בסדר זהה (חשמלאי קערה חשמלאי קערה) או נבדלו בסדר של 2 פריטים סמוכים (צלחת מנורה מנורה צלחת). מטלת המילים כללה 6 רמות, ומטלת הספרות כללה 8 רמות, כאשר בכל רמה היו 10 פריטים. הציון במטלה הוא הרמה האחרונה שבה המשתתף הצליח לענות נכון על 7/10 פריטים. בשתי המטלות, הציון של שני המשתתפים היה נמוך בהשוואה לקבוצת ביקורת (טבלה 3).

3.2 מטלות שפה

עד כה ראינו כי הנבדקים מתקשים בכל המטלות הקשורות לעיבוד וזיכרון של ספרות. העברנו למשתתפים גם מטלות הבודקות קלט מילולי של מילים, במטרה לבדוק האם הקשיים בעיבוד וזיכרון הם ספציפיים למספרים או שהם מופיעים גם בעיבוד מילים.

חזרה על מילות תפל (מבדק "בליפ", פרידמן, 2003). מטרת המטלה היא להעריך את תפקודו של באפר הקלט הפונולוגי ובאפר הפלט הפונולוגי בעיבוד מילים, שכן המטלה לא מאפשרת להיעזר בלקסיקונים הפונולוגיים לשליפת המילה. עם זאת, נדגיש שהביצוע במטלה לא בהכרח משליך על מנגנוני עיבוד מספרים, מאחר שלפחות חלק מתהליכי עיבוד השפה מתרחשים על ידי מנגנונים

קוגניטיביים שונים מאלו של עיבוד ספרות (Dotan & Friedmann, 2019), כלומר אין אנו מניחים שמדובר באותם רכיבי באפר קלט ופלט משותפים למילים ולמספרים.

המטלה כוללת 48 מילות תפל במבנים הברתיים שונים (CV; CVC; CCV; CCVC). מחצית מהמילים מורכבות פונולוגית ומחציתן פשוטות (בניהן 8 דו-הברתיות, 8 תלת-הברתיות ו-8 הן בנות 4 הברות; פרידמן, 2003). שיעור הטעויות של המשתתפים היה גבוה מעט מקבוצת הביקורת (טבלה 3). אך ללא הבדל מובהק.

כתיבת מילות תפל (מתוך סוללת "תלתן", פרידמן וגביעון, 2003). המטלה בודקת את תפקודו של באפר הקלט הפונולוגי בעיבוד מילים. מכתבים למשתתפים רשימת מילות תפל ומבקשים מהם לרשום בצורה מדויקת את המילים ששמעו. המטלה כוללת 20 מילות תפל: 8 מילים הכוללות שתי הברות, 8 מילים הכוללות שלוש הברות ו-4 מילים הכוללות ארבע הברות. הציון של שני המשתתפים היה נמוך בהשוואה לקבוצת ביקורת (טבלה 3). הקושי במטלה תואם את האפשרות של ליקוי בבאפר קלט.

הכתבת מילים קיימות (מתוך סוללת "תלתן", פרידמן וגביעון, 2003). המשתתפים שמעו 70 מילים והתבקשו לכתוב כל מילה. המטלה הועברה למשתתף NANI. רמת הביצוע שלו הייתה דומה לקבוצת הביקורת (טבלה 3).

4. תוצאות

4.1. הכתבת מספרים

נתחיל בתיאור התוצאות במטלה בה המשתתפים שמעו מספרים וכתבו אותם על דף. מטלה זו (סוללת "מים", דותן ופרידמן, 2014) מערבת גם את מנגנון הפלט ספרתי וגם את הקלט השמיעתי, וכחלק ממנו – את הבאפר המילולי בתהליך של הבנת מספרים משמיעה, המנגנון המשוער שעומד במרכזו של המחקר הנוכחי. במטלה זו הוקראו למשתתפים 120 מספרים והם התבקשו לכתוב כל מספר על דף. ההנחיה הייתה לכתוב עם פסיק בין ספרות המאות לאלפים, ולהתחיל בכתיבה רק לאחר סיום הקראת המספר ("הכתבה מעוכבת"). המספרים היו בני 3-6 ספרות ועם 2-5 מילות מספר, עם וללא אפס, שהוצגו בסדר אקראי (זהה לכל המשתתפים).

טבלה 4. אחוז הטעויות במטלות הכתבת מספרים

ביקורת (o.t)	NANI	BIMA	
			א. הכתבת מספרים מעוכבת
4.7 (3.6)	37***	44***	סה"כ טעויות
1.8 (2.7)	28***	38***	לקסיקליות
2.9 (2.6)	28***	36***	תחביריות
			ב. הכתבת ספרה-ספרה מעוכבת
	31	58	סה"כ טעויות
	11	29	הוספות/השמטות
	10	29	סדר
	6.7	22	זהות
			ג. הכתבת מספרים מיידיית
	30	45	סה"כ טעויות
	24	31	לקסיקליות
	18	34	תחביריות
			ד. הכתבת ספרה-ספרה מיידיית
0.92 (1.63)	4.2*	15***	סה"כ טעויות
0.53 (1.55)	0.83	12***	הוספות/השמטות
0.08 (0.25)	0	1.7***	סדר
0.33 (0.60)	3.3***	2.5**	זהות
			ה. הכתבת מספרים קצרים
4.31 (0.06)	4.1*	39***	סה"כ טעויות
1.72 (0.03)	1.7*	22***	לקסיקליות
3.96 (0.06)	4.1**	38.3***	תחביריות

השוואה לקבוצת הביקורת: *** $p < .001$ ** $p < .01$ * $p < .05$

קיימים שני סוגי טעויות מרכזיים במטלות כתיבת מספרים: טעויות תחביריות וטעויות לקסיקליות. טעויות תחביריות הן טעויות במבנה התחבירי של המספר, כמו למשל, על ידי הוספה או השמטה של אפסים. לדוגמה: במקום 3045 לכתוב 345 או 30045. לעומת זאת, טעויות

לקסיקליות הן טעויות בזיהוי אחת הספרות 1-9 על ידי החלפתן בספרה אחרת. לדוגמה, במקום 234 לכתוב 235.

המשתתפים הראו שיעור טעויות גבוה, עם דפוס טעויות משולב של טעויות לקסיקליות תחביריות (טבלה 4א). קיומן של טעויות כאלה, וספציפית מהסוגים שראינו, מתיישב עם ההשערה שקיים באפר קלט, שהוא זה הלקוי אצל המשתתפים, ושבאפר הקלט הזה הכרחי במטלת הכתבה. עם זאת, ייתכנו גם ליקויים אחרים שעשויים להסביר את הטעויות במטלת הכתבה. לפיכך, כדי לבדוק אם מקור הליקוי במטלת כתיבת מספרים הוא אכן באפר הקלט הפונולוגי, בדקנו האם דפוס התפקוד של המשתתפים תואם את 3 הקריטריונים לליקוי בבאפר קלט פונולוגי, כפי שהוגדרו במבוא: (1) הטעויות בהכתבת מספרים נובעות משלב הקלט. (2) הקושי הוא לא רק תחבירי או לקסיקלי, אלא גם וגם. (3) הקושי רגיש לעומס הזיכרון המילולי.

4.2. הקושי נובע מליקוי בשלב הקלט המילולי

ליקוי במנגנון הקלט המילולי-פונולוגי מתאפיין בקושי במטלות המערבות עיבוד והבנת מספרים כאשר הם נאמרים מילולית. בהכתבת מספרים מעורבים 3 רכיבים מרכזיים: מנגנון קלט מילולי, ייצוג ליבה של המספר, ופלט ספרתי. בדקנו את 3 הרכיבים האלה, בדגש על רכיב הקלט המילולי, על מנת להראות שהקושי אכן נובע משלב הקלט המילולי-פונולוגי. תהליך הבדיקה הזה מתואר ב-3 הפרקים להלן: בפרק 4.2.1 נתאר מטלות הבודקות את הקלט המילולי, בפרק 4.2.2 נשלול אפשרות שהליקוי הוא בייצוג הליבה התחבירי, ובפרק 4.2.3 נשלול ליקוי מוטורי בשלב כתיבת הספרות.

4.2.1 יש ליקוי בקלט המילולי-פונולוגי

כדי להראות ליקוי בשלב הקלט, העברנו למשתתפים מטלות הדורשות קלט מילולי של מספרים, ולא דורשות לכתוב ספרות: זהה/שונה שמיעתי, ספרה חסרה (ללא מבנה), חמש-בש (עם מבנה) וחזרה על מספרים. כל המטלות מערבות גם את ייצוג הליבה התחבירי, למעט מטלת זהה/שונה שמיעתי, שבודקת את רכיב הקלט המילולי אך לא מחייבת שימוש בייצוג הליבה התחבירי. כמו שנראה להלן, המשתתפים הראו קושי במטלות האלה.

מטלת זהה/שונה שמיעתי

מטלה זו בודקת את הקלט הפונולוגי של מילות מספר אך לא דורשת הפקת מספרים ולא בהכרח דורשת עיבוד תחבירי ו/או את ייצוג הליבה. בכל צעד, משמיעים למשתתף שני זוגות מספרים (מוקלטים) עם צפצוף קצר ביניהם. על המשתתף להכריע האם שני המספרים ששמע זהים או שונים ולענות באופן מיידי, בלי לחזור על המספרים ששמע.

המטלה כללה 72 זוגות מספרים, 36 זהים ו-36 זוגות בהם שני המספרים נבדלו בסדר של שתי מילים (למשל 52,009 – 59,002). כל מספר היה מורכב מ-6 מילים (6-7 ספרות) בהן הספרות 2-9 הופיעו בכמות שווה פחות או יותר. שני המשתתפים הראו קושי וביצעו שיעור טעויות גבוה (טבלה 5).

טבלה 5. אחוז הטעויות במטלות עם קלט שמיעתי ללא פלט ספרות.

ביקורת (ס"ת)	NANI	BIMA	
5.2 (4.1)	21***	38***	זהה/שונה שמיעתי
5.5 (3.1)	28***	56***	ספרה חסרה (ללא מבנה)
5.9 (5.1)	45***	20**	חמש-בש (קטגוריה חסרה)

השוואה חד-זנבית לקבוצת הביקורת: $p < .001$ *** $p < .01$ **

חמש בש – ספרה חסרה

מטרת מטלה זו היא לבדוק את מנגנוני הקלט המילולי, כולל זיהוי ערך 1-9 של כל מילה, ללא ניתוח של מבנה המספר. בכל צעד משמיעים למשתתף רצף של 4 מספרים המורכבים מהספרות 1-5 שמשוּבצות במילות יחידות, עשרות, או מאות. על המשתתף להחליט איזו ספרה 1-5 חסרה ברצף המספרים ששמע. לדוגמה ברצף 3, 200, 50, 40 חסרה הספרה 1. המשתתף מתבקש להימנע בשימוש באסטרטגיות כמו חזרה על המספר. כדי לוודא זאת, מבקשים מהמשתתף להשיב במהירות. המטלה כוללת 42 רצפי מספרים שמופיעים בצורה אקראית כך שלכל מספר יש סיכוי להופיע באופן שווה. גם במטלה זו היו שיעורי טעויות גבוהים (טבלה 5).

חמש-בש – קטגוריה חסרה

מטלה זו (כהן, 2023) דורשת קלט מילולי של מילות מספר, כולל באפר הקלט הספרתי ועיבוד המבנה בשלב הקלט, ויצירה של ייצוג הליבה של מבנה המספר. מקריאים למשתתף 42 מספרים רב ספרתיים בני 4-6 ספרות (11 מספרים בני 4 ספרות, 14 מספרים בני 5 ספרות ו-17 מספרים בני 6 ספרות) במבנים תחביריים שונים. כל מספר כולל את הספרה 0 בדיוק פעם אחת, במיקומים שונים במספר (9, 9, 15, ו-3 פריטים עם 0 במיקום היחידות, עשרות, מאות, אלפים ועשרות אלפים, בהתאמה). המשתתף מתבקש לומר איזו מילת מספר חסרה במספר ששמע ולענות את אחת המילים חמש, חמישים, חמש מאות, חמשת אלפים או חמישים אלף. לדוגמה, במספר "ארבעת אלפים שלוש מאות ותשע", התשובה הנכונה היא חמישים. שני המשתתפים הראו שיעור טעויות גבוה מאוד (טבלה 5).

חזרה מיידית ומעוכבת

במטלה זו (סוללת "מים", דותן ופרידמן, 2014) מקריאים למשתתף 120 מספרים רב ספרתיים בני 3-6 ספרות (4-2 מילים). עם סיום הקראת מספר, המשתתף מתבקש לחזור בקול מיידית על המספר ששמע. המטלה מורכבת מ-20 פריטים בני 3 ספרות, 40 פריטים בני 4 ספרות, 50 פריטים בני 5 ספרות ו-10 פריטים בני 6 ספרות. 22 פריטים לא כוללים אפס כלל, ו-20 פריטים כוללים את הספרה 1 בספרת העשרות. הספרות 2-9 מופיעות בכמויות שוות פחות או יותר. המטלה בודקת את תפקוד הקלט המילולי ואת הפקת המספרים ע"י הפלט המילולי.

גרסה נוספת של מטלה זו היא חזרה מעוכבת, בה על המשתתף לומר משפט קבוע ("איזה יום יפה היום") אחרי ששמע את המספר, ורק לאחר מכן לחזור על המספר ששמע. אמירת משפט זה אמורה למנוע אסטרטגיית חזרה פונולוגיות, וככל הנראה היא גם יוצרת עומס גדול על הזיכרון לטווח קצר.

לשני המשתתפים היו טעויות רבות (טבלה 6). במטלה חזרה מיידית, מחקרים אחרים מצביעים על כך שאין במטלה טעויות תחביריות אפילו אם יש ליקוי בייצוג הליבה התחבירי

(Handelsman & Dotan, 2023). כלומר, ליקוי בתחביר ליבה לא יכול להסביר את הטעויות התחביריות שהתקבלו כאן, ומכאן שמקור הקושי הוא כנראה לא בייצוג הליבה. ממצא זה תואם את האפשרות שהליקוי הוא בשלב הקלט המילולי-פונולוגי.

טבלה 6. אחוז הטעויות במטלות חזרה עם ובלי עומס זיכרון

ביקורת (ס"ת)	NANI	BIMA	
			חזרה מעוכבת
5.5 (3.1)	16**	32***	סה"כ טעויות
4.4 (4.4)	4.1	11**	לקסיקליות
0.3 (0.6)	2.5***	5***	סדר
2.2 (1.9)	6.7*	19***	תחביריות
			חזרה מיידיית
0.4 (0.8)	5.8***	10***	סה"כ טעויות
0.3 (1.1)	5***	3.3**	לקסיקליות
0.06 (0.2)	0.83***	0	סדר
0.09 (0.2)	0	5***	תחביריות

* $p < .05$ ** $p < .01$ *** $p < .001$ השוואה לקבוצת הביקורת: $p < .001$ *** $p < .01$ ** $p < .05$ *

סיכום ביניים: ליקוי בשלב הקלט

לסיכום, ניתן לראות שיש למשתתפים קושי בכל המטלות המערבות קלט מילולי. בנוסף, כפי שראינו בפרק 3, יש להם קושי גם במטלת ספאן מאציינג ספרות, בה יש קלט מילולי אך לא פלט ספרתי.

מטלת מאציינג ספרות/מילים, מטלת זהה/שונה שמיעתי ומטלת ספרה חסרה בודקות את מנגנון הקלט ולא דורשות שימוש בייצוג הליבה ובמנגנוני פלט. לכן, הקושי של המשתתפים במטלות אלה מחזק ישירות את הטענה שמקור הליקוי הוא בקלט. בנוסף, גם הביצוע בשאר המטלות תואם את האפשרות של ליקוי בקלט, גם אם הן דורשות רכיב עיבוד נוספים: מטלת ספאן ספרות/מילים דורשת גם פלט מילולי, מטלת חזרה בקול דורשת גם פלט מילולי ואת תחביר ליבה, ומטלת חמש בש – קטגוריה חסרה דורשת גם את תחביר הליבה. מאחר שחלק מהמטלות בודקות גם מנגנונים אחרים בנוסף לקלט המילולי-פונולוגי (ייצוג ליבה תחבירי, פלט מילולי), העברנו מטלות נוספות הבודקות את הרכיבים האלה כדי להראות שהקושי לא נובע מהם.

4.2.2. אין ליקוי בייצוג הליבה התחבירי ובפלט המילולי

ייצוג הליבה של המספר משמש גם לכתיבה וגם לקריאה של מספרים (Dotan & Brutmann, 2022; Handelsman & Dotan, 2023). המטלות הבאות בדקו את המנגנונים האלה והראו כי הם תקינים אצל שני המשתתפים.

קריאת מספרים

מטלה זו (דוּתן ופרידמן, 2014) דורשת, בין השאר, את ייצוג הליבה התחבירי של המספר, ללא שימוש בקלט שמיעתי ובפלט ספרתי. המשתתף מתבקש לקרוא בקול רשימה של 120 מספרים רב ספרתיים (בני 3-6 ספרות) המוצגים בטור וכתובים ללא פסיק בין ספרת המאות לספרת האלפים. הרשימה מאורגנת באופן רנדומאלי וכוללת מספרים מסוגים שונים מבחינת אורך ומבנה (מיקום

הספרות 0/1). הספרות 2-9 מופיעות באופן אקראי בכמויות שוות. אין מגבלת זמן אך המשתתפים מתבקשים לקרוא את המספרים בקצב סביר.

המשתתפים ביצעו את המטלה ללא קושי. ביצועי המשתתפים הושוו לקבוצת ביקורת שכללה 172 משתתפים מעל גיל 18 אשר ביצעו 6.5% טעויות (ס.ת 4.5). שיעור הטעויות אצל NANI היה 1.7% ואצל BIMA שיעור הטעויות היה 3.3% - פחות טעויות מקבוצת הביקורת.

קריאה וירטואלית

מטלה זו מעריכה את תפקוד ייצוג הליבה התחבירי ואת רכיבי הפלט המילולי. היא לא דורשת קלט שמיעתי ופלט ספרתי. מציגים למשתתף רשימת מספרים. בכל מספר הספרות הן ברצף עולה (למשל 1234) או יורד (4321). על הדף לא כתוב המספר כולו אלא רק הספרה הראשונה, כמות הספרות, וחץ מכוון למעלה/למטה כדי לציין רצף עולה/יורד. לדוגמה, אם כתוב 5xx עם חץ למעלה, המשתתף צריך לומר "חמש מאות שישים ושבע". המשתתפים מתבקשים לענות מהר ומדויק, כדי למנוע שימוש באסטרטגיות לפתרון. המטלה כוללת 60 סדרות מספרים בני 3-5 ספרות המכילות ספרות בין 2-9.

התוצאות הושוו לקבוצת ביקורת שכללה 31 משתתפים. שיעור הטעויות הממוצע שלהם היה 8.45% (ס.ת 3.1). ביצעו של NANI היה טוב מזה של קבוצת הביקורת, 3.3% טעויות בלבד, Crawford & Howell (1998) $t(30) = -1.63$, one-tailed $p = .05$, ואילו BIMA ביצעה 10% טעויות, Crawford & Howell (1998) $t(30) = .49$, one-tailed $p = .31$.

הביצוע התקין בשתי המטלות – קריאת מספרים וקריאה וירטואלית – מצביע על ייצוג ליבה ופלט מילולי תקינים. מטלה נוספת הבודקת תחביר ליבה ופלט המילולי מופיעה בנספחים.

4.2.3. אין ליקוי בכתיבת ספרות (ברמה המוטורית)

כדי לשלול את האפשרות שמקור הקושי נובע מכתיבה מוטורית של הספרות, העברנו מטלות שבודקות פלט ספרתי ללא קלט:

העתקה מיידית

במסגרת המטלה (סוללת "מים כתיבה", דותן, הנדלסמן וכהן, 2022), המשתתפים מתבקשים להעתיק 120 פריטים הכוללים מספרים רב ספרתיים בני 3-6 ספרות. המספרים מוצגים בפני המשתתפים עד לסיום העתקתם וזאת כדי להקל על הקלט הספרתי. לכן, נצפה שאם יש ליקוי מוטורי, נראה קושי אצל המשתתפים בכתיבת הספרות. המשתתפים לא הראו קושי מבחינה מוטורית של כתיבת הספרות, עיצוב הספרות היה תקין. NANI עשה 3.33% טעויות ו-BIMA עשתה 0.83% טעויות.

מספר	מספר
43512	982
2506	8247
629	60783
34716	354
9753	672489
32047	716
4860	30469
69758	8519
50237	47946
2043	93075
62819	5968
273	286675
408	7054
927853	25469
312	1920
70542	

NANI

מספר	מספר
43512	982
2506	8947
629	60783
34716	354
9753	672489
32047	716
4860	30429
69758	8519
50237	47946
2043	93075
62819	5968
273	284675
408	7054
927853	25469

BIMA

תרשים 2. ביצוע המשתתפים במטלת העתקת מספרים

הכתבת ספרה - ספרה מיידיית

המטלה (סוללת "מים כתיבה", דותן, הנדלסמן וכהן, 2022) מכילה 120 פריטים הכוללים מספרים רב-ספרתיים. כל מספר הוקרא כרצף ספרות בודדות והמשתתף התבקש לרשום את הספרות תוך כדי השמעתן כדי להקל על הקלט השמיעתי. לדוגמא, המספר 6,379 הוקרא "שש שלוש שבע תשע". אם המשתתף טעה בכתיבת המספר, הוא רשאי לכתוב שוב את המספר, אך גם הטעות הראשונה תיספר. המטלה כוללת 275 מספרים רב ספרתיים בני 6 – 3 ספרות המוצגים בסדר אקראי אך אחיד לכל המשתתפים. 85 פריטים בכל אחד מהאורכים של 4, 5 ו- 6 ספרות ו- 20 פריטים בני 3 ספרות. 232 פריטים כוללים את הספרה 0 במיקומים שונים ו- 32 פריטים מכילים את הספרה 1 במיקום העשרות.

הספרות 2-9 מופיעות בכמויות שוות ברשימה. המספרים מורכבים מ-29 תבניות שונות כאשר ב-134 פריטים ישנם דפוסים היוצרים עומס זיכרון (4-5 מילות מספר) ו-141 הפריטים הנותרים כוללים 2 או 3 מילות מספר ואינם יוצרים עומס זיכרון.

אם מקור הליקוי הוא בפלט הספרתי, נצפה לראות שיעור טעויות גבוה במטלה זו. מבחינה מוטורית, ראינו ביצוע תקין של שני המשתתפים באופן כתיבת הספרות. תוצאות מטלה זו הושו לקבוצת ביקורת ומתוארות בטבלה 4. ההנמכה בביצוע של שני המשתתפים הייתה כנראה בשל קושי של זיכרון. הסבר לכך יופיע בפרק 4.4.

לסיכום, ממצאי מטלות אלו שוללות קושי ברמה המוטורית של כתיבת הספרות. הן לא שוללות ליקוי אחר בשלבי הפלט הספרתי, אבל אפילו אם למשתתפים יש ליקוי כזה, הוא לא יכול להסביר את אי הצלחתם במטלות האחרות ולכן לא פוגע במסקנתנו שקיים ליקוי בקלט המילולי - פונולוגי.

4.3. הקושי הוא לא רק תחבירי או לקסיקלי

באפר הקלט הפונולוגי מכיל גם מידע תחבירי וגם מידע לקסיקלי. רכיב זה מאחסן את המידע הפונולוגי של המספר לפני שהוא עובר לשלבי העיבוד הבאים. לכן, ליקוי בבאפר עלול להוביל לטעויות משני סוגי המידע. זיהוי של דפוס משולב של טעויות אלה עשוי להעיד על ליקוי בבאפר ובכך לשלול אפשרויות של ליקויים הנובעים מתחביר הליבה, זיהוי ספרה ופלט ספרתי.

4.3.1. קושי תחבירי ולקסיקלי בהכתבת מספרים

מטלת הכתבת מספרים הועברה למשתתפים במספר גרסאות. כל המטלות כוללות את אותם הפריטים, כשבכל מטלה יש שינוי באופן ההעברה. פירוט על אופן העברת המטלה בגרסה המקורית (המעוכבת) ניתן לקרוא בפרק 4.1. גרסה נוספת שהועברה היא הכתבת מספרים קצרים. הנחיות המטלה זהות למטלת הכתבת מספרים מעוכבת. המספרים בגרסה זו היו בני 6-3 ספרות ועם 2-3 מילות מספר, עם אפס, שהוצגו בסדר אקראי (זהה לכל המשתתפים). למשתתפים היו הרבה טעויות בהכתבה, והנקודה החשובה היא שהיו גם טעויות תחביריות וגם טעויות לקסיקליות (טבלה 4).

4.3.2. קושי תחבירי ולקסיקלי ספציפית בשלב הקלט - מילולי שמיעתי

בדקנו את דפוסי הטעויות במטלות שמערבות את מנגנון הקלט השמיעתי ולא מערבות את הפלט הספרתי. המטרה היא להראות דפוס משולב של טעויות לקסיקליות ותחביריות במטלות אלה, כדי לחדד שהליקוי לא רק נובע ממנגנון הקלט, אלא ספציפית מהבאפר המכיל את שני סוגי המידע. מטלת חזרה מעוכבת מאפשרת לעשות טעויות משני הסוגים. מטלת זהה/שונה וספרה חסרה בודקות יכולות לקסיקליות, ומטלת קטגוריה חסרה בודקת יכולות תחביריות. מטלת **חזרה מעוכבת** תוארה בפרק הקודם, והיא כוללת קלט מילולי - פונולוגי אבל לא כוללת פלט ספרתי. למשתתפים היו גם טעויות לקסיקליות וגם טעויות תחביריות (טבלה 6).

המטלות הבאות תוארו בפרק 4.2.1 וכל אחת מהן בודקת או יכולות לקסיקליות או יכולות תחביריות במנגנון הקלט המילולי - פונולוגי. **מטלת זהה/שונה** בודקת רק יכולות לקסיקליות כי המבנה של כל זוג פריטים במטלה הוא זהה והשוני הוא רק במיקום הספרות בכל פריט. לדוגמה: 3,704,500 - 3,504,700. **מטלת חמש-בש (ספרה חסרה)** בודקת גם היא רק יכולות לקסיקליות כי המשתתפים מתבקשים לזהות את הספרה החסרה בין 5-1 בכל שלב ואין משמעות למבנה התחבירי של הפריטים. לדוגמה: ברצף הפריטים 3, 40, 100, 50, 2 הספרה החסרה היא 1. לעומת זאת, **מטלת חמש-בש (קטגוריה)** בודקת רק יכולות תחביריות כי המשתתפים צריכים לזהות בכל מספר איזו קטגוריה (עשרות / מאות / אלפים / עשרות אלפים) חסרה תוך כדי שהיא מבוססת על הספרה 5. לדוגמה: במספר 3,609 המילה החסרה היא חמישים. בכל 3 המטלות, המשתתפים ביצעו שיעור טעויות גבוה, כפי שכבר תואר בטבלה 5.

לסיכום, ארבעת המטלות הבודקות את מנגנון הקלט הפונולוגי ללא פלט ספרתי מראות דפוס של טעויות לקסיקליות ותחביריות ובכך מחזקות את האפשרות שהליקוי נובע מהבאפר.

4.4. הקושי מושפע מעומס הזיכרון

באפר הקלט הפונולוגי הוא רכיב זיכרון לטווח קצר, שמאחסן מידע באופן זמני לפני שהוא מעובד הלאה. מאפיין מרכזי שלו, כמו כל רכיב זיכרון לטווח קצר, הוא רגישות רבה לעומס הזיכרון, כיוון שהקיבולת של רכיבי זיכרון לטווח קצר היא מוגבלת. בהתאמה לכך, ראינו לעיל שלמשתתפים היה קושי במטלות זיכרון (ספאן מאציינג ספרות ומילים, ספאן ספרות ומילים), כולל מטלה ספציפית שבדקת זיכרון של מילות מספר ברמת הקלט (ספאן מאציינג ספרות). בנוסף, העברנו כעת שני זוגות מטלות, בהם המטלות בכל זוג נבדלות זו מזו בעומס הזיכרון שהן דורשות.

השפעת עומס הזיכרון על מטלת הכתבת ספרה-ספרה

במטלה זו, מכתיבים למשתתפים רצף של ספרות, והם מתבקשים לרשום את רצף הספרות ששמעו לאחר סיום ההכתבה. גרסה אחת של מטלה זו כבר תוארה בפרק 4.2.2: שם, המשתתפים הורשו להתחיל לכתוב מייד עם תחילת הקראת המספר. כעת העברנו גרסה אחרת של המטלה, בה המשתתפים הורשו לכתוב רק אחרי סיום ההקראה (הכתבה מעוכבת) – שיטת העברה שיוצרת עומס גדול יותר על הזיכרון. ציפינו שאם הקושי נובע מעומס זיכרון, שיעור הטעויות בהכתבה המעוכבת יהיה גבוה יותר מאשר בהכתבה המיידית.

בהתאמה להשערה זו, הביצוע בהכתבה המיידית היה טוב יותר מהביצוע בהכתבה המעוכבת: ל-NANI היו 4.2% טעויות, בעוד בהכתבה מעוכבת היו לו 30.8% ($\chi^2 = 27, p < .001$). ל-BIMA היו 15%, בעוד בהכתבה המעוכבת היו לה 57.5% טעויות ($\chi^2 = 46.897, p < .001$).

ההבדל הגדול בביצוע הנבדקים בין שתי המטלות מחזק את הטענה שהקושי שלהם נובע מזיכרון: ככל שעומס הזיכרון במטלה גבוה יותר, הביצוע שלהם מידרדר.

השפעת עומס הזיכרון על מטלת זהה/שונה

מטלת זהה/שונה בודקת את הקלט השמיעתי והיא תוארה בפרק 4.2.1. המטלה מנסה לבחון האם ליקוי בבאפר נובע מקושי בזיכרון. מטלה זו והכתבת ספרה-ספרה שואפות שתיהן להבין את העיבוד השמיעתי, אך הן ניגשות לכך בצורה שונה; הכתבת ספרה-ספרה דורשת מהמשתתפים להאזין ולחזור על רצפי ספרות, ואילו מטלת זהה/שונה מבקשת מהמשתתפים לקבוע אם שני מספרים הם זהים או שונים, תוך הדגשת ניתוח השוואתי ולא רק היזכרות. לפיכך, מטרת מטלה זו היא להראות אפקט זיכרון ספציפי יותר.

כדי לבחון עומס זיכרון, העברנו שתי גרסאות למטלה זו. בגרסה אחת הנקראת זהה/שונה שמיעתי, יש עומס זיכרון רב. הנבדקים שומעים שני פריטים זה אחר זה ומתבקשים להכריע האם הם זהים או לא. בגרסה השנייה, הנקראת זהה/שונה ויזואלי, יש עומס זיכרון נמוך יותר: מספר אחד מוצג למשתתפים והמספר השני מושמע. גם כאן עליהם להכריע האם המספרים זהים או שונים. הפריטים בשתי המטלות היו זהים.

ביצועי שני המשתתפים במטלת זהה/שונה ויזואלי היו טובים יותר בהשוואה לביצועם בזהה – שונה שמיעתי באופן מובהק. NANI ביצע במטלת זהה/שונה שמיעתי 21% טעויות, לעומת 8.3% טעויות

במטלת זהה/שונה ויזואלית, $\chi^2 = 6.3, p < .001$. BIMA ביצעה במטלת זהה/שונה שמיעתי 38% טעויות ובמטלת זהה/שונה שמיעתי-ויזואלי 18% טעויות, $\chi^2 = 6.8, p < .001$.

ממצאים אלה מראים שאפקט הזיכרון נובע מהקלט השמיעתי ומחזקים את האפשרות שהבאפר רגיש לעומס זיכרון; ככל שמופעל יותר עומס זיכרון במטלה, שיעור הטעויות של המשתתפים עולה בהתאמה.

4.5. סיכום ביניים

ראינו ששלושת הקריטריונים לליקוי בבאפר קלט פונולוגי מתקיימים: א. הטעויות בהכתבת מספרים נובעות משלב הקלט. המשתתפים הראו קושי בכל המטלות המערבות קלט מילולי-פונולוגי. ב. הקושי הוא לא רק תחבירי או לקסיקלי. ראינו דפוס משולב של טעויות משני הסוגים אצל המשתתפים, כלומר גם טעויות שקשורות בזיהוי הספרות וגם כאלה שקשורות במבנה המספר. דפוס משולב של טעויות מצביע על ליקוי במנגנון שמכיל את שני סוגי המידע, ובאפר קלט פונולוגי הוא מנגנון כזה. ג. הקושי רגיש מאד לעומס הזיכרון, ובא לידי ביטוי בעיקר במטלות שמעמיסות על הזיכרון לטווח קצר.

ממצאים אלה מצביעים על ליקוי ברכיב זיכרון לטווח קצר בשלב הקלט המילולי-פונולוגי, רכיב שמחזיק גם מידע לקסיקלי וגם מידע תחבירי. במילים אחרות, באפר קלט פונולוגי.

4.6. הבאפר הכרחי לעיבוד מספרים רב-ספרתיים

בפרק 4.4 ראינו שעומס הזיכרון משפיע על הבאפר. אחת האינדיקציות לכך הייתה ההשוואה בין שתי הגרסאות של מטלת הכתבה ספרה-ספרה – מיידיית ומעוכבת: המשתתפים עשו הרבה טעויות כשהתבקשו להמתין עד סיום הקראת המספר לפני שכתבו (הכתבה מעוכבת), אבל לא כשהורשו להתחיל לכתוב מיידי עם תחילת ההקראה (הכתבה מיידיית). ההסבר לכך הוא שהוספת ה-delay, כלומר הדרישה לחכות עד לסיום השמעת הספרות לפני שמתחילים בכתובתן, הגדילה את עומס הזיכרון, כיוון שהמשתתפים נאלצו לשמור יותר מילות מספר בזיכרון עד שהורשו לכתוב. במילים אחרות, הטכניקה של הכתבה מיידיית אפשרה למשתתפים להפחית את כמות המילים שצריך לשמור בבאפר הקלט הפונולוגי, וכך להצליח במטלה על אף הליקוי בבאפר.

בניגוד לכך, בהכתבת מספרים שלמים במבנה תחבירי ("מאה עשרים ושלוש"), לא נמצא הבדל בביצוע המשתתפים בין הגרסה המיידיית לגרסה המעוכבת של המטלה (טבלה 4) – לא אצל NANI ($\chi^2 = 1.5, p = .11$) ולא אצל BIMA ($\chi^2 = .02, p = .49$). היעדרו של הבדל מצביע על כך שבהכתבת מספרים שלמים לא ניתן ל"עקוף" את הבאפר או להקטין את מספר המילים בו. כלומר, כדי לעבד מספר שלם (במבנה תחבירי) שמושמע לנו, חייבים לשמור את כל מילות המספר בבאפר, ורק אז אפשר לעבד את מבנה המספר. באפר הקלט הפונולוגי הוא הכרחי כדי לעבד את המבנה התחבירי של המספר.

5. דיון

5.1. קושי בבאפר הקלט הפונולוגי

מטרת המחקר הייתה לתאר את תפקידו של זיכרון לטווח קצר בכתיבת מספרים, ובאופן ספציפי - לבדוק אם האם קיים באפר קלט פונולוגי והאם ליקוי בו הוא מקור אפשרי לקושי בכתיבת מספרים. לשם כך, בדקנו בפירוט את התפקוד של שני משתתפים עם ליקוי בכתיבת מספרים (דיסנומריה).

שני המשתתפים הראו קושי הנובע מבאפר הקלט הפונולוגי. מסקנה זו עולה מקיומן של שלושת התנאים לליקוי, אותם תיארונו בפרק המבוא: ראשית, ראינו ששני המשתתפים הראו קושי במטלות הבודקות קלט המילולי - מטלות ספאן מאצינג, זהה/שונה שמיעתי, ספרה חסרה (עם וללא מבנה) ומטלות חזרה. חלק מהמטלות האלה (ספרה חסרה, חזרה) דורשות, בנוסף למנגנון הקלט, גם את ייצוג הליבה התחבירי של מספרים ואת מנגנוני הפלט המילולי. כדי להראות שהקושי אכן נובע מהקלט המילולי, ולא נובע ממנגנונים אלה, העברנו מטלות שמראות שמנגנונים אלה תקינים: קריאת מספרים, קריאה וירטואלית ומיזוג ספרות. הצלחת המשתתפים במטלות אלה מראה שהליקוי שלהם הוא לא ברכיבים האלה, ומחזקת את האפשרות שלמשתתפים יש ליקוי במנגנוני הקלט המילולי.

הקריטריון השני היה להראות ששני המשתתפים עושים דפוס משולב של טעויות לקסיקליות ותחביריות – גם במטלת הכתבת מספרים, וגם במטלות שבדקו ספציפית את הקלט המילולי. אילו הליקוי היה ברכיב לקסיקלי (למשל זיהוי מילים), לא היינו רואים דפוס משולב של טעויות אלא רק טעויות לקסיקליות. אילו הליקוי היה תחבירי, היינו רואים רק טעויות תחביריות. קיומן של 2 סוגי טעויות תואם את האפשרות שהליקוי הוא ברכיב שמשפיע גם על מידע תחבירי וגם על מידע לקסיקלי. באפר קלט פונולוגי הוא רכיב כזה.

הקריטריון השלישי היה להראות שהקושי של המשתתפים רגיש לעומס זיכרון. במטלת הכתבת ספרה-ספרה הייתה השפעה של עומס הזיכרון: המשתתפים הצליחו בגרסה המיידית אך ביצעו טעויות רבות בגרסה המעוכבת, בה היה פער זמן יותר גדול בין שמיעת המספר לכתיבתו. מטלה נוספת שמראה שהקושי רגיש לזיכרון היא מטלת זהה/שונה. גם במטלה זו נראה פער בביצועים בין שתי גרסאות המטלה; המשתתפים הצליחו בגרסת זהה/שונה ויזואלי-שמיעתי, שדרשה עומס זיכרון נמוך, יותר מהגרסה השמיעתית בלבד, בה עומס הזיכרון היה גבוה.

קיומם של 3 הקריטריונים האלה מראה שהליקוי הוא ברכיב זיכרון לטווח קצר, שכולל גם מידע לקסיקלי וגם מידע תחבירי, בשלב הקלט המילולי. במילים אחרות, באפר קלט פונולוגי. הממצאים מחדדים את תפקידו של הבאפר כאחראי על אחסון מידע במנגנון הקלט השמיעתי.

5.2. סוגים שונים של באפרים פונולוגיים

5.2.1. דיסוציאציה בין באפר קלט פונולוגי לבאפר פלט פונולוגי

באפר הקלט והפלט הפונולוגיים הם שני מנגנונים לאחסון מידע פונולוגי לטווח קצר. באפר הקלט הפונולוגי מאחסן מידע פונולוגי עד לשלב ניתוח המילה והבנתה, ואילו באפר הפלט הפונולוגי מאחסן את הצורה הפונולוגית של מילה עד להפקתה. המחקר הנוכחי מציג דיסוציאציה בין שני

הבאפרים: שני המשתתפים הראו קושי במטלות המערבות את באפר הקלט (ספאן, מאצינג, זעה/שונה שמיעתי, ספרה חסרה, קטגוריה חסרה), אבל הראו ביצוע תקין של מטלות הבדקות את באפר הפלט הפונולוגי (קריאת מספרים, מיזוג ספרות, קריאה וירטואלית).

מחקרים קודמים (Dotan & Friedmann, 2015; García-Orza et al., 2020) מראים שישנה דיסוציאציה בין שני הבאפרים בכיוון ההפוך. כלומר, ליקוי בבאפר הפלט הפונולוגי ותפקוד תקין של באפר הקלט הפונולוגי. ממצאים אלה, יחד עם ממצאי המחקר הנוכחי, מהווים דיסוציאציה כפולה בין באפר הקלט הפונולוגי לבאפר הפלט הפונולוגי, ומראים באופן חד-משמעי ששני הבאפרים נפרדים זה מזה.

5.2.2. הקשר לבאפרים פונולוגיים בעיבוד מילים

האם באפר הקלט הפונולוגי של ספרות, אותו בדקנו כאן, הוא אותו באפר קלט פונולוגי שמשמש אותנו גם בהבנה שמיעתית של מילים שאינן מילות מספר? ככל הידוע לנו, שאלה זו לא נבדקה ישירות. עם זאת, יש ממצאים אמפיריים שונים שעשויים להשליך על השאלה במידה מסוימת.

מנגנוני העיבוד של מילים ומספרים הם נפרדים זה מזה לפחות באופן חלקי. קיימים מחקרים שמתארים מקרים של קושי בעיבוד מילים ללא קושי בעיבוד מספרים, ולהיפך. למשל, ישנה עדות לליקוי סלקטיבי של תפיסת מילים אך לא של מילות מספר, כאשר הנבדק היה יכול לחזור על מילות מספר אך לא היה מסוגל לעשות זאת על שתי מילים שאינן מספרים (Fischer-Baum et al., 2018). בנוסף, בהצגת מילים ומספרים נצפו אזורי אקטיבציה שונים במח (Aurtenetxe et al., 2020; Park et al., 2012). לפיכך, כיוון שתהליכים של עיבוד מילים ומספרים הם נפרדים, לא מופרך לשער שיש באפרים נפרדים לעיבוד מילים ומספרים (אם כי הדבר אינו הכרחי).

לעומת זאת, מחקרים אחרים (Conway et al., 2005) מדווחים על מתאמים בין מטלות זיכרון לטווח קצר למילים ולספרות. גם במחקר הנוכחי, מצאנו מתאם בין ספאן מילים לבין ספאן ספרות. מתאם זה מצביעה על איזושהי יכולת משותפת לתפקודי זיכרון לטווח קצר מילים ולספרות – אך עדיין לא מעיד על הימצאות שני באפרים נפרדים לגמרי.

5.3. חשיבותו של באפר הקלט הפונולוגי

לבאפר הקלט הפונולוגי חשיבות רבה בתהליך עיבוד מספרים והוא מאחסן את מילות המספר לזמן מוגבל עד לשלבי העיבוד הבאים. אחסון המידע משמעותי במיוחד כאשר למספר יש מבנה תחבירי: המשתתפים הראו שיפור בביצוע בהכתבת ספרה-ספרה מיידית בהשוואה לגרסה המעוכבת. לעומת זאת, בהכתבת מספרים שהוקראו כמספר שלם (כלומר, כאשר המטלה דורש עיבוד של מספר עם מבנה תחבירי) לא נראה שיפור בביצוע בגרסה המיידית של המטלה בהשוואה לגרסה המעוכבת. הסקנו מכך שבהכתבת מספרים שלמים אי אפשר "לדלג" על באפר הקלט הפונולוגי, אפילו בטכניקה של הכתבה מיידית. כלומר, באפר הקלט הפונולוגי הוא הכרחי לצורך עיבוד (מתוך שמיעה) של מספרים רב-ספרתיים בעלי מבנה תחבירי.

אנו משערים שלבאפר תפקיד מכריע בתהליך יצירת ייצוג הליבה של מבנה המספר: הוא משמש כאזור אחסון זמני או סביבת עבודה בו נאגר מידע אודות מבנה המספר עד ליצירת ייצוג הליבה. ככל הנראה, אחסון המידע הוא קריטי מכיוון שתהליך יצירת ייצוג ליבה דורש גישה לכלל הנתונים

הקשורים למספר. ללא הבאפר, התהליך שבונה את ייצוג הליבה התחבירי היה נאלץ לעבוד עם נתונים חלקיים, וככל הנראה זה לא אפשרי, או לכל הפחות זה קשה.

תהליך תחבירי נוסף במנגנון הקלט הוא זיהוי הקטגוריה של כל מילת מספר (יחידות, עשרות וכו'). ניתן לשער כי תהליך זה יכול להתבצע על כל מילת מספר בנפרד, מכאן שאינו זקוק לבאפר. אכן, ממצאי המחקר הנוכחי רומזים כי ייתכן שתהליך זה מתרחש באופן עצמאי, ללא הסתמכות על הבאפר; המשתתפים הצליחו במטלת הכתבת ספרה-ספרה מיידית אך התקשו בגרסה המעוכבת של אותה המטלה. כלומר, לבאפר יש תפקיד חשוב בעיבוד המבנה התחבירי של המספר, אבל זה נכון רק לגבי חלק מההיבטים של מבנה המספר, ולא לגבי היבטים אחרים.

5.4. מודל קוגניטיבי של מנגנון הקלט המילולי

5.4.1. הנחות

על סמך המסקנות שהוצגו לעיל, ועל סמך מסקנות של מחקרים קודמים, אנו מציעים מודל קוגניטיבי שמתאר בפירוט את שלבי העיבוד השונים בקלט המילולי-פונולוגי של מספרים. המודל מבוסס על מספר הנחות – חלקן מסקנות שמבוססות על ממצאים אמפיריים, וחלקן היפותזות.

1. בקלט המילולי יש באפר קלט פונולוגי שתפקידו לאחסן באופן זמני מידע אודות המספר שנשמע לפני עיבוד נוסף. הנחה זו מבוססת על ממצאי המחקר הנוכחי המוכיחים את קיומו של באפר זה, על פי שלושת קריטריונים שהוזכרו לעיל.

2. בקלט המילולי קיים גם מנגנון שמוזהה מילות מספר שלמות. הנחה זו מבוססת על ממצאי המחקר של Fischer-Baum, Mis, and Dial (2018). שלא כמו בשמיעת מילים רגילות (שאינן מילות מספר), כאן זיהוי המילים לא נעשה ברמת פונמה בודדת אלא בתור מילת מספר שלמה. כלומר, ההבחנה בין עיבוד מילות מספר לעיבוד מילים שאינן מספרים מתחילה בשלב מוקדם, טרום-לקסיקלי.

3. בקלט המילולי יש מנגנונים לקסיקליים ומנגנונים תחביריים, והם נפרדים זה מזה (כהן, 2023). תהליכים לקסיקליים כוללים זיהוי ועיבוד של מילות המספר עצמן, בעוד שתהליכים תחביריים עוסקים בסדר הספרות, מבנה המספר (מיקום האפס), ומיקום היחסי של כל מילה במספר. תהליכים אלה יכולים להיפגע באופן סלקטיבי וקיימות דיסוציאציות כפולות ביניהן (כהן, 2023).

4. באפר הקלט הפונולוגי משמש כ"שולחן עבודה" לבניית ייצוג הליבה התחבירי של המספר. הנחה זו מבוססת על ממצאי המחקר הנוכחי: כפי שראינו בפרק 5.3, לבאפר יש תפקיד חשוב בעיבוד המבנה התחבירי של המספר, והוא הכרחי לעיבוד מספרים שלמים עם מבנה תחבירי.

5.4.2. תיאור המודל

המודל המתואר להלן משקף את אוסף ההנחות שהוצגו לעיל. לפי המודל, שלב העיבוד הראשון הוא זיהוי פונולוגי של מילות מספר. זהו מנגנון המזהה את מילות המספר פונולוגית, לדוגמה: מאתיים, ארבעים, חמש.

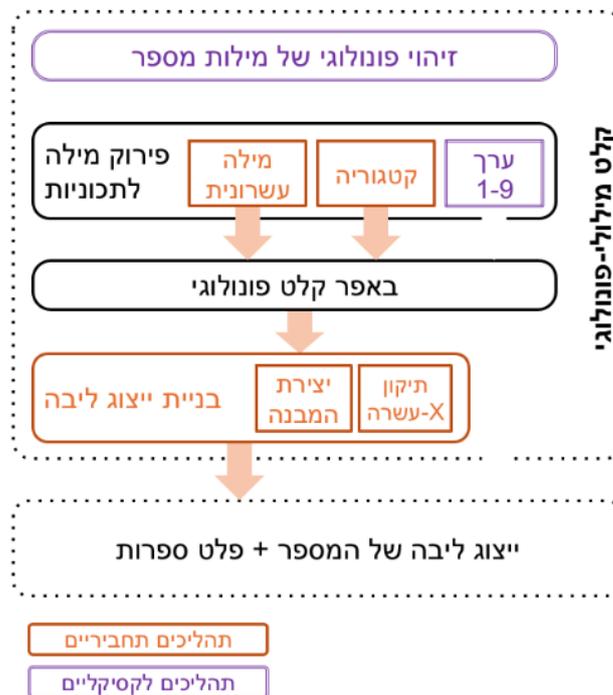
בשלב הבא, המידע מועבר לשלב פירוק המילים לתכונות. מנגנון זה "מפרק" כל מילת מספר לתכונות – מידע לקסיקלי ותחבירי: זיהוי 9-1 רכיב שתפקידו לזהות, לגבי כל מילת מספר, מה

ערך 1-9 שלה. כלומר, רכיב זה מזהה את המידע הלקסיקלי. לדוגמה, במספר שלושים הספרה המזהה היא 3. שני רכיבים נוספים כוללים מידע תחבירי של המספר: **זיהוי קטגוריה** – רכיב המזהה את הקטגוריה של כל מילת מספר, לדוגמה: 30 ← עשרות, **זיהוי מילה עשרונית** ← מזהה את המילים העשרוניות - אלף, אלפים במספר. לדוגמה, הרכיב יודע לזהות שבמספר ארבע מאות שלושים אלף מאתיים, המילה ארבע מאות ממוקמת במיקום מאות אלפים, שלושים בעשרות אלפים ומאתיים במיקום המאות. רכיבים אלה לא צריכים את הבאפר כי הם יכולים לעבוד על מילת מספר בנפרד.

המידע אודות זהות הספרות והקטגוריות שלהן מאוחסן לזמן מוגבל **בבאפר הקלט הפונולוגי**, עד למעבר לשלבי העיבוד הבאים. הבאפר מאחסן מידע לקסיקלי ותחבירי, ואנו משערים שהוא שומר את פריטי המידע האלה כבר מפורקים לתכונות (ספרות, קטגוריות, מילים עשרוניות).

בשלב הבא, המידע עובר מהבאפר **לבניית ייצוג ליבה תחבירי**. רכיב זה מקבל מידע תחבירי מהבאפר על קטגוריות המספר. שלב זה בונה את הייצוג ההיררכי של המספר (העץ התחבירי), יודע להתייחס לסדר של מילות המספר, וגם יודע "לתרגם" את אי-הרגולריות של מילות X-עשרה למבנה של עשרות+יחידות – המבנה לפיו מאורגן ייצוג הליבה.

ייצוג ליבה תחבירי עצמו הוא רכיב ביניים הנמצא בין מנגנון הקלט לפלט הפונולוגי ותפקידו לאחסן את המידע התחבירי של מבנה המספר ולהעביר אותו לשלבי העיבוד הבאים.



תרשים 3. מודל מנגנון הקלט השמיעתי

5.5. סיכום

זיכרון לטווח קצר הוא הכרחי למטלות קריאה וכתובה – מחקרים קודמים מראים על מתאם בין קריאה/כתיבה לבין ביצוע במטלות ספאן הבודקות זיכרון לטווח קצר (Batista et al., 2023; Camos, 2008; Moura et al., 2013; Pixner et al., 2011). המחקר הנוכחי העמיק בקשר הזה והראה כיצד מנגנון זיכרון לטווח קצר משתלב במנגנוני הקלט המילולי-פונולוגי של מילות מספר, ומשפיע על מטלות של הבנת מספרים וכתובת מספרים משמיעה. הראינו את קיומו של באפר קלט פונולוגי, מנגנון לזיכרון לטווח קצר המכיל מידע פונולוגי שהכרחי במטלות קלט שמיעתי. בנוסף, הצענו מודל מפורט לגבי המבנה של מנגנון הקלט המילולי-פונולוגי – מודל שמשלב את הרעיון של באפר פונולוגי עם הרעיון של הפרדה בין תהליכים תחביריים ללקסיקליים.

המחקר גם מדגיש את הרעיון שקושי בזיכרון לטווח קצר הוא סוגייה שיש להתחשב בה באבחון וטיפול בלקויות כתיבת מספרים. יש להתייחס למנגנון הבאפר באבחון, וספציפית – חשוב להבחין בין קושי בזיכרון לבין קושי תחבירי. כפי שראינו, טעויות תחביריות בכתובת מספרים עשויות לנבוע גם מליקוי בבאפר, כך שאין להסיק באופן גורף כי טעויות תחביריות נובעות מקושי במנגנון תחבירי. לבאפר הקלט הפונולוגי תפקיד חשוב במטלת הכתבת מספרים. הוא לא רק שומר מידע באופן זמני אלא גם אחראי להעביר מידע לקסיקלי ותחבירי לשלבי העיבוד הבאים עד לכתובת המספר.

ביבליוגרפיה

- דוֹתן, ד., הנדלסמן, נ., וכהן, ז. (2022). מים – מבדק יכולות מספריות בכתיבה. אוניברסיטת תל אביב.
- דוֹתן, ד., ופרידמן, נ. (2014). מים – מבדק יכולות מספריות. אוניברסיטת תל אביב.
- כהן, ז. (2023). מ"תשע מאות ושתיים" ל- 90,02: תהליכים תחביריים ולקויות בכתיבת מספרים. עבודת תזה, אוניברסיטת תל אביב.
- פרידמן (2003). בליפ: סוללה לאבחון יכולות פונולוגיות. אוניברסיטת תל אביב.
- פרידמן, נ. וגביעון, א. (2008). פריגבי – סוללה לאבחון זיכרון עבודה פונולוגי, שפה ומוח, 7, 161-181.
- פרידמן, נ. וגביעון, א. (2003). תלתן: בטריה לאבחון דיסלקסיות. אוניברסיטת תל אביב.
- Aurtenetxe, S., Molinaro, N., Davidson, D., & Carreiras, M. (2020). Early dissociation of numbers and letters in the human brain. *Cortex*, *130*, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.03.030>
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working Memory. In G. H. Bower (Ed.), *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 8, pp. 47–89). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
- Batista, L. T., Gomides, M., Koltermann, G., Bahnmueller, J., Moeller, K., Salles, J. F. D., Haase, V. G., Moura, R., & Lopes-Silva, J. B. (2023). The impact of phonological processing on number transcoding. *Cognitive Development*, *66*, 101320. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2023.101320>
- Berch, D. B. (2005). Making Sense of Number Sense: Implications for Children With Mathematical Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *38*(4), 333–339. <https://doi.org/10.1177/00222194050380040901>
- Camos, V. (2008). Low working memory capacity impedes both efficiency and learning of number transcoding in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *99*(1), 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.06.006>
- Cascella, M., & Al Khalili, Y. (2019). *Short Term Memory Impairment* (31424720). StatPearls Publishing, Treasure Island (FL). <http://europepmc.org/abstract/MED/31424720>
- Cipolotti, L., & Butterworth, B. (1995). *Toward a Multiroute Model of Number Processing: Impaired Number Transcoding With Preserved Calculation Skills*.
- 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)
- Clements, D. H., & Sarama, J. (2011). Early Childhood Mathematics Intervention. *Science*, *333*(6045), 968–970. <https://doi.org/10.1126/science.1204537>
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*(1), 87–114. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>
- Cowan, N. (2008). Chapter 20 What are the differences between long-term, short-term, and working memory? In W. S. Sossin, J.-C. Lacaille, V. F. Castellucci, & S. Belleville (Eds.), *Progress in Brain Research* (Vol. 169, pp. 323–338). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(07\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(07)00020-9)
- De Smedt, B., Reynvoet, B., Swillen, A., Verschaffel, L., Boets, B., & Ghesquière, P. (2009). Basic number processing and difficulties in single-digit arithmetic: Evidence from Velo-Cardio-Facial Syndrome. *Cortex*, *45*(2), 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.06.003>
- 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>
- Dotan, D., & Brutmann, N. (2022). Syntactic chunking reveals a core syntactic representation of multi-digit numbers, which is generative and automatic. *Cognitive*

- Research: Principles and Implications*, 7(1), 58. <https://doi.org/10.1186/s41235-022-00409-2>
- Dotan, D., & Friedmann, N. (2015). Steps towards understanding the phonological output buffer and its role in the production of numbers, morphemes, and function words. *Cortex*, 63, 317–351. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2014.08.014>
- Dotan, D., Handelsman, N., & Cohen, Z. (2022). MAYIM – Battery for assessment of number writing abilities. Tel Aviv University
- 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>
- Frick, R. W. (1984). Using both an auditory and a visual short-term store to increase digit span. *Memory & Cognition*, 12(5), 507–514. <https://doi.org/10.3758/BF03198313>
- García-Orza, J., Gutiérrez-Cordero, I., & Guandalini, M. (2020). Saying thirteen instead of forty-two but saying lale instead of tale: Is number production special? *Cortex*, 128, 281–296. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.03.020>
- 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)
- Gvion, A., & Friedmann, N. (2012). Phonological short-term memory in conduction aphasia. *Aphasiology*, 26(3–4), 579–614. <https://doi.org/10.1080/02687038.2011.643759>
- 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>
- Jacquemot, C., & Scott, S. K. (2006). What is the relationship between phonological short-term memory and speech processing? *Trends in Cognitive Sciences*, 10(11), 480–486. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.09.002>
- Jones, G., & Macken, B. (2015). Questioning short-term memory and its measurement: Why digit span measures long-term associative learning. *Cognition*, 144, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.07.009>
- Jordan, N. C., Glutting, J., & Ramineni, C. (2010). The importance of number sense to mathematics achievement in first and third grades. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.07.004>
- 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)
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81–97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
- Moura, R., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K., & Haase, V. G. (2013). Transcoding abilities in typical and atypical mathematics achievers: The role of working memory and procedural and lexical competencies. *Journal of Experimental Child Psychology*, 116(3), 707–727. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.07.008>
- 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>
- Park, J., Hebrank, A., Polk, T. A., & Park, D. C. (2012). Neural Dissociation of Number from Letter Recognition and Its Relationship to Parietal Numerical Processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(1), 39–50. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00085

- Parsons, S., & Bynner, J. (1997). Numeracy and employment. *Education + Training*, 39(2), 43–51. <https://doi.org/10.1108/00400919710164125>
- Pixner, S., Zuber, J., Heřmanová, V., Kaufmann, L., Nuerk, H.-C., & Moeller, K. (2011). One language, two number-word systems and many problems: Numerical cognition in the Czech language. *Research in Developmental Disabilities*, 32(6), 2683–2689. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.06.004>
- Rohaeti, E. E. (2019). Building Students' Hard and Soft Skills through Innovative Teaching Approaches to Mathematics. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54(5), 48. <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.54.5.48>
- Sokolowski, H. M., & Ansari, D. (2017). Who Is Afraid of Math? What Is Math Anxiety? And What Can You Do about It? *Frontiers for Young Minds*, 5, 57. <https://doi.org/10.3389/frym.2017.00057>
- Stech, S. (2008). School Mathematics As A Developmental Activity. In A. Watson & P. Winbourne (Eds.), *New Directions for Situated Cognition in Mathematics Education* (pp. 13–30). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71579-7_2
- Wood, J., & Eriksen, E. (2005). *The Effects of Simultaneous Paring of Auditory and Visual Stimuli And Visual Stimuli in Short-term Memory*.
- Yang, D.-C., Li, M., & Lin, C.-I. (2008). A Study of the Performance of 5th Graders in Number Sense and its Relationship to Achievement in Mathematics. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 6(4), 789–807. <https://doi.org/10.1007/s10763-007-9100-0>

נספחים

א. מטלת הכתבת מספרים ומטלת זהה/שונה שמייעתי

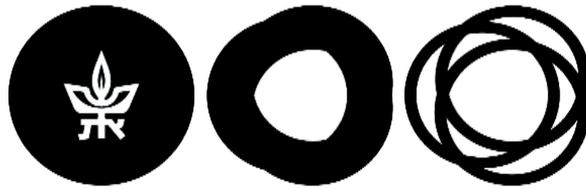
ניתן למצוא את רשימות פרטי המטלות באתר מים : <http://www.mathinklab.org/mim>

ב. מטלת מיזוג ספרות

המטלה דורשת שימוש בייצוג המבנה המרכזי וברכיבי הפלט המילולי. בכל שלב, המשתתפים שמעו רצף ספרות (למשל "שתיים, שלוש, ארבע") ואמרו את המספר הרב ספרתי המתקבל מרצף הספרות ("מאתיים שלושים וארבע"). 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 הושגו לתפקוד של קבוצת ביקורת עם 31 משתתפים שעשו בממוצע 10.1% טעויות (ס"ת 8.0).

שיעור הטעויות של NANI עמד בטווח התקין של קבוצת הביקורת ועמד על 6.67%, Crawford & Howell (1998) $t(30) = -.25$, one - tailed $p > .05$. לעומת זאת, שיעור הטעויות של BIMA עמד על 21.6% והיה גבוה מזה של קבוצת הביקורת אך לא מובהק, Crawford & Howell (1998) $t(30) = .854$, one - tailed $p > .05$.

הממצאים כן תומכים באפשרות שרכיבי התחביר ליבה והפלט של NANI תקינים. לגבי BIMA, שיעור הטעויות שלה היה מעט גבוה. הסבר אפשרי לכך הוא שהמטלה מעמיסה על הזיכרון לטווח קצר. אפשרות נוספת היא של BIMA יש קושי קוגניטיבי כללי.



TEL AVIV אוניברסיטת
UNIVERSITY תל אביב

Tel Aviv University
The Jaime and Joan Constantiner
School of Education

The paper was submitted as the thesis for M.A degree by

Hadar Efodi Klerman

311361638

The study was carried out under the supervision of

Dr. Dror Dotan

August 2024