

בית הספר לחינוך ע"ש חיים וג'ואן קונסטנטינר
הפקולטה למדעי הרוח ע"ש לסטר וסאלי אנטין
אוניברסיטת תל אביב



עבודת גמר לקראת התואר "מוסמך מדעי הרוח" (MA)

החוג לחינוך – המגמה ללקויות למידה

ייצוג מנטלי תחבירי של מספרים מילוליים

The mental representation of the number's verbal structure

מוגש על ידי נדין ברוטמן

בהנחייתו ד"ר דרור דותן

יוני 2020

מספר מילים : 11,640

תודות

ראשית, תודה ל**ד"ר דרור דותן** על שעות של חשיבה משותפת, שיח מלמד ומאפשר ודיבור בגובה העיניים. תהליך שנתן לי מוטיבציה להמשיך ולחקור בעתיד המקצועי שלי, לחשוב מחוץ לקופסא ולכתוב דברים מורכבים בפשטות. תודה על נוכחות מכווינה, זמינות והבנה משמעותית של מה הוא מחקר אקדמי.

לאחותי הקטנה, **ליאור** וזנה, שחשפה אותי לעולם לקויות הלמידה במתמטיקה, הקשיים, ההתמודדות היום יומית וההצלחות שבדרך. להורים שלי, **פטריק וטליה** וזנה, שמאמינים, עוזרים ומתרגשים לאורך כל הדרך האקדמית שלי.

ותודה למשפחה הפרטית שלי, ל**אדם** השותף הכי מדהים ומאפשר, תומך ומעודד. תודה על שעות של חזרה על מספרים, התעניינות, זריקות מוטיבציה ועצות יצירתיות שבלעדיהן לא הייתי מוסגלת להמשיך. וגלי שלי, שיוצק משמעות מיוחדת ומרגשת לכל דבר שאני עושה בעולם ומלמד אותי לעשות כמה דברים גדולים במקביל.

4.....	תקציר	.1
5.....	Abstract	.2
7.....	מבוא	.3
7.....	מודל קריאת מספרים	3.1
9.....	ייצוג היררכי של מבנה המספר	3.2
11.....	המחקר הנוכחי	3.3
11.....	Chunking	3.3.1
13.....	צ'אנקינג של מספרים	3.3.2
13.....	מבנה המחקר ומטרותיו	3.3.1
14.....	שיטה כללית	.4
	משתתפים 14	4.1
14.....	מבדק סינון – זיכרון לטווח קצר	4.2
15.....	ניסוי צ'אנקינג תחבירי	4.3
15.....	פריטים	4.3.1
15.....	הליך	4.3.2
16.....	קידוד הנתונים	4.4
16.....	ניתוח הנתונים	4.5
17.....	ניסוי 1: Structural chunking חופשי	.5
17.....	שיטה	5.1
19.....	תוצאות	5.2
22.....	דיון	5.3
24.....	ניסוי 2: Structural chunking עם רמיזה	.6
25.....	שיטה	6.1
	תוצאות ודיון 25	6.2
27.....	ניסוי 3: Structural chunking רנדומלי	.7
27.....	שיטה	7.1
	תוצאות ודיון 28	7.2
29.....	דיון כללי	.8
29.....	צ'אנקינג תחבירי	8.1
30.....	ייצוג חוצה שלשה	8.2
	אוטומטיות 31	8.3
33.....	היבטיים מתודולוגיים	8.4
34.....	מחקרי המשך	8.5
35.....	סיכום	.9
36.....	מקורות	

1. תקציר

כיצד אנחנו מעבדים מספרים רב-ספרתיים? מחקר זה עסק בשאלה האם קיים ייצוג תחבירי של מספרים ומהם מאפייניו. מחקרים קודמים בתחום הראו שישנו ייצוג תחבירי כלשהו, אך עדין קיימים פערים באשר לאפיונים ספציפיים של אותו ייצוג מנטלי של תחביר מספרים. במחקר ערכנו שלושה ניסויים שונים, והשתמשנו בפרדיגמת הצ'אנקינג התחבירי - מטלת חזרה על רצף של מילות מספר, המורכבת ממספר תנאים זהים, כאשר ההבדל היחיד בין התנאים הוא סדר המילים בתוך כל רצף. כל פריט שהנבדקים שומעים מורכב ממילות מספר ויכול להיות רצף תחבירי (ארבע מאות חמישים ושש) או רצף לא תחבירי (שש חמישים וארבע מאות). הנבדקים זכרו רצפים תחביריים יותר טוב מרצפים לא תחביריים, ממצא שמצביע על קיומו של המנגנון התחבירי שאיפשר להם למזג רצף תחבירי לצ'אנק אחד בזיכרון, וכך לשפר את רמת הזכירה. הנבדקים זכרו באופן הטוב ביותר גירויים של שני רצפים תחביריים (אלף שבע מאות עשרים / ארבעים ושמונה), ופחות טוב גירויים של רצף תחבירי אחד (ארבעים ושמונה אלף שבע מאות עשרים). ממצאים אלה מלמדים אותנו על אופן הייצוג התחבירי – ספציפית, על כך שהנבדקים ייצגו מבנים תחביריים חוצי-שלשה באופן אוטומטי: על אף שייצוג של רצף אחד יצר עומס על הזיכרון, הם ייצגו באופן אוטומטי את המבנה התחבירי הגדול ביותר שהגירווי אפשר. בשני ניסויי המשך, בדקנו: (2) האם הזכירה של רצפים תחביריים נבעה מאסטרטגיות של זיכרון וידע קודם (למשל ידע לגבי סדר קטגוריות) (3) האם המנגנון התחבירי יעיל וגמיש מספיק כדי לייצג מבנים שונים שמתחלפים באופן תדיר. ניסוי 2 הראה אפקט צ'אנקינג תחבירי גם כאשר הייתה רמיזה לנבדקים (באמצעות אינטונציה) כיצד לבצע את הצ'אנקינג. ניסוי זה מראה שאפקט הצ'אנקינג נובע מהיכולת לדחוס את המידע באמצעות ייצוג המבנה התחבירי של המספר, ושולל את האפשרות שאפקט הצ'אנקינג התחבירי נובע מכך שהמבנים התחביריים רק נתנו רמזים לאיך לבצע את הצ'אנקינג. ניסוי 3 הראה צ'אנקינג תחבירי גם כאשר הפריטים היו במבנים תחביריים שונים ומגוונים, שלא נכללו בניסויים הקודמים. ניסוי זה מצביע על גמישות המנגנון התחבירי, ועל היכולת לייצג מבנים אי-רגולריים ומשתנים בזמן קצר. לסיכום, ניתן לומר שהנבדקים השתמשו במנגנון התחבירי באופן אוטומטי, בלתי רצוני והיו מסוגלים לייצג מגוון רב של מבנים משתנים ללא הוראה מפורשת. נראה כי המנגנון התחבירי אינהרנטי בעיבוד מספרים רב-ספרתיים, כאשר הייצוג יכול להיות גם למבנים מורכבים וארוכים של יותר משלשה אחת. מנגנון זה הוא אוטומטי, ואי אפשר להסביר את הממצאים בתור אפקט של אסטרטגיות חיצוניות.

Abstract .2

How do we represent multi-digit verbal numbers? The present study addressed the question of whether we represent the syntactic structure of the verbal numbers, and examined what are the characteristics of this representation are. Recent studies have shown the existence of syntactic number representation, but there are still gaps regarding the specific characteristics of that mental representation. Here, we conducted three different experiments using the syntactic chunking paradigm – serial recall of a sequence of number words. The experiments consisted of several almost-identical conditions, with the only difference between the conditions being the word order within each sequence. Each item was a sequence of a number of words; it could be a syntactic sequence (e.g., *four hundred and fifty-six*) or a non-syntactic sequence (*six fifty-four hundred*). The participants remembered syntactic sequences better than non-syntactic ones, a finding that indicates the existence of the syntactic mechanism that allowed them to merge the words of a syntactic sequence into a chunk in working memory, thus improving the level of memorization. The performance was the best in the sequences with two syntactic segments (e.g., one thousand seven hundred and twenty / forty eight), with lower performance in sequences of one syntactic segment (forty-eight thousand seven hundred and twenty). These finding informs about the syntactic representation — specifically, that the participants represented cross-triplet syntactic structures: although single-chunk cross-triplet representation created load on working memory, they still automatically represented the largest syntactic structure that the stimulus allowed. In two follow-up experiments, we examined: (a) whether the better memorization of syntactic sequences was due to strategies of memory and prior knowledge (e.g. knowledge of categorical order); and (b) whether the syntactic mechanism is efficient and flexible enough to represent different structures that change frequently. Experiment 2 showed a syntactic chunking effect even when we provided cues (e.g., using intonation) as for how to group the words into chunks. This shows that the chunking effect stems from the ability to compress the information by representing the syntactic structure of the number, and refutes the possibility that syntax was not represented, but only provided hints as to how to chunk words. Experiment 3 showed a syntactic chunking effect even when the stimuli had various and constantly-changing syntactic structures, which were not included in the previous experiments.

This shows the flexibility of the syntactic mechanism, and its ability to represent irregular and variable structures in a short time. Overall, this study shows that adults can represent the syntactic structure of numbers, and they use the syntactic mechanism automatically, involuntarily and are able to represent a wide variety of variable structures without explicit instruction. The syntactic mechanism seems to be inherent in the processing of multi-digit verbal numbers, and is robust enough to represent long syntactic structures (6 digits) using a cross-triplet representation. The creation of this syntactic representation is automatic, and the findings cannot be explained as an effect of external strategies.

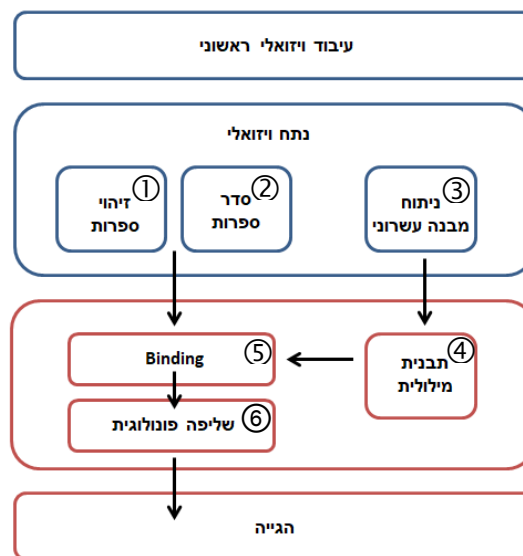
3. מבוא

איך אנחנו עושים אינטגרציה של מילות מספר בודדות למספר רב ספרתי? המחקר בתחום עיבוד מספרים בשנים האחרונות התקדם באופן משמעותי לעבר בנייה של מודלים קוגניטיביים של קריאת מספרים, כתיבת מספרים, חישוב, עיבוד כמותי ועוד; מבין אלה, עבודה זו תתמקד במנגנוני העיבוד של מספרים מילוליים (מילות מספר) בעת קריאת מספרים וכתיבתם. החקירה של קריאת מספרים וכתיבתם, על כל היבטיה, כולל הליקויים בתפקודים אלו, חשובה מכמה בחינות: ראשית, היא יכולה לעזור לנו להבין את האופן שבו מבוגרים מעבדים וממירים ספרות ומילות מספר. שנית, היא עשויה ללמד על התהליך שבו נרכשים מנגנונים אלו (Power & Dal Martello, 1990). שלישית, לחקירה זו ישנה חשיבות קלינית: מודל המפרט תהליכים ותת תפקודים קוגניטיביים יכול לשפר את היכולת שלנו לזהות ליקויים ספציפיים ולטפל בהם, כפי שנעשה לגבי קריאת מילים (Castles & Friedmann, 2017; Coltheart & Kohen, 2012; Coltheart, Rastle, Perry, & Langdon, 2001; Dotan & Friedmann, 2017; Friedmann & Coltheart, 2018).

3.1 מודל קריאת מספרים

ניתן להבחין בין שני תהליכים עיקריים בעת קריאת מספרים: תהליכי קלט שאחראים על ניתוח ויזואלי של רצף הספרות, לעומת תהליכי פלט שאחראים על הפקת המספר המילולי. הבחנה זו עולה מתוך מחקרים שניתחו ליקויים ספציפיים של נבדקים לאחר פגיעות מוחיות, כמו גם מתוך מחקרי הדמיה מוחית שהראו הפרדה אנטומית ותפקודית בין תהליכי קלט לתהליכי פלט (Dehaene & Cohen, 1995; Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003; McCloskey & Caramazza, 1987). דרך אחרת לחלק את תתי-תהליכים המעורבים בעיבוד מספרים היא לתהליכים תחביריים לעומת תהליכים לקסיקליים (Deloche & Seron, 1987; Cipolotti, 1995; Noel & Seron, 1993). תהליכים לקסיקליים מעבדים יחידות בודדות כמו מילים וספרות (לדוגמה - זיהוי ספרות, שליפה לקסיקלית של מילת מספר). תהליכים תחביריים מעבדים את הקשר בין כמה אלמנטים לקסיקליים (לדוגמה - זיהוי אורך המספר, עיבוד המבנה המילולי של המספר). נראה כי תהליכים אלה נפרדים ואינם תלויים האחד באחר, וקושי לקסיקלי ותחבירי יכולים להופיע באופן סלקטיבי. (Cohen & Dehaene, 1991; Dotan & Friedmann, 2017; Friedmann, Dotan, & Rahamim, 2010; Lochy, Domahs, Bratha, & Delazer, 2004; McCloskey & Caramazza, 1987). בעבודה זו אחקור את התהליכים התחביריים המעורבים בעיבוד מספר רב ספרתי מילולי.

עפ"י המודל של דותן ופרידמן (2018), אנו מתחילים לקרוא מספר בתהליכי קלט ניתוח ויזואלי של רצף ספרות (תרשים 1). שלב זה כולל שלושה תתי-תהליכים: זיהוי הספרות, קידוד סדר הספרות, וניתוח המבנה העשירוני של המספר (רכיבים ①②③ בתרשים 1). ניתוח המבנה העשירוני כולל בתוכו ניתוח של אורך המספר, חלוקה של המספר לשלוש וזיהוי המיקום של הספרה '0'. המידע מתהליכי הקלט האלה מועבר לעיבוד בתהליכי הפלט שאחראים על הפקה קולית של המספר. המידע לגבי המבנה העשירוני של המספר עובר לעיבוד ברכיב שאחראי על יצירת תבנית מילולית ④. התבנית המילולית היא ייצוג חסר של רצף המילים שמרכיבות את מילת המספר: היא כוללת מילים דצימליות ("אלף"), מילות פונקציה (ו' החיבור), ואת הקטגוריה הלקסיקלית של כל מילת מספר (יחידות, עשרות, וכו'), אך היא לא כוללת את הספרות עצמו (Cohen & Dehaene, 1991). למשל התבנית המילולית של המספר 32,715 תהיה: (עשרות) (ו) (אחדות) (אלף) (מאות) (ו) (עשרה). בשלב הבא מתבצע קישור (binding) ⑤, בין כל קטגוריה של מילת מספר (שנלקחת מהתבנית המילולית) לבין הספרה המתאימה. התוצאה היא ייצוג מלא של רצף המילים שמרכיבות את מילת המספר. לאחר מכן אנו שולפים את הצורה הפונולוגית של מילות המספר ⑥, והמידע הפונולוגי נשלח למערכת ההגייה.



תרשים 1. מודל קוגניטיבי לקריאת מספרים (Dotan & Friedman, 2018). רכיבים נפרדים מטפלים בתהליכי קלט ובתהליכי פלט. לאחר עיבוד ויזואלי כללי ראשוני נעשה ניתוח ויזואלי ספציפי של רצף ספרות, שכולל בתוכו כמה תתי-תהליכים: קידוד זיהוי ספרות וקידוד סדר הספרות מספקים יחדיו את המידע של רצף הספרות 1-9. תהליך שלישי, ניתוח המבנה העשירוני של המספר, מחלף את המידע בנוגע לאורך המספר, מיקום האפס במספר וחלוקת המספר לשלוש. המידע מניתוח המבנה העשירוני עובר לרכיב התבנית המילולית, שבונה את ייצוג המבנה המילולי של המספר בצורת רצף של קטגוריות (יחידות, עשרות, מאות וכו'). התבנית המילולית עוברת קישור עם רצף הספרות ומידע זה משמש לשליפת הצורה הפונולוגית של מילות המספר.

3.2 ייצוג היררכי של מבנה המספר

ברוב השפות, ניתן לייצג את כל המספרים הרב-ספרתיים על ידי שילוב של מילות מספר בודדות מתוך סט סגור וקטן באופן יחסי. מספרים רב-ספרתיים, מורכבים יותר או פחות, מציינים כמויות באופן מדוייק. כך למשל, ממילות המספר "ארבע", "מאות", "תשע", "עשרים" אפשר להרכיב את המספרים: 29, 924, 429, 920 וכו'. מילות המספר שמרכיבות את המספרים הרב-ספרתיים מתחלקות לשתי קבוצות עיקריות, ספרות (שתיים, שמונה וכו') ומוספיות מורפולוגיות (מאות, עשרה וכו'). כדי לשיים, לקרוא, לכתוב ולהבין מספרים רב-ספרתיים אנחנו צריכים למזג בין הספרות והמוספיות באופן כזה שייצור מבנה מורכב עם משמעות כמותית (Hunford, 1987; Hung et al., 2015).

על מנת לענות על השאלה – איך אנחנו מרכיבים מספר רב-ספרתי ממילות מספר בודדות, עבודת המחקר שלי תתמקד ברכיב **יצירת תבנית מילולית** שבמודל הני"ל – התהליך שמייצר למעשה את המבנה התחבירי של המספר. השערה מרכזית שתיבדק במחקר זה: כאשר דוברי שפה מייצרים או מבינים מספר רב ספרתי, הם מייצגים את המבנה התחבירי שלו. ייצוג מנטלי תחבירי של מספר מאופיין ע"י תכונותיו הספציפיות (אורך המספר, חלוקה לשלוש וכו').

יצירת התבנית המילולית טומנת בחובה מספר שלבים של יצירת מבנה, כפי שמוצג בתרשים מספר 2, שאחד מהם הוא בניית העץ התחבירי. מבנה דמוי-עץ שכזה מקביל לתיאוריות התחביריות המקובלות היום, שמניחות שכאשר דוברי שפה מייצרים או מבינים משפט, הם מייצגים אותו באמצעות עץ תחבירי שמתאר את מבנה המשפט (Chomsky, 1995; Pollock, 1998). מחקרים קודמים הראו שיצירת מילות מספר מורכבות מערבת מנגנונים מוחיים בתחום המספרי כמובן, ומערבת גם מנגנונים אזוריים שפתיים הקשורים ביצירת מבנים תחביריים בעיבוד משפטים. פעולות בניית מספרים רב-ספרתיים ממילות מספר בודדות דומות בבסיסן לפעולות בניית משפטים ממילים בודדות (Hung et al., 2015). על כן, ניתן לשער שהמנגנונים הקוגניטיביים העומדים בבסיס פעולות אלו, דומים גם הם (אפילו אם מדובר במנגנונים נפרדים).

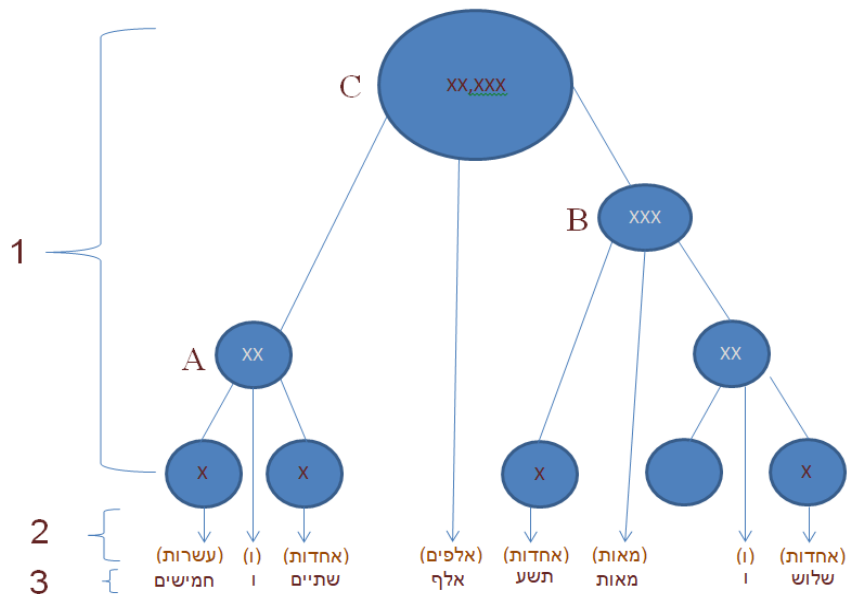
עפ"י השערת העץ התחבירי-מספרי, השלב הראשון ביצירת התבנית המילולית הוא בניית ייצוג מנטלי היררכי דמוי עץ של מבנה המספר המילולי. העץ התחבירי-מספרי מורכב מצמתים, כאשר כל צומת מייצג תת-מבנה בתוך המספר הרב ספרתי (תרשים 2). לדוגמה, המספר 52 מיוצג ע"י 3 צמתים: צומת יחידות, צומת עשרות, וצומת שמקשר ביניהם (A בתרשים 2; עפ"י טרמינולוגיה זו, גם האלמנטים בשורה התחתונה בתרשים 2 נקראת "צמתים"). השלב השני ביצירת תבנית מילולית הוא שלב הליניאריזציה. שלב זה בונה, על סמך העץ התחבירי-מספרי, את התבנית המילולית של המספר שהיא ייצוג ליניארי של המבנה המילולי של המספר. הליניאריזציה נעשית על ידי החלת אוסף כללים עפ"י השפה הספציפית. למשל, סדר המילים (ברוב השפות הוא לפי סדר הספרות, אבל בשפות כמו ערבית או גרמנית מילת היחידות מופיעה לפני מילת העשרות), ומיקומה של ו' החיבור,

שמשנתנה משפה לשפה. ליניאריזציה מושפעת גם מחוקים נוספים ספציפיים הקשורים למידע על המבנה העשורוני של המספר הרב ספרתי, למשל צומת ברמה השלישית תגרום להכנסת המילה "hundred" לתבנית המילולית, צומת ברמה הרביעית תגרום להכנסת המילה "thousand". מודל זה משער כי התלות בשפה קיימת רק בשלב הליניאריזציה, אבל מבנה העץ הוא אוניברסלי ואינו תלוי בשפה.

המבנה של העץ התחבירי-מספרי נקבע ע"י המבנה העשורוני של המספר (שהועבר למערכת המילולית ע"י הנתח הויזואלי)¹: אורך המספר קובע את המבנה הבסיסי של העץ, המסגרת של המספר. חלוקת המספר לשלוש קובעת את המבנה הפנימי של העץ, כלומר תתי המבנים התחביריים במספר (ואת מספר הצמתים הפנימיים בעץ). מיקום הספרה אפס קובע אילו צמתים יסומנו בעץ במעמד מיוחד – צמתים שלא יקבלו בסופו של דבר ביטוי מילולי בזמן הגיית המספר.

מספרים רב ספרתיים שבהם הספרה אפס מופיעה באמצע המספרים נחשבים מספרים "אי-רגולריים" כי הם מעלים אתגר מסויים בזמן עיבוד, קריאה וכתובה של המספר. במספרים אי-רגולריים האפס משמש כ"שומר מקום", למשל במספר 2506, האפס מתפקד כשומר מקום לעשרות שבמספר. כלומר במספרים אל לאפס תפקיד במבנה התחבירי של המספר והוא אינו בא לידי ביטוי בהפקה מילולית. מספרים אי-רגולריים נמצאו כמורכבים יותר להפקה כיוון שהם דורשים מהמשתתפים לעשות שינוי בהרכב של המבנה התחבירי של המספר כפי שהם מכירים אותו. מחקרים רבים הראו שמספרים אי-רגולריים היו קשים יותר לעיבוד והפקה בהשוואה למספרים רגילים. זה בא לידי ביטוי בחוסר שטף בזמן הפקה של המספר וזמני תגובה ארוכים יותר בילדים ובמבוגרים (Lochy et al., 2004; Lochy, Pillon, Zesiger, & Seron, 2002).

¹ פרט לחלוקת המספר לפי שלשות או רביעיות של הספרות. אופן החלוקה הזה משתנה משפה לשפה, והוא האלמנט השפתי היחיד שכן משפיע על מבנה העץ.



תרשים 2. השלבים ביצירת תבנית מילולית של המספר 52,903. (1), יצירת עץ תחבירי מספרי. הספרה '0' גורמת לצומת המתאים בעץ להיות מושבת (העיגול ללא סימון בתוכו). (2), ליניאריזציה: המבנה ההיררכי מומר למבנה ליניארי ע"י החלת חוקים ספציפיים לשפה. (3) ביינדינג: הקטגוריות הלקסיקליות (עשרות, מאות וכ"ו) נקשרות עם הספרות כדי לאפשר את השלב הבא - שליפה לקסיקלית מתוך המאגר הפונולוגי של מילות מספר.

3.3 המחקר הנוכחי

המחקר יתמקד בהבנת הייצוג התחבירי של המספרים באמצעות שימוש בתופעה ידועה בתחום של זיכרון, תופעת הצ'אנקינג, אצל משתתפים עם תפקוד קוגניטיבי תקין. המחקר ינסה גם למצוא אפיונים ספציפיים של אותו ייצוג מנטלי של המבנה התחבירי.

3.3.1 Chunking

Miller (1956) הציע שקיבולת הזיכרון לטווח קצר מוגבלת על ידי מה שהוא כינה "מספר הקסם 7" – הקיבולת היא 7 פריטים בודדים (פלוס מינוס שתיים) בממוצע. מחקרים מאוחרים יותר טענו כי מנגנוני הזיכרון מקודדים את המידע בקבוצות המורכבות ממספר פריטים דחוסים יחדיו בסדר מסוים, הנקראות "צ'אנקים" (Chunks). תהליך הצ'אנקינג מפשט את הזכירה בעזרת הקטנת כמות יחידות המידע שמאוחסנות (Miller, 1956). הצ'אנקים מטופלים ומעובדים כיחידות שלמות. תהליך הצ'אנקינג מאפשר להגדיל את מספר הפריטים הכולל הנשמרים בזיכרון לטווח קצר, על מנת לעבד יחידות גדולות יותר של אינפורמציה או פריטים הדחוסים לתוך כמה צ'אנקים. מודלים אלה לא מתארים את קיבולת זיכרון העבודה בתור מגבלה על מס' הפריטים הכולל בזיכרון, אלא בתור מגבלה על מס' הצ'אנקים ועל הגודל של כל צ'אנק. כיום, ההנחה המקובלת היא שקיבולת של זיכרון עבודה היא 4 צ'אנקים, שכוללים בתוכם עד 4 פריטים בודדים בכל צ'אנק (Chekaf, Cowan, & Mathy, 2016). תהליך הצ'אנקינג משמש גם כמנגנון למידה יעיל ובעל השפעה ניכרת ביכולת שלנו לרכוש מומחיות

במיומנויות שונות, יכולות זיכרון מיידי והתפתחות הזיכרון. אכן, לאנשים יש נטייה להפוך את המידע הנשמר אצלם לנגיש יותר על ידי קידוד המידע בזיכרון קצר טווח לקבוצות (צ'אנקים) (Chekaf, Cowan, & Mathy, 2016; Mathy & Feldman, 2012).

Chekaf, Cowan, and Mathy (2016) הצביעו על שני גורמים שמאפשרים היווצרות צ'אנקים בזיכרון מיידי. הגורם הראשון הינו דחיסות: יותר מידע יכול להיות מקודד בזיכרון מיידי על ידי ייצוג דחוס יותר של אותו המידע. כאשר מידע מסוים יכול להיות מיוצג בתור דפוסים מוכרים לאדם, זה מאפשר לדחוס אותו באופן יותר יעיל, וכך יותר מידע יכול להישמר בהשוואה למידע שלא ניתן לקודד לדפוסים מוכרים, כלומר מידע שלא ניתן לאחד לצ'אנקים. הגורם השני שמאפשר היווצרות צ'אנקים הוא סדר המידע המוצג. כאשר המידע מוצג בסדר שמקל על גילוי הדפוסים והסדירויות בגירוי, הדבר מאפשר יצירת צ'אנקים ביתר קלות ומגדיל את הסבירות שהתהליך הזה אכן יקרה. כתוצאה מכך, המידע יישמר באופן דחוס יותר, ויזכרו יותר פריטי מידע. לעומת זאת, סדר הצגה שאינו מסייע לגלות סדירויות ודפוסים עלול לגרום לכשל בדחיסה ומכאן לאסטרטגיה של זכירת פריטים בודדים, ללא צ'אנקינג. למשל, רשימת המילים "בית, ספר, גדול" מאפשרת דחיסות, יצירת מבנה אחד הכולל את כל המילים (המשפט "בית ספר גדול") והסדר המוצג מזמין את יצירת המבנה הזה בתור צ'אנק אחד. לעומת זאת, רשימת המילים "מגבת, קלמר, דלת" לא מעודדת צ'אנקינג. משום כך יהיה יותר קל לזכור את הרשימה הראשונה מאשר את השניה. כלומר, יש צורך באינטראקציה בין שני הגורמים הנ"ל, יכולת דחיסות וסדר המידע המוצג, על מנת לאפשר צ'אנקינג.

ניתן לתאר צ'אנקינג בתור תופעה מרכזית שמשפיעה על היכולת לזכור משפטים ורצפי מילים. משפטים הם לא סתם מחרוזת מילים המחוברות ליניארית – יש להם מבנה היררכי והם כוללים רכיבים שונים הנמצאים זה בתוך זה. עשרות שנים של ניתוח לשוני אישרו כי ייצוג מדוייק, הבנה והבעה של שפה מחייב שימוש בעץ התחבירי, על כל מרכיביו (Chomsky, 1957, 1992; Friedmann & Grodzinsky, 1997; Pollock, 1989). המבנה התחבירי של המשפט עשוי לסייע לדחוס את המידע ולזכור את המשפט. Pallier, Devauchelle and Dehaene (2011), הראו זאת בעזרת פרדיגמה מעניינת: בכל צעד בניסוי הם הציגו בפני המשתתפים רצף של 12 מילים כתובות, ותנאים שונים בניסוי איפשרו לחבר את 12 המילים למבנים תחביריים בגדלים שונים: למשל, בתנאי הראשון המילים הוצגו בצורה שאינה מאפשרת חיבור למבנה תחבירי (כמו בדוגמה "מגבת קלמר דלת"). בתנאי השני אפשר היה לחלק את 12 המילים ל-6 מבנים תחביריים עם שתי מילים בכל אחד (לדוגמה "ספר גדול מחברת קטנה חתול לבן וכו'). בתנאי נוסף, 12 המילים יצרו 4 מבנים תחביריים עם 3 מילים בכל אחד, וכן הלאה. תפקוד הנבדקים היה הטוב ביותר בתנאי שאיפשר את יצירת הצ'אנקים הגדולים ביותר – כלומר התנאי שאיפשר חיבור של כל 12 המילים למשפט אחד.

3.3.2 צ'אנקינג של מספרים

הפרדיגמה של Pallier et al. מראה שרמת הזכירה היתה טובה יותר בתנאי שמאפשר יצירת צ'אנקים תחביריים גדולים יותר, בזכות קיומו של מבנה תחבירי שלתוכו אפשר לשבץ את המילים (Syntactic Chunking). באופן דומה, במחקר הנוכחי נרצה להראות שתופעת הצ'אנקינג התחבירי קיימת גם במספרים מילוליים: שיערנו שבמטלת זכירה של רצף מילות מספר, רמת הזכירה תהיה טובה יותר בתנאי שמאפשר יצירת "צ'אנקים תחביריים" גדולים יותר של מספרים. לדוגמה, המשתתפים יזכרו טוב יותר את המילים "עשרים ושלוש", שמאפשרות יצירה של יחידת עיבוד – צ'אנק – אחד, מאשר את המילים "שלוש ועשרים", שלא מאפשרות צ'אנקינג תחבירי ולכן יעובדו בתור שתי יחידות נפרדות, למרות שבשני התנאים מדובר באותן מילים בדיוק. ממצא כזה יצביע על קיומו של מבנה תחבירי-מספרי שלתוכו אפשר לשבץ את מילות המספר. בהתאם למאפייני זיכרון העבודה ותופעת הצ'אנקינג כפי שאנו מכירים אותה מתחומים אחרים, אנחנו מניחים שקיים איזון אופטימלי בין מספר הצ'אנקים לבין גודל הצ'אנק, בו הזכירה תהיה טובה ביותר עבור המשתתפים. אותו איזון הוא המצב שמאפשר למשתתפים לעשות צ'אנקינג באופן מועיל בלי ליצור עומס על זיכרון העבודה – לא מבחינת מספר הצ'אנקים ולא מבחינת כמות פריטי המידע שיש בכל צ'אנק (Chekaf, Cowan, & Mathy, 2016).

3.3.1 מבנה המחקר ומטרותיו

מטרת המחקר המרכזית היא להראות שיש ייצוג מנטלי של המבנה התחבירי מספרי-מילולי של מספר רב-ספרתי. לשם כך אשתמש בתופעת הצ'אנקינג שתוארה לעיל. הרעיון הוא להראות שכאשר מתאפשר למשתתפים לקבץ את מילות המספר לצ'אנקים באמצעות יצירת מבנה תחבירי, הדבר משפר את רמת הזכירה. בנוסף, המחקר ינסה לזהות מאפיינים של אותו ייצוג מנטלי-תחבירי.

המחקר יכלול שלושה ניסויים. בכל הניסויים המשתתפים יתבקשו לחזור, בכל צעד, על רצף מילות מספר ששמעו. בכל ניסוי יהיו כמה תנאים, שנבדלים זה מזה בסדר ההצגה של המילים, שמשפיע על מידת הצ'אנקינג שהתנאי מאפשר. הניסויים נבדלים זה מזה בתנאים הספציפיים ובסוג הפריטים שיוצגו, כפי שיפורט להלן.

4. שיטה כללית

המחקר כלל 3 ניסויים עם משתתפים ללא לקויות למידה מדווחות. מערך הניסוי אושר ע"י ועדת האתיקה של אוניברסיטת ת"א.

4.1 משתתפים

בכל אחד משלושת הניסויים השתתפו 20 נבדקים מבוגרים עם לפחות 12 שנות לימוד, שלא אובחנו בעבר עם לקויות למידה או הפרעת קשב, ולא מדווחים על קשיים משמעותיים בעיבוד מספרים. המשתתפים גויסו באמצעות פירסומים ברשתות חברתיות וקיבלו תשלום על השתתפותם.

4.2 מבדק סינון – זיכרון לטווח קצר

המשתתפים בכל ניסוי ביצעו מטלת טווח זכירה לספרות - Digit span – מבדק מסוג היזכרות (Recall) (FriGvi , Gvion & Friedmann, 2008). הנסיינית הקריאה למשתתף רצף של ספרות בקצב של ספרה לשניה, ובסיום הרצף המשתתף התבקש לחזור אחריו. המבחן כולל שמונה רמות עם רצפים של 2-9 ספרות, חמישה רצפים בכל רמה. המבחן מתחיל מהרמה עם הרצפים הקצרים ביותר, ונעצר כאשר המשתתף לא מצליח לחזור במדוייק על לפחות שלושה רצפים ברמה מסויימת. Span (טווח הזכירה) מוגדר כרמה מקסימלית שבה המשתתף זכר במלואם לפחות שלושה רצפים מתוך החמישה. הצלחה בשני רצפים מתוך החמישה מזכה את המשתתף בחצי נקודה נוספת.

במחקר נכללו רק משתתפים עם Span של לפחות 6, כלומר לפחות סטיית תקן אחת מתחת לממוצע. (Gvion & Friedmann, 2008).

4.3 ניסויי צ'אנקינג תחבירי

המחקר כלל שלושה ניסויים, שבכולם מטלת חזרה על רצפים של מילות מספר.

4.3.1 פריטים

בכל ניסוי היו מספר תנאים, וכל תנאי הורכב מ-20 פריטים. פריט הינו רצף של מילות מספר. התנאים נבדלו זה מזה במאפיינים התחביריים של מילות המספר. נגדיר **רצף תחבירי** כרצף מילות מספר שמתכנס למספר רב ספרתי במבנה תחבירי תקין (לדוגמא, תשעת אלפים חמש מאות שבעים ושתיים). לעומת זאת, **רצף לא תחבירי**, הוא רצף מילות מספר שלא מתכנס למבנה תחבירי תקין (לדוגמא, שבעים ושתיים חמש מאות תשעת אלפים). צ'אנק הוא אוסף של מילות מספר שמאוגדות בזיכרון ליחידת זיכרון אחת. אם כן, המונח "רצף תחבירי" מתייחס לגירוי שהוצג, והמונח "צ'אנקינג" מתייחס לייצוג הקוגניטיבי והתהליך בזיכרון. הרעיון הבסיסי בכל הניסויים הוא שלמשתתפים תהיה נטיה לייצג רצף תחבירי בתור צ'אנק.

בכל הניסויים, הרצפים כללו את אותן 20 קבוצות מילים בכל התנאים, אבל בכל תנאי המילים ברצף היו מסודרות בסדר אחר. לדוגמא, אם בתנאי אחד הופיע הפריט "אלפיים תשע מאות שמונים" (רצף תחבירי), בתנאי אחר אותו פריט הופיע במבנה אחר – למשל, "תשע מאות שמונים, אלפיים" (רצף לא תחבירי, שלמעשה מורכב משני תתי-רצפים תחביריים). צפינו שרמת הזכירה של המשתתפים תהיה טובה יותר בתנאים עם רצפים תחביריים, בהשוואה לתנאים עם רצפים לא תחביריים. הפריטים והתנאים הספציפיים בכל ניסוי מפורטים בהמשך.

4.3.2 הליך

כל תנאי הועבר כבלוק נפרד. בכל פריט, המשתתף שמע רצף מילות מספר, אמר את המשפט "איזה יום יפה היום", ואז חזר על הרצף. אמירת המשפט אמורה "לאתחל" את זיכרון העבודה הפונולוגי כדי למנוע אסטרטגיה של חזרה פונולוגית, ובכך לעודד אסטרטגיה של ייצוג המספר השלם. כל פריט הושמע לנבדק פעם אחת. במצב של הפרעה חיצונית שגרמה לקטיעת הגירוי, הפריט הספציפי הושמע שוב לנבדק בסוף הבלוק.

כל תנאי בניסוי נפתח עם הוראות לנבדק ושני פריטי אימון מאותו תנאי. התנאים הועברו ברצף, ולאחר כל תנאי הייתה הפוגה של מספר דקות. כדי ליצור איזון בין התנאים ולנטרל השפעה של תנאי "קל" או "קשה" על הביצוע, התנאים הועברו בסדר שונה לכל נבדק, כך שכמות הנבדקים שהתחילו בתנאים השונים הייתה שווה.

בתחילת הניסוי הנבדק קיבל הסבר כללי מטרת הניסוי ומבנה הניסוי. כל המפגשים מוקלטים וארכו 45-60 דקות, בסופם הנבדק יכל לשאול שאלות ולקבל הסבר מפורט על הניסוי ומטרתו אם רצה בכך.

4.4 קידוד הנתונים

כדי להפיק ולעבד מילות מספר נכונה אנחנו צריכים שתי יחידות מידע, הספרה והקטגוריה של המספר. יש למקם את המספר תחת הקטגוריה הרלוונטית (מאות, עשרות, יחידות וכו'), ואז בתוך הקטגוריה הספציפית נמקם את המספר במיקום הרלוונטי (שני, שלישי, רביעי וכו'). לדוגמא, המספר עשרים, מורכב מקטגוריה של עשרות והספרה שתיים. ייצוג הקטגוריה והספרה מאפשרים לנו לשלוף ולעבד מספרים רב ספרתיים (McCloskey, Sokol, & Goodman, 1986). תגובות הנבדקים הוקלטו ונותחו לפי שלושה פרמטרים; מילים, ספרות וקטגוריות. לגבי כל פריט, רשמנו את אחוז מילות המטרה שהופקו נכון באותו פריט (בלי קשר לסדרן), את אחוז הספרות שהופקו נכון, ואת אחוז הקטגוריות שהופקו נכון. בהשוואה בין התנאים השונים השתמשנו בשלושת הפרמטרים האלו, כאשר ההשוואה העיקרית בין התנאים הייתה בין סך כל הטעויות במילים (כיוון שהן כוללות בתוכן ספרה וקטגוריה).

4.5 ניתוח הנתונים

ניתוח הנתונים בוצע בעזרת (Linear Mixed Model) LMM. המשתנה התלוי היה אחד מ-3 הפרמטרים הנ"ל (אחוז מילים/ספרות/קטגוריות נכונות בכל רצף), המשתתף היה גורם אקראי, וכך גם הפריט (כדי להתאים בין אותו פריט בתנאים שונים). התנאי היה גורם תוך-נבדקי. כדי לבדוק את רמת המובהקות של ההבדלים בין התנאים השתמשנו ב-Likelihood ratio test, והשווינו את הנראות של המודל המלא לנראות של מודל מקביל, שהיה זהה למודל הקודם פרט לכך שהושמט ממנו גורם התנאי.

5. ניסוי 1: Structural chunking חופשי

המטרה של מטלה זו היא להראות שתהליך הציאנקינג מתאפשר בעזרת ייצוג המבנה התחבירי של המספר, שמאפשר דחיסת מידע רב למבנים בודדים, כלומר מספרים רבים לתוך מספר רב-ספרתי אחד.

5.1 שיטה

המטלה כללה ארבעה תנאים (A, B, C, D), שהועברו בארבעה בלוקים נפרדים, ותנאי נוסף שיתואר בהמשך. בתנאי A המילים בכל פריט היו מסודרות כך שהן יוצרות מבנה תקין של מספר אחד ארוך – רצף תחבירי. בתנאי D הן היו מסודרות כך שנוצר רצף לא תחבירי שכולל הרבה מבנים קצרים מאד. למשל, אם הפריט הראשון בתנאי A הוא "ארבעים ושמונה אלף, שבע מאות עשרים וחמש" (מבנה של מספר אחד, כלומר רצף תחבירי אחד), הרי שבתנאי D אותו פריט יוצג בתור "אלף ושמונה, וחמש, עשרים, ארבעים, שבע מאות" (5 מבנים נפרדים; טבלה 1). תנאים B ו-C הם מצבי-ביניים: לדוגמה, הפריט הנ"ל יוצג בתנאי B בתור "אלף שבע מאות עשרים וחמש, ארבעים ושמונה" (שני רצפים תחביריים) ובתנאי C בתור "ארבעים, עשרים ושמונה, שבע מאות וחמש אלף" (שלושה רצפים תחביריים). הרעיון הוא שהסדר של מילות מספר בתנאי A מאפשר לייצג את הרצף כולו באמצעות מבנה תחבירי אחד של מספר אחד, ולכן מאפשר לבצע ציאנקינג של הפריט כולו ליחידה אחת, תנאי B מאפשר לייצג את הרצף כולו באמצעות שני מבנים תחביריים. לעומת זאת, סדר המילים בתנאים C ו-D מעודד ייצוג בהרבה מבנים נפרדים, ולכן כמעט לא יהיה ציאנקינג. כלומר, הרצפים בתנאים A ו-B ייזכרו בתור ציאנקים בודדים, ובתנאי C ו-D בתור ציאנקים רבים נפרדים, וכתוצאה מכך רמת הזכירה תהיה טובה יותר בתנאים הראשונים. רמת הזכירה בתנאי A < בהשוואה לתנאי C < בהשוואה לתנאי D.

48,725	Cond A
1000 / 725 / 48	Cond B
40 / 28 / 705 / 1000	Cond C
1000 / 8 / 5 / 20 / 40 / 700	Cond D
40 / 1000 / 700 / 5 / 20 / 8	Cond Mixed

טבלה 1. פריט בתנאי הניסוי השונים; תנאי A מציג רצף תחבירי אחד, תנאי B מציג שני רצפים תחביריים, תנאי C מציג שלושה רצפים תחביריים, תנאי D מציג ארבעה רצפים תחביריים, תנאי Mixed מציג את תנאי הניסוי באופן מעורבב לאורך 20 פריטים.

ההשוואה בין תנאי A לתנאי B יכולה לשפוך אור על מאפייני הציאנקינג התחבירי, האם המשתתפים היו מסוגלים לייצוג מספרים רב-ספרתיים עם רצפים של שש ספרות. מספר שש ספרתי, כמו בתנאי A, מורכב משתי שלשות שיש לאחד ביניהן כדי לקבל את המספר השלם. השלשה כוללת בתוכה חיבור של יחידות, עשרות ומאות וכדי להגיע לאלפים נדרש חיבור של שלשה נוספת (למשל: 345,789) - כל פריט בתנאי A הוא רצף תחבירי אחד ארוך שכולל בתוכו שש או שבע יחידות מידע, משמע דורש חיבור בין שלשות. לעומת זאת, בתנאי B, בכל פריט יש שני רצפים תחביריים שכוללים את אותו המידע אבל אין חיבור של שלשות. מחקרים על זיכרון מראים שרמת הזכירה האופטימלית מתקבלת בכפוף למגבלות על מספר הפריטים בזיכרון. ההנחה המקובלת היא שקיבולת של זיכרון עבודה היא 4 ציאנקים, שכוללים בתוכם עד 4 פריטים בודדים בכל ציאנק (Chekaf, Cowan, & Mathy, 2016). בהתאם לכך, שיערנו שהזכירה תהיה הטובה ביותר בתנאי B. בתנאי זה המשתתפים התבקשו לזכור שני רצפים תחביריים, כל אחד מהרצפים מכיל עד שלוש מילים, כלומר שלוש יחידות מידע, בהתאם למאפייני זיכרון העבודה. זאת בתנאי שאכן קיים ייצוג קוגניטיבי של מספרים רב ספרתיים שמאפשרים לחבר שתי שלשות מספרים למבנה תחבירי אחד: ייצוג כזה יעודד יצירת "מגה-ציאנקים" בתנאי A, יגרום לעומס על זיכרון עבודה בהתאם למאפייניו ויביא לזכירה פחות טובה של המשתתפים.

אם תימצא רמת זכירה גבוהה יותר בתנאים הראשונים, הסבר אלטרנטיבי לכך יכול להיות הסתמכות על סדר המילים: עבור כל אחד מהתנאים A-D, בכל הפריטים יש אותו סדר של קטגוריות של מילות מספר (בדוגמה הנ"ל, כל הפריטים בתנאי A יופיעו בסדר "עשרות ויחידות אלף, מאות עשרות ויחידות"). ההסבר האלטרנטיבי מייחס את ההבדלים ברמת הזכירה בין התנאים השונים לא למבנה המספר אלא לקיומו של סדר קטגוריות צפוי: סדר הקטגוריות "שקוף" יותר בתנאי A, כיוון שזהו הסדר שאנחנו מכירים, פחות שקוף בתנאי B, ועוד פחות בתנאי C או D. על מנת לבדוק את האפשרות הזאת, המטלה תכלול תנאי נוסף, תנאי Mixed. גם בתנאי זה הרצפים כוללים את אותן מילים כמו בתנאים האחרים, אבל כאן הקטגוריות לא מופיעות בסדר קבוע בכל הפריטים, אלא בסדר שונה בכל פריט. למשל, ייתכן שרצף אחד בתנאי Mixed יהיה "מאתיים – אלף – שלושים – חמש – עשרים" (מאות-אלף-עשרות-אחדות-עשרות) ורצף אחר יהיה "שבע – שמונה מאות – תשעים – אלף – חמישים" (אחדות-מאות-עשרות-אלף-עשרות). נערוך השוואה בתוך תנאי Mixed, בין פריטים עם שניים, שלושה וארבעה רצפים תחביריים. בהשוואה זו נצפה לראות שרמת הזכירה תהיה טובה יותר בפריטים עם מעט רצפים תחביריים והתוצאות יהיו מקבילות לתנאי הניסוי; רמות זכירה עם שני רצפים תחביריים < רמות זכירה עם שלושה רצפים תחביריים < רמות זכירה עם ארבעה רצפים תחביריים.

כמו כן, ערכנו השוואה נוספת בין תנאי Mixed לתנאי D. תנאי Mixed לא מאפשר הישענות על סדר קטגוריות קבוע כיוון שיש בו פריטים שונים אבל מייצר יותר הזדמנויות לבצע ציאנקים כיוון שיש בו יותר תתי-רצפים תחביריים בכל פריט. תנאי D מאפשר הישענות על סדר קטגוריות קבוע כיוון שיש בו פריטים עם סדר

קטגוריות זהה. לפיכך, השוואת רמת הזכירה בין תנאי D לתנאי Mixed תאפשר להכריע בין שתי ההשערות התיאורטיות – אם הגורם הקריטי שמשפיע על רמת הזכירה הוא תהליך הציאנקינג ומנגנון תחבירי, הביצוע בתנאי Mixed אמור להיות טוב יותר מתנאי D. אם הגורם הקריטי הוא הסתמכות על סדר המילים, הביצוע בתנאי D אמור להיות טוב יותר מתנאי Mixed.

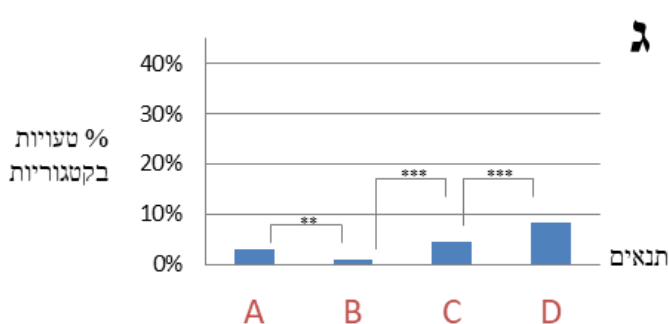
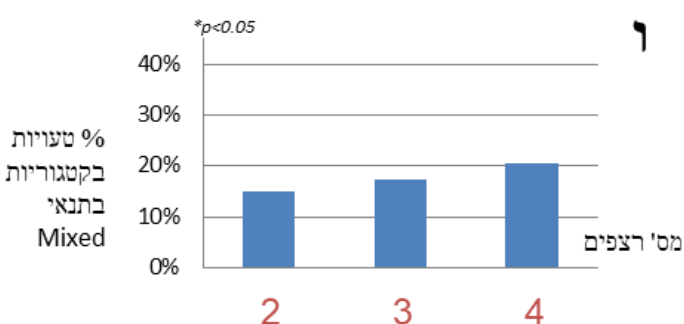
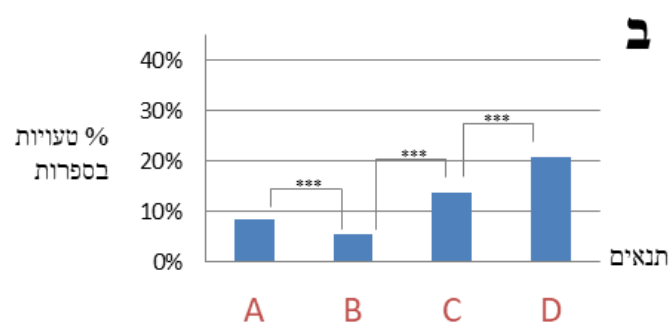
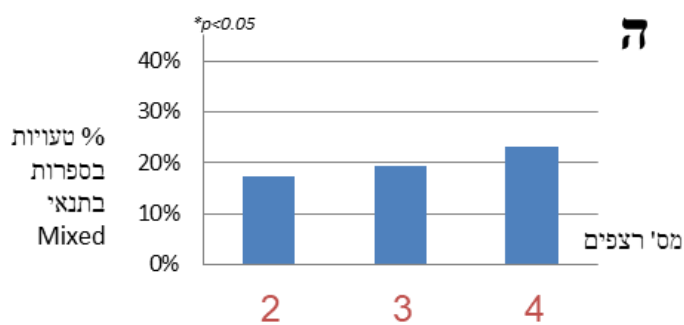
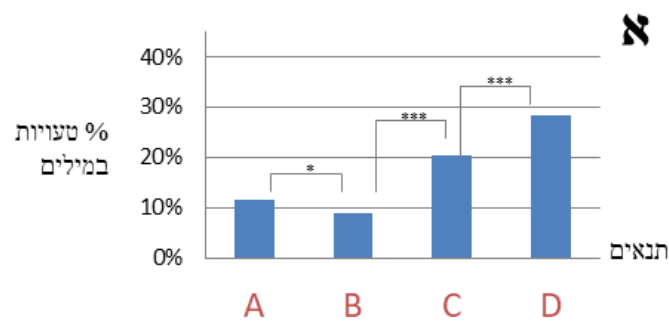
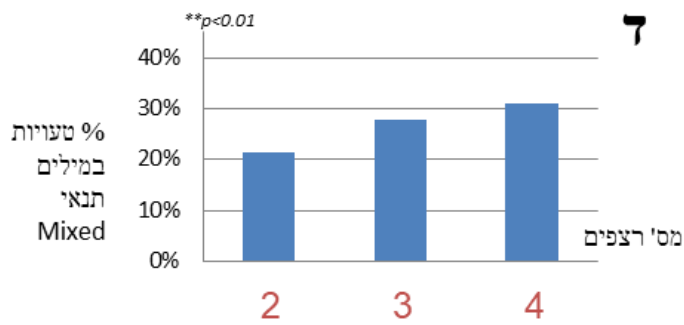
מן הסתם, הביצוע במטלה זו מושפע מאד מטווח הזכירה האישי של כל משתתף. על מנת לאפשר רמת תפקוד סבירה של כל המשתתפים, גם כאלה בעלי טווחי זכירה שונים, היו שתי גירסאות של המטלה, שהיו שונות זו מזו באורך של רצפי מילות המספר (שש או שבע מילים בכל פריט). כל משתתף ביצע רק את אחת הגירסאות של המטלה, בהתאם לביצוע שלו במבדק הסינון: המטלה עם רצפים באורך N בוצעה ע"י משתתפים בעלי span באורך דומה או גדול בחצי (לדוגמא: משתתף שנמצא עם span של 7 יבצע את גירסת המטלה שכוללת 7 מילות מספר בכל פריט). הגירויים הושמעו לנבדק ממחשב. כדי למנוע מהמשתתף להסתמך על אינטונציה, כל מילת מספר הוקלטה בנפרד, ואותן הקלטות שימשו לכל התנאים, עם מרווח זמן קבוע בין מילה למילה (200ms).

5.2 תוצאות

לארבעה משתתפים הועברה גירסת הניסוי הארוכה, 7 מילות מספר, וליתר המשתתפים הועברה גירסת הניסוי הקצרה, 6 מילות מספר – בהתאם לקיבולת הזיכרון שלהם (Span). רמת הזכירה הטובה ביותר היתה בתנאי B, נמוכה יותר בתנאי, ונמוכה עוד יותר בתנאי D – אפקט ברור של ציאנקינג תחבירי (תרשים 3 א'). משמע, גם כאשר לא ניתנת הוראה מפורשת שקשורה למבנה התחבירי של המספר, הנבדקים השתמשו בייצוג מנטלי של מבנה המספר לביצוע מטלת החזרה. בהתאם לכך, ציפינו שגם רמות הזכירה של הספרות והקטגוריות יהיו טובות יותר ברצפים תחביריים לעומת רצפים לא תחביריים. כפי שאפשר לראות בתרשים 3 ב'-ג', בספרות - רמת הזכירה הייתה טובה ביותר בתנאי B מאשר בתנאי C, וגבוהה יותר בתנאי C מאשר בתנאי D. בקטגוריות - רמת הזכירה הייתה טובה ביותר בתנאי B מאשר בתנאי C, וגבוהה יותר בתנאי C מאשר בתנאי D. הביצוע הדומה של המשתתפים בכל אותם שלושה מדדים, כולל מדד הספרות, מדגישים את היכולת "להלביש" לתוך המבנה התחבירי אינפורמציה של זהות ספרה. כלומר, המשתתפים לא ייצגו רק את המבנה התחבירי, אלא שילבו בתוכו את מילות המספר.

בהשוואה בין תנאי Mixed לתנאי D, בדקנו את ההשפעה שיש למבנה התחבירי על רמת הזכירה לעומת ההשפעה שיש לסדר קטגוריות ומוכר על רמת הזכירה. אם המבנה התחבירי יותר משפיע, רמת הזכירה תהיה טובה יותר בתנאי Mixed. לעומת זאת, אם סדר הקטגוריות יותר משפיע נצפה שרמת הזכירה תהיה טובה יותר בתנאי D. רמות הזכירה בשני התנאים היו ללא הבדל. ממצא זה יכול ללמד אותנו על תפקידן של שתי הפונקציות

האלו על זיכרון העבודה. לשתי היכולות השפעה בתנאים המציגים מספר רצפים לא תחביריים, ושתיהן יכולות לשמש כאסטרטגיות זכירה במצב של עומס על זיכרון העבודה. בהשוואה בין פריטים בתוך תנאי Mixed, בפריטים עם שני רצפים תחביריים רמת הזכירה הייתה טובה יותר, לעומת פריטים עם שלושה רצפים תחביריים, ובשלושה רמת הזכירה הייתה טובה יותר לעומת פריטים עם ארבעה רצפים תחביריים (תרשים 3 ד'ו'). כלומר, בדומה להשוואה בין התנאים, ייצוג של מבנים תחביריים הביא לרמת זכירה טובה יותר. בשונה מן ההשוואה בין התנאים, בתוך תנאי Mixed ניתן להגיד שהמשתתפים היו צריכים להיות יותר גמישים ומהירים בזיהוי המבנים מתוך פריטים שונים ומגוונים שהוצגו להם.



קטגוריות (ג)	ספרות (ב)	מילים (א)	
$\chi^2 = 9.61, p = .002$ odds ratio = 0.98	$\chi^2 = 11.16, p < .001$ odds ratio = 0.97	$\chi^2 = 5.39, p = .02$ odds ratio = 0.97	A – B
$\chi^2 = 27.73, p = 1e-6$ odds ratio = 1.04	$\chi^2 = 84.02, p = 1e-19$ odds ratio = 1.09	$\chi^2 = 80.98, p = 1e-18$ odds ratio = 1.12	B – C
$\chi^2 = 19.16, p = 1e-4$ odds ratio = 1.04	$\chi^2 = 39.15, p = 1e-9$ odds ratio = 1.07	$\chi^2 = 29.56, p = 1e-7$ odds ratio = 1.08	C – D

תרשים 3. (א-ג) השוואה בין אחוזי הטעויות במילים, ספרות וקטגוריות בתנאים A-D. (ד-ו) השוואה בין הטעויות בפריטים השונים בתנאי Mixed, לפי מספר הרצפים התחביריים בכל פריט (2,3,4). הנתונים הסטטיסטיים בטבלה מתייחסים לגורם התנאי ב-LMM שמתואר בטקסט.

המשתתפים מייצגים את המבנה התחבירי של המספר, לכן ציפינו שרמת הזכירה האופטימלית תהיה בתנאי עם אורך רצף תחבירי מסוים, זה שיוצר איזון אופטימלי בין גודל הציאנק לבין מספר הציאנקים (Chekaf, 2016, & Mathy). תנאים עם רצפים תחביריים קצרים יותר לא מאפשרים מספיק ציאנקינג, לכן רמת הזכירה בהם תהיה נמוכה יותר בגלל עומס זיכרון כתוצאה ממספר ציאנקים גדול. תנאים עם רצפים תחביריים ארוכים יותר עלולים לעודד יצירת ציאנקים גדולים מדי, ורמת הזכירה בהם תהיה נמוכה יותר בגלל עומס הזיכרון שנוצר בגלל ציאנקים גדולים מדי. כפי שאפשר לראות בתרשים 1 א-ג', זה בדיוק היה המצב: רמת הזכירה הטובה ביותר הייתה בתנאי B, ורמת הזכירה בתנאי A (בו הרצפים התחביריים ארוכים יותר) כבר היתה פחות טובה. כלומר, המשתתפים ייצגו את הרצפים בתנאי A כציאנק אחד המורכב משתי שלשות, ובתנאי B הם ייצגו את המידע בשני רצפים תחביריים נפרדים, כל אחד מורכב משלשה. בתנאי A הייתה דחיסת מידע רב לתוך ציאנק אחד גדול מאוד שיוצר עומס על הזיכרון, ומכאן הירידה בביצוע.

הביצוע הנמוך יותר בתנאי A מתנאי B גם מראה שהנבדקים עשו ציאנקינג בצורה אוטומטית, אפילו כאשר זה לא השתלם ברמת הביצוע. על אף שהנבדקים יכלו להשתמש בחלוקה של הרצף התחבירי לשני ציאנקים, כאשר הוצגה בפניהם האפשרות הם ייצגו את רצף המילים בעזרת המבנה התחבירי הגדול ביותר שניתן היה לייצג – אפילו אם השימוש במבנה כה גדול הזיק לרמת הביצוע. ממצאים אלו מעידים שהייצוג נוצר באופן אוטומטי. בנוסף, הם מעידים על מאפייני הייצוג התחבירי של המספר. כשאנחנו עוסקים במספר המורכב משתי שלשות המשתתפים אכן ייצגו אותו כמספר אחד, כלומר הייצוג הוא חוצה שלשה וכך מתאפשר זכירה ועיבוד של מספרים ארוכים.

5.3 דיון

ניסוי 1 הראה אפקט ברור של ציאנקינג תחבירי: רמת הזכירה הגבוהה ביותר היתה בתנאי B; בתנאים עם רצפים תחביריים קצרים יותר (C, D) רמת הזכירה הלכה וירדה; וגם בתנאי עם רצפים תחביריים ארוכים יותר (A) רמת הזכירה היתה נמוכה יותר מתנאי B.

החבר שלנו לממצאים אלה הוא ציאנקינג מבוסס תחבירי: הנבדקים היו מסוגלים לאגד מילות מספר (9000 / 40 / 2) למספר רב ספרתי אחד (9042). הם עשו זאת באופן טבעי וללא רמיזה מפורשת. הפריטים בתנאי Mixed מקבילים לתנאי הניסוי – פריטים עם שני רצפים – תנאי B, פריטים עם שלושה רצפים – תנאי C, ופריטים עם 4 רצפים – תנאי D. כזכור, תנאי Mixed, לא איפשר הישענות על מבנה קבוע שחוזר על עצמו לאורך התנאי, ועדיין רמות הזכירה היו דומות לממצאים בתנאים A-D. המשתתפים היו צריכים להיות רגישים למבנה המספר כדי

להצליח בפריטים עם רצפים תחביריים לעומת פריטים ללא רצפים תחביריים ולדלות את המבנה מתוך הגירוי. גם ללא הוראה מפורשת וסדירות בגירוי המשתתפים הצליחו לחלץ את המבנה התחבירי מתוך הפריט ולהשתמש בו בעיבוד הגירוי. נראה כי השלם גדול מסכום חלקיו, המספר הרב ספרתי מורכב ממילות המספר אבל גם מהקשרים התחביריים ביניהן.

גם במחקר שנעשה בילדים בגילאי טרום-בית ספר נראו מסקנות דומות. בזמן הצגת גירויים של רצפים תחביריים ורצפים לא תחביריים, לילדים היה קל יותר לזכור רצפים תחביריים. הילדים עדין לא רכשו את היכולת לספור אפילו עד המספרים שכללו הגירויים (לדוגמה, שלוש מאות חמישים), אך כבר היו מסוגלים כיצד לייצג אותם במבנים תחביריים (Barrouillet, Thevenot, & Fayol, 2010). עם זאת, במחקר הנ"ל היו רק 2 תנאים, לכן ניתן היה להסביר את הממצאים בכמה דרכים שונות (לדוגמה, בתור השפעה של ייצוג תחבירי "מקומי" בקשר בין זוג מילים). לעומת זאת, במחקר הנוכחי היו 4 תנאים, עם עקומת ביצוע בצורת U – דפוס שמראה באופן ברור יותר שקיים ייצוג תחבירי של מבנה המספר כולו, שהייצוג חוצה-שלשה, ונוצר באופן אוטומטי.

אפקט הצ'אנקינג התחבירי נמצא גם במחקרים קודמים שנעשו בהקשר של רצפים תחביריים של משפטים (Pallier, Devauchelle, & dehaene, 2011). בפרדיגמה דומה, הציגו לנבדקים גירוי שכלל מספר מילים במספר תנאי. כל תנאי נבדל מקודמו באפשרות לחבר את המילים לכדי מבנה תחבירי (משפט / צירופי מילים / מילים בודדות). נראה שגם פה רמות הזכירה הטובות היו בתנאים שאיפשרו לנבדקים לבצע צ'אנקינג. הנבדקים זכרו רצפים תחביריים (משפטים) טוב יותר בהשוואה לרצפים לא תחביריים (מילים בודדות), כיוון שהצליחו לעשות צ'אנקינג לרצפים תחביריים שפתיים ומספריים בעזרת ידע קודם של מבנים תחביריים. בבסיס היכולת לייצג מבנים ורצפים תחביריים ישנם אזורים מוחיים ללימוד רצף, זיהוי סדירויות וייצוג מנטלי של מבנים שונים. בעבודת התזה של מנדלסון-ברש (2020), גם בתהליך כתיבת מספרים רב ספרתיים נראה ייצוג של המבנה התחבירי של המספר. בזמן הכתבה של רצפים תחביריים ותזמון כתיבה הספרות הסמוכות, נמצאו דפוסי זמנים קבועים והיררכיים, שמראים שהנבדקים כתבו את המספר תוך שימוש בייצוג של קוגניטיבי היררכי של מבנה המספר. לעומת זאת, בזמן הכתבה של רצפים לא תחביריים ותזמון כתיבת הספרות, לא נמצאו דפוסי זמנים היררכיים.

הפרדיגמה שהצענו במחקר מציעה באופן ייחודי בחינה של מאפייני הייצוג התחבירי-מספרי, האם המשתתפים היו מסוגלים לייצג מספרים רב ספרתיים ארוכים (חמישים ושתיים אלף, שלוש מאות עשרים ושבע)? כאשר אנחנו מייצגים מבנים תחביריים שפתיים של שלושה פריטים ומעלה, העיבוד התחבירי נעשה מורכב יותר ודורש יצירת מבנה תחבירי אחד גדול יותר. בכל פעם שאנחנו מוסיפים "צומת" לעיבוד התחבירי, אנחנו מעלים את מורכבות עיבוד המשפט (Pallier et al., 2011). השערתנו היתה שלנבדקים יש יכולת לבנות ייצוג "חוצה

שלשה". הצגת רצף תחבירי המורכב משתי שלשות מחייב את הנבדק לייצר צ'אנק אחד מורכב. בהתאם להשערה, כאשר הוצגו לנבדקים רצף תחבירי עם מבנה רב ספרתי אחד שמאגד בתוכו חיבור שלשות, רמת הביצוע של הנבדקים ירדה, כיוון שייצוג של צ'אנק אחד המורכב מפריטים רבים מעמיס על זיכרון העבודה בהשוואה לשני צ'אנקים המורכבים מאותם פריטים. לפיכך נראה כי ייצוג המבנה הוא אוטומטי, המשתתפים השתמשו בו על אף שהוא פגע ברמות הזכירה (בתנאי A בהשוואה לתנאי B).

מקלוסקי ושות' דיברו על מודל תחבירי-סמנטי שמאפשר את השילוב של אלמנטים תחביריים (מבנה המספר) עם אלמנטים לקסיקליים (ספרות) ומאפשר ייצוג של המספר השלם. בניסוי זה הראינו השפעה ייחודית שיש למבנה המספר ולייצוג שלו על הזיכרון. כל מילת מספר מורכבת מספרה וקטגוריה (McCloskey, 1992;) (McCloskey, Sokol, & Goodman, 1986), למשל מילת המספר חמישים – מורכבת מהספרה 5 ומקטגוריה של עשרות. ייצוג של מבנה המספר מאפשר ליצור את התבנית המילולית כולה של המספר – רצף הקטגוריות שמרכיבות אותו. בנוסף, אפקט הצ'אנקינג התחבירי בספרות (תרשים 3 ב') מראה כי הנבדקים "מלבישים" לתוך התבנית המילולית את האינפורמציה הנוספת (הספרות) שבסופו של דבר מוביל לייצוג של המספר הרב-ספרתי.

6. ניסוי 2: Structural chunking עם רמיזה

ניסוי 1 הראה תהליך צ'אנקינג שנשען על ייצוג מנטלי תחבירי, ואינו מוסבר ע"י אסטרטגיות זכירה וידע קודם של היכרות והופעת סדר הקטגוריות.

את הממצאים של ניסוי 1 אפשר לפרש בשתי דרכים. ההסבר שלנו הוא שההבדל בין תנאים B, C, D נובע מייצוג של מבנה המספר: רצף המילים בתנאי B איפשר ליצור מבנים תחביריים גדולים יותר מאשר בתנאי C, ומשום כך היה יותר צ'אנקינג (ורמת זכירה טובה יותר) בתנאי B. הסבר אלטרנטיבי הוא שרמת הזכירה הטובה יותר בתנאי B לא נובעת מיכולת גבוהה יותר לבצע צ'אנקינג בתנאי הזה, אלא מכך שבתנאי זה היה יותר ברור למשתתף איך לחלק לצ'אנקים – לדוגמה, כי הוא משתמש באסטרטגיה של "סגירת צ'אנק" אחרי שהופיעה מילת יחידות. נשים לב שגם ההסבר האלטרנטיבי מניח קיומו של ידע תחבירי על המספר (הידיעה שכדאי לסגור צ'אנק אחרי מילת יחידות), אבל זהו ידע פשוט יותר מאשר ייצוג מנטלי של מבנה המספר כולו. את שתי האלטרנטיבות אפשר לתאר כפי שאפיין Chekaff (2016) את תהליך הצאנקינג. **דחיסת מידע**, צ'אנקינג של יחידות מידע לכדי מבנה אחד, לעומת **סדר המידע** המוצג המרמז על גילוי דפוסים וסדירויות בגירוי (למשל לאחר מאות יגיעו עשרות ולאחר עשרות יגיעו אחדות).

ניסוי 2 נועד להכריע בין 2 הפרשנויות הללו. הדרך לעשות זאת היתה לרמוז למשתתף איך לבצע צ'אנקינג. בניסוי 1 לא ניתן למשתתף שום רמז איך לבצע צ'אנקינג: בכל התנאים, רצף המילים המוצג באותו אופן, באינטונציה קבועה ועם מרווחים קבועים בין המילים. כאן, בכל התנאים השתמשנו באינטונציה כדי לרמוז למשתתף לחלק את רשימת המילים ל-2 צ'אנקים.

אם אפקט הצ'אנקינג התחבירי בניסוי 1 נבע מיכולת הדחיסה וייצוג מבנה, נצפה שגם כאן רמת הזכירה תהיה טובה יותר בתנאי שמציע אפשרות לביצוע צ'אנקינג. לעומת זאת, אם אפקט הצ'אנקינג התחבירי בניסוי 1 נבע מסדר הצגת המידע (הצגה של סדר קטגוריות מוכר בשפה, למשל מאות, אחדות ואז עשרות), שנתן רמיזה לגבי אופן הצ'אנקינג הרצוי, נצפה שכאן לא יהיו הבדלים בזכירה בין התנאים.

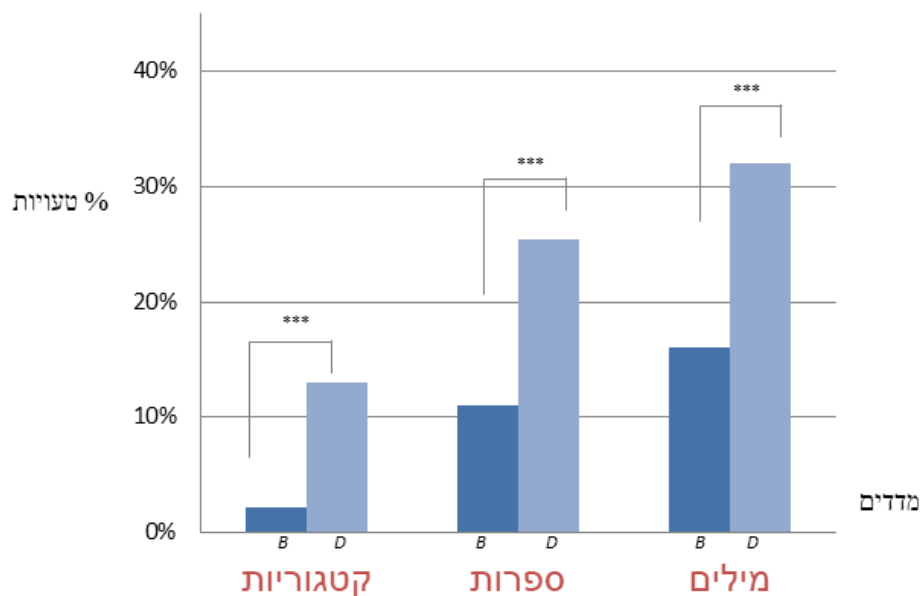
6.1 שיטה

ניסוי 2 כולל שני תנאים, המקבילים לתנאים B ו-D מניסוי 1. רצפי המילים בתנאי B היו זהים לאלה שבניסוי 1 (למשל "אלף חמש מאות עשרים ושבע // תשע מאות שלושים וארבע"). בתנאי D, סדר המילים היה הפוך בתוך כל צ'אנק ("שבע עשרים חמש מאות ואלף // ארבע שלושים ותשע מאות"). כדי לרמוז למשתתף לגבי חלוקה ל-2 צ'אנקים, השתמשנו בכל שלוש האמצעים הבאים:

- המילים לא הושמעו מהקלטה, אלא הנסיינית אמרה כל פריט בזמן אמיתי, והמילים בתוך כל צ'אנק נאמרו ברצף (בלי הפסקות ביניהן).
- היה רווח של שניה בין צ'אנק לצ'אנק.
- המילה האחרונה בכל צ'אנק נאמרה באינטונציה יורדת, שרומזת לסיומו. באינטונציה יש מידע רב על הרצף: אורך הגירוי - מתי מתחיל ומתי מסתיים הרצף הספציפי, רצף ומיקום - מי מגיע קודם ואחר כך בגירוי. האינפורמציה הזו עשויה לעזור למשתתפים לקבץ את המילים לצ'אנקים ובכך להביא לזכירה טובה יותר וניצול יעיל יותר של זיכרון העבודה.

6.2 תוצאות ודיון

אם המשתתפים מייצגים את המבנה התחבירי של המספר באופן אוטומטי ואינם משתמשים בו כאסטרטגיית זכירה, נצפה לרמת זכירה טובה יותר בתנאים עם רצפים תחביריים ארוכים יותר. כפי שניתן לראות בתרשים 4, רמת הזכירה אכן הייתה טובה יותר בתנאי B מאשר בתנאי D. כלומר, קיומו של מבנה שיפר את רמת הזכירה גם כאשר בשני התנאים המשתתפים קיבלו רמזים חיצוניים לחלוקה לצ'אנקים. מכאן שאפקט הצ'אנקינג התחבירי לא נובע רק מאופן אופן סידור הקטגוריות שרמזו לאפשרות לעשות צ'אנקינג, אלא מייצוג קוגניטיבי של מבנה המספר והיכולת לדחוס את המידע לתוכו.



תרשים 4. השוואה בין שני התנאים בניסוי 2 לפי אחוזי הטעויות במילים, ספרות וקטגוריות.

רמות הביצוע השונות של הנבדקים מכריעות את השאלה האם המשתתפים השתמשו באסטרטגיות זכירה של סדר הקטגוריות, ידע על סגירת ציאנק, שכיחות הופעת הקטגוריות, או בייצוג מבנה תחבירי. לעומת המצב הניטרלי בו בוצע ניסוי מספר 1, כאן סיפקנו למשתתף רמזים כיצד לעשות ציאנקינג, ועדיין למבנה התחבירי של המספר היתה השפעה משמעותית ביותר, עם זכירה טובה יותר של מספרים במבנה תחבירי. ממצאים אלו מאפשרים לנו לראות עד כמה אינטואיטיבי למשתתפים היה לייצג מבנה תחבירי של מספרים.

ראינו את ההשפעה שיש למבנה התחבירי, אבל חשוב לציין שישנה השפעה על הביצוע גם לרמיזה עם אינטונציה. כאשר הוצגו למשתתפים רצפים נייטרלים (ניסוי 1) או רצפים עם אינטונציה (ניסוי 2), הזכירה הייתה טובה יותר ברצפים עם אינטונציה.

7. ניסוי 3: Structural chunking רנדומלי

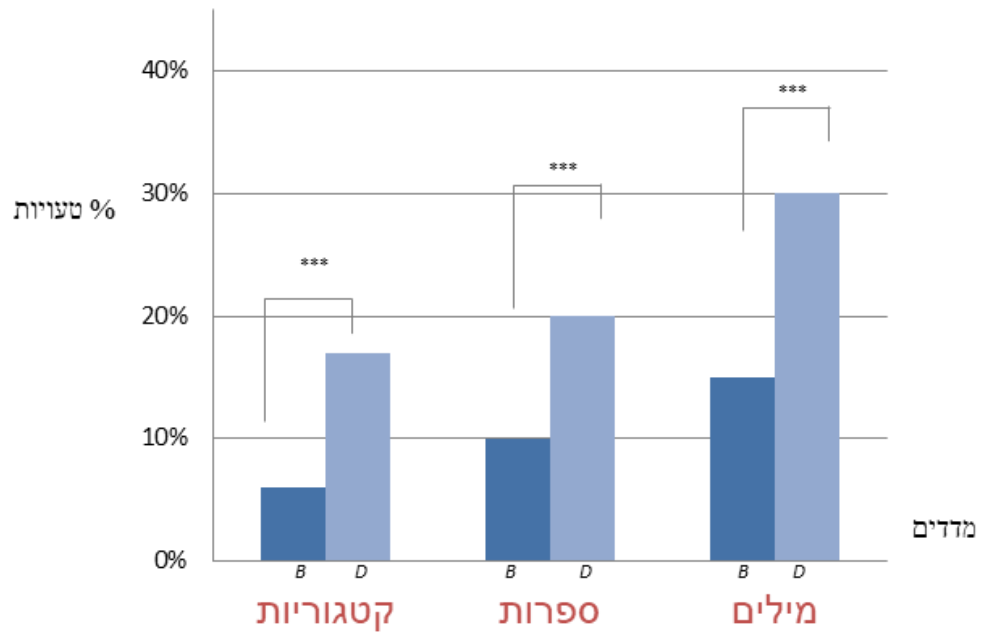
ראינו שייצוג מבנה המספר מאפשר זכירה טובה יותר. כעת, נשאלות שתי שאלות: (1) בניסויים הקודמים הוצגו רק מספרים רגולריים (ללא ספרות 0,1). האם הייצוג המנטלי תחבירי מסוגל להתמודד עם סוגים שונים של מבנים תחביריים, כולל מבנים אי-רגולריים? (2) האם המנגנון יעיל וגמיש מספיק כדי לייצג מבנים שמשתנים בתכיפות, גם מבחינת כמות המילים וגם מבחינת סוג המבנה בכל פריט?

תשובה חלקית לשאלה (2) התקבלה כבר במסגרת הניסוי הראשון, בתנאי Mixed. תנאי זה לא איפשר הישענות על מבנה קבוע, כיוון שהופיעו בו במעורבב כל המבנים מהתנאים הקודמים, ועדיין נמצא אפקט צ'אנקינג תחבירי. עם זאת, כל הגירויים שנכללו בתנאי Mixed היו במבנה רגולרי (מבנה קלאסי של שלשות - מאות, עשרות, אחדות), מספר המבנים השונים היה מצומצם יחסית, והם גם הופיעו בתנאים הקודמים, כלומר הייתה להם הטרמה. גם בניסוי בדקנו כיצד ייצוג המבנה מועיל לזכירה עם רצפים תחביריים משתנים מידי פריט, אבל הרחבנו את הבדיקה לכלול גם מבנים תחביריים נוספים. כלומר, בניסוי הנוכחי רצינו לראות האם קיימת הכללה לכל המבנים התחביריים של מספרים וספציפית - האם גם במספרים אי-רגולריים הנבדקים יוכלו להיעזר במבנה התחבירי ולזכור טוב יותר את הרצפים התחביריים. בנוסף, הניסוי הנוכחי נועד לשלול שוב הסברים אלטרנטיביים, למשל שרמת הזכירה הטובה נבעה מהיכרות עם סדר קטגוריות צפוי של המספר.

7.1 שיטה

בניסוי היו 20 פריטים בכל תנאי, בשני תנאים (D, B) שנבדלו זה מזה בסדר המילים. ההליך היה כמו בניסוי 1. תנאי B היה התנאי שמאפשר יותר צ'אנקינג. בתנאי זה, כל פריט כלל שני רצפים תחביריים. המבנה של כל רצף תחבירי היה של מספר בן 4 ספרות (10 פריטים) או 5 ספרות (10 פריטים) ומספר המילים בכל פריט היה 4/5/6 מילים. הרצפים התחביריים בתנאי זה היו במבנים אי רגולריים, כלומר המספרים כללו אפסים באמצע המספר והיו בסדר קטגוריות משתנה, למשל אלפים ואז אחדות – 4005. בתנאי D, הופיעו אותן מילים אך בסדר שונה כך שהרצפים לא היו תחביריים.

אם קיים ייצוג מנטלי תחבירי למבנים אי רגולריים והייצוג התחבירי אינו מושפע מהצגת מבנים קבועים, נצפה לרמת זכירה טובה יותר בתנאי B בהשוואה לתנאי D.



תרשים 5. השוואה בין שני התנאים בניסוי 3 לפי אחוזי הטעויות במילים, ספרות וקטגוריות.

7.2 תוצאות ודיון

רמת הזכירה של המשתתפים, תרשים 5, הייתה טובה ביותר בתנאי עם רצפים תחביריים ארוכים יותר (B), מאשר בתנאי עם רצפים תחביריים קצרים (D). זאת על אף שלא היו סדירויות והטרמה למבנים, כמות המילים שהושמעו למשתתפים בכל פריט הייתה שונה וסדר הופעת הקטגוריות היה אי רגולרי (אלפים ואז אחדות למשל). כלומר, המשתתפים היו מסוגלים להשתמש במבנה התחבירי כדי לבצע ציאנקינג. נראה כי המשתתפים מייצגים מבנים מכל הסוגים באופן משתנה וגמיש. בנוסף, אנחנו יודעים שמספרים אי-רגולריים דורשים מהמשתתפים זמן עיבוד ארוך יותר ומורכבים יותר להפקה בגלל השינוי שצריכים לעשות בייצוג התחבירי. הופעת הספרה אפס באמצע המספר מאלצת את הנבדק להפיק את המספר עם הקטגוריה אך ללא הפקה של הספרה עצמה, האפס הוא שומר מקום. למרות הקושי שמעלים מבנים אי-רגולריים, הנבדקים הציגו דפוס דומה ברמת הזכירה לניסויים הקודמים עם מבנים רגולריים – כלומר הם הצליחו לייצג באופן יעיל גם את המבנים התחביריים ה"קשים" יותר.

8. דיון כללי

כיצד אנו מקודדים מספרים רב-ספרתיים, כך שניתן יהיה להשתמש במידע הזה אחר כך, לעבד אותו ולשחזר. בני אדם מסוגלים לתפוס רצפים מופשטים המורכבים מפריטים רבים כמבנים בודדים. על מנת לבדוק את זה בנינו מטלת חזרה עם מספרים רב-ספרתיים. המשתתפים היו צריכים לחזור על המספרים ששמעו בחמישה תנאים שונים, כל תנאי הציג את אותו הגירוי אך עם סדר מילים שונה. סדר הצגת המילים קבע האם הרצפים המוצגים יהיו תחביריים או לא תחביריים. לדוגמא, הרצף התחבירי - מאתיים שלושים ושבע, לעומת הרצף הלא תחבירי - שבע שלושים ומאתיים. רמת הזכירה של המשתתפים הייתה גבוהה יותר ברצפים תחביריים לעומת רצפים לא-תחביריים. המסקנה היא שברצפים תחביריים הנבדקים השתמשו במבנה התחבירי באופן טבעי כדי לעשות צ'אנקינג של המילים לכדי מבנים בודדים גדולים המכילים מידע רב וכך הצליחו להחזיק מידע רב יותר בזיכרון עבודה ולחזור עליו.

רמת זכירה היתה אופטימלית בתנאי שאיפשר לנבדקים לארגן את המידע לשני רצפים תחביריים, ויצר איזון בין גודל הצ'אנק ומספר הצ'אנקים. תוצאות אלו היו דומות בשלושת המדדים שנבדקו בניסוי, מילים, ספרות וקטגוריות. משתתפי המחקר עשו צ'אנקינג ללא כל הוראה מכוונת וגם במצב בו וידאנו שהרמזים החיצוניים לביצוע הצ'אנקינג היו זהים בכל התנאים: גם אז, רמות הזכירה נשארו טובות יותר בגירויים עם רצפים תחביריים ארוכים.

8.1 צ'אנקינג תחבירי

בניסוי הראשון ראינו שהמשתתפים היו מסוגלים לייצג ולזכור בצורה טובה יותר רצפים תחביריים בהשוואה לרצפים לא תחביריים. זהו בעצם, הצ'אנקינג התחבירי - היכולת לאגד יחידות אינפורמציה רבות לתוך מבנים בודדים. הצ'אנקינג התחבירי התאפשר רק בזכות הייצוג המנטלי התחבירי, כיוון שזה היה ההבדל היחיד בין התנאים.

בעדויות קודמות ממחקרי שפה ראינו שמילה אחת יכולה להיות מורכבת ממספר מורפמות ומשפט מורכב ממספר מילים, ועדין אנחנו יכולים לעבד, לזכור ולשחזר אותן כיחידות שלמות (Dehaene, Meyniel, 2015; Wacongne, Wang, & Pallier, 2015). במאמר של (Dehaene et al., 2015) מוצגים חמישה מנגנונים שמאפשרים לנו לייצג מספרים רב ספרתיים כרצפים תחביריים; (1) ידע על מעבר ותזמון – היכרות עם הפריט ומה סביר להניח שיגיע אחריו ומתי. (2) צ'אנקינג – דחיסת מספר פריטים ליחידה אחת שניתנת לעיבוד כשלם. (3) ידע קודם – איזה פריט מגיע ראשון, שני וכו', ללא תלות בפריטים הקודמים. (4) היכרות עם סכמות מופשטות שמאגדות בתוכן מבנים. (5) היכרות עם מבנה העץ התחבירי וחוקיו, יצירת מבנים תחביריים בעלי מבנה עומק והכלת

חוקים ברמות שונות ותחומים אחרים. במחקר הנוכחי ראינו שיש השפעה לרמות השונות הביצוע של הנבדקים. כאשר ניסינו לנטרל חלק מהרמות ולבודד את הרמה התחבירית, ראינו שיש השפעה על הביצועים. באופן ברור, התוצאות לא היו אפקט של היכולת לזהות סדירויות בגרוי, אלא של הייצוג התחבירי עצמו. גם כאשר רמזנו למשתתפים לחלק לצ'אנקים בצורה מסוימת, הייתה לרמיזה זו השפעה על התוצאות, אך עדיין המשתתפים זכרו בצורה טובה יותר את הרצפים התחביריים. כלומר, ניתן לומר שלהיכרות עם מבנים תחביריים השפעה חזקה כאשר אנחנו מייצגים מספרים רב ספרתיים.

עדויות דומות ראינו במחקר שעסק בהטרמה תחבירית, כאשר נבדקים שמעו מספרים רב-ספרתיים, ולאחר כל גירוי היו צריכים להפיק מספר רב-ספרתי רנדומלי. המשתתפים הפיקו מספרים דומים למספר המטרה ששמעו. ניתן לומר שהתרחש עיבוד תחבירי של המספר ולמבנה התחבירי תפקיד בתהליכי הבנה והפקה של המספר (Dotan, Breslavskiy, Diab-Copty, & Yousefi, 2020). המחקר הנוכחי מחזק את המסקנות של המחקר לפיהן קיים ייצוג מפורש של המבנה התחבירי של המספר, ואף מרחיב אותו, כפי שיפורט להלן.

מחקרים נוספים בתחום תחביר של שפה מראים מעורבות עקבית של אזורים ספציפיים במוח כאשר נבדקים מייצגים מבנים תחביריים שפתיים (משפטים: הילד הלך לגן עם אבא שלו), לעומת כשאותם נבדקים מייצגים מילים שאינן מתכנסות למבנים תחביריים (לא משפטים: הלך שלו אבא עם לגן הילד) (Friederici, Meyer, & VonCarmon, 2000; Humphries, Binder, Medler, & Liebenthal, 2006; Mazoyer et al., 1993; Pallier et al., 2011). אותם אזורים מוחיים שמעורבים בייצוג תחבירי שפתי נראו פעילים גם כשנבדקים ייצגו מבנים תחביריים מספריים (מספרים רב-ספרתיים: עשרים ושלוש, שלושים ושתיים), לעומת מצב שבו אותם נבדקים ייצגו ספרות או כמויות שלא מתכנסות למספר רב-ספרתי אחד (שלוש ועשרים, שתי שלושים) (Blanco-Elorrieta, & Pylkkanen, 2016). גם עדויות אלו תומכות ברעיון לפיו קיים ייצוג מנטלי של מספרים רב-ספרתיים במבנה תחבירי.

8.2 ייצוג חוצה שלשה

כאשר הוצגו למשתתפים רצף תחבירי אחד ארוך, לעומת שני רצפים תחביריים, היה להם קל יותר לזכור שני רצפים. ממצא זה מתאים למאפייני זיכרון העבודה: למשתתפים היה קל יותר לעשות צ'אנקינג לשש מילים המחולקות לשני רצפים תחביריים בהשוואה לשש מילים כרצף תחבירי אחד ארוך (Chekaf, Cowan, & Mathy, 2016). ממצאים אלו אנחנו מגיעים לשתי מסקנות עיקריות. (1) הייצוג התחבירי יכול לייצג מבנים ארוכים שכוללים שתי שלשות. (2) הצ'אנקינג התחבירי הוא תהליך אוטומטי, בלתי רצוני ואינו אסטרטגיית זכירה (כיוון שהמשתתפים עשו זאת למרות שזה לא השתלם אלא פגע ברמת הזכירה).

הבדלי הזכירה של המשתתפים בתנאים שונים מלמדים אותנו על מאפיינים ספציפיים של המבנה התחבירי. היכולת של המשתתפים בניסוי לייצג מספרים עם שש ושבע מילים כמספר רב-ספרתי אחד ארוך מאפשרת לנו להבין שהייצוג התחבירי מאפשר חיבור של שלשות (52,986) לכדי מספר אחד. זאת בשונה מייצוג אותן מילים כשני מספרים נפרדים (52,000 / 986). שהרי אם המשתתפים לא היו מסוגלים לייצוג מספר "חוצה שלשה", בתנאי A הם היו מפרקים את המספר הארוך לשני מספרים כמו בתנאי B, ואז היינו רואים רמות זכירה דומות. אך הייצוג השלם של מבנה המספר העמיס על הזיכרון כמצופה וראינו רמות זכירה פחות טובות בתנאי A. היכולת לייצג מספר חוצה-שלשה מאפשרת לנו להבין את המורכבות התחבירית העולה עם עלייה באורך המספר ולמעשה יוצר ייצוג שונה של מספר בהשוואה לשתי שלשות שאינן מתכנסות לכדי מבנה אחד.

בעבודת המחקר של מנדלסון-ברש (2020) בנושא כתיבת מספרים רב ספרתיים והמבנה התחבירי, הוכתבו לנבדקים מספרים רב ספרתיים המקבילים באורך ובמבנה שלהם לתנאים A ו-B, וגם שם נראו תוצאות דומות. פערי הזמנים בין כתיבת ספרות סמוכות (שמהווים מדד לאופן הייצוג הקוגניטיבי) הראו שהמשתתפים ייצגו מספרים ארוכים במבנה תחבירי אחד, והיו מסוגלים לעשות חיבור בין השלשות: הפער בין השלשות היה קצר יותר בהכתבת מספרים 6-ספרתיים בהשוואה לכתיבה שתי שלשות שאינן רצף תחבירי אחד ארוך – כנראה כיוון שהיה "מחיר" למבנה התחבירי המורכב-יותר של מספר 6 ספרתי, ממש כמו בניסוי 1 כאן. מעדויות אלו אנו מסיקים שהייצוג התחבירי הוא חוצה שלשה, לא מוגבל לשלשות בלבד אלא מסוגל לחבר שלשות לכדי מספרים רב-ספרתיים ארוכים ומורכבים יותר. ממצא זה משמעותי בדרך לאפיין את המערכת התחבירית-מספרית וטרם ידוע לנו על מחקרים קודמים בתחום שהראו את הייצוג חוצה-שלשה.

8.3 אוטומטיות

במחקר הנוכחי אפשר לראות את השילוב בין תהליך הצ'אנקינג לבין קיומם של מנגנונים תחביריים מספריים כבסיס לזכירה טובה יותר של מספרים ארוכים באופן כללי. באופן יותר ספציפי, בהשוואה בין תנאי A לתנאי B בניסוי 1, רמות הזכירה היו טובות יותר בתנאי B שכלל שני רצפים תחביריים, לעומת תנאי A, שכלל רצף תחבירי אחד ארוך. את תופעה זו ניתן לייחס את זה לאוטומטיות של תהליך הצ'אנקינג ולייצוג המבנה גם יחד. המשתתפים שלפו מבנים תחביריים מוכרים והלבישו לתוכם את המידע הקיים כדי לייצג את רצף תחבירי אחד ארוך בתנאי A, מה שהעמיס על הזיכרון והביא לירידה ברמת הזכירה. ייצוג המבנה היה אוטומטי ונעשה על ידי המשתתפים גם כאשר נמצא פחות יעיל לביצוע המטלה. גם בהינתן רמזים חיצוניים לאופן ביצוע הצ'אנקינג, המשתתפים עשו צ'אנקינג יותר בקלות לרצפים שמאפשרים יצירת מבנה תחבירי. הרמזים שניתנו בניסויים השונים היו כמעט חסרי משמעות ברצפים שלא איפשרו יצירת מבנה תחבירי ושיפרו רק במעט את זכירתם.

תופעת הצאינקינג מוכרת לנו כבר משנות ב-50 בספרות, וידועה כתופעה משמעותית בלמידה ותפיסה. עוד אנחנו יודעים שתהליך הצאינקינג נעשה באופן אוטומטי וגם באופן מודע והוא קשור לתהליכים תפיסתיים של אחזור מהזיכרון, לזהות ולחזות בפריטים הקרובים ולשלוף מבנים (Dehaene et al., 2015; Miller, 1956). במקרה שלנו, תהליך הצאינקינג נשען על מנגנונים תחביריים מספריים ספציפיים; מבנים גנריים שניתן לשלוף ולהביש עליהם אינפורמציה ספציפית של המספר. מחקרים שונים בנושא צאינקינג ותחביר שפתי מתארים את המפגש בין תהליך הצאינקינג והמנגנונים התחביריים הספציפיים כתבניות שניתנות לשליפה בעת הצורך ויצירת מבנים של משפטים. אותן תבניות נוצרות באופן אוטומטי ולא רצוני בתהליכי עיבוד של מבנים שונים. התבניות הן הייצוג קוגניטיבי תחבירי עם מידע קבוע ומשתנה גם יחד, מידע על מבנה קיים שלתוכו נכניס מילים. במטלות חזרה ניתן להתייחס לבנים האלו כצאינקים שנבנים בעת הצורך. אל התבניות האלו אנחנו מכניסים את המידע הנוסף שקיים בגירוי, מילות המספר הספציפיות. השלמת המידע מאפשרת לנו ביצוע של מטלות חזרה באופן טוב יותר. האוטומטיות של תהליך הצאינקינג מתאפשרת רק כאשר קיים מנגנון ספציפי של מידע שניתן לשלוף – למשל מבנה תחבירי (Dotan et al., 2020; Gobet et al., 2001).

המחקר הנוכחי מראה שהמנגנון התחבירי שאחראי על זיהוי מבנה המספר הוא ספציפי למספרים ואוטומטי. בניסויים השונים ראינו את היכולת של מנגנון זה להיות אדפטיבי ומהיר לסוגי מבנים שונים שמופיעים בגירוי, בין אם מדובר על מבנים אי-רגולריים, מבנים חוצי-שלשה או פשוט הופעה של מבנים משתנים. דפוס הזכירה של המשתתפים נשאר עקבי לאורך כל הניסויים ועצם קיומו של רצף תחבירי אפשר למשתתפים לעשות את הצאינקינג בקלות ולהיעזר בידע הקיים על מבנה המספר בזמן העיבוד. תכונות אלה של הייצוג התחבירי של המספר יכולות ללמד אותנו שמנגנון זה הוא Low-level, במובן שהוא בלתי רצוני וקורה באופן מיידי ללא תכנון או אסטרטגיה של המשתתפים. זאת בדומה לתהליכים Low-level אחרים (למשל בקריאה), שהם גם כן אוטומטים ומהירים, וקשורים בזיהוי ושליפה של מבנים סדורים ותכונות של הגירוי. למשל, כשקורא מיומן יראה את המילה ב ל ו נ י ס – הוא מיד יזהה את האותיות, ימקם אותן באופן יחסי וישלוף את המילה, כל התהליך הזה קורה באופן לא רצוני ולא מתוכנן על ידי הקורא. באופן דומה בקריאת מספרים, בעת הופעת המספר 4 5 2, נזהה באופן אוטומטי ומהיר את הספרות, ונמקם אותן באופן יחסי אחת לשניה, וגם ניצור מבנה תחבירי (Wolf, Bally, & Morris, 1986). גם מחקרים שנעשו בתחום הפריימינג התחבירי במשפטים, היה נראה כי כאשר מציגים לדוברי השפה משפטים במבנים מסויימים עולה הסיכוי שבעת תיאור תמונה הם ישתמשו במשפטים עם מבנים תחביריים דומים לאלו שהוצגו להם קודם לכן. בעצם קיימת למידה מרומזמת של המבנים, ללא כל הוראה ישירה או התכוונות רצונית מצד המשתתפים הם מסוגלים לזהות את המבנים באופן אוטומטי מהיר ואחר כך לשלוף אותם בעת הצורך (Bock, Dell, Chang, & Onishi, 2007). נראה כי מנגנוני התחביר המספרי עובדים באופן מאוד דומה.

8.4 היבטיים מתודולוגיים

במחקר הנוכחי נעשה שימוש בפרדיגמה שמציגה גירוי דומה (רצף מילות מספר) בכמה תנאים שונים. בכל תנאי מה שמשתנה הוא סדר הצגת המילים של הגירוי, ואילו יתר הפרמטרים (כמות המילים וזהותן) נשארים קבועים. בפרדיגמה זו נעשה כבר שימוש במחקרים קודמים (Dehaene et al., 2015; Barrouillet et al., 2010; Hung et al., 2015; Pallier et al., 2011), אך במחקר שלנו השתמשנו בה עם כמה שינויים שאפשרו לנו לשלוט על יותר משתנים ובכך לזקק את התוצאות ולראות את תופעת הצ'אנקינג התחבירי ראשית, השתמשנו בפרדיגמה כמטלת חזרה, מה שלא איפשר הישענות על מידע ויזואלי, ואולי גם עודד את המשתתפים לעבד את המספר כמבנה שלם ולא מילה-מילה. הגירוי הופיע לזמן קצר ולא איפשר למשתתפים לבצע מניפולציות או אסטרטגיות אלא אילץ אותם לעבד אותו באופן אוטומטי. לפני שחזרו על המילים ששמעו המשתתפים היו צריכים להגיד את המשפט "איזה יום יפה היום", שמטרתו היתה לאתחל את זיכרון העבודה ולמנוע אסטרטגיית חזרה פונולוגית על המספר. מתוך פילוטרים שביצענו, נראה שהוראה זו חשובה ואף קריטית לקבלת תוצאות שמושפעות מהמבנה התחבירי ופחות מושפעות ממאפייני זיכרון העבודה והלולאה הפונולוגית. באופן זה, הצלחנו לבודד כמה שניתן את התופעה של צ'אנקינג תחבירי במטלת חזרה.

השתמשנו בפרדיגמה בשני אופנים שונים. בניסוי 1 הגירויים שהושמעו למשתתפים היו מוקלטים. כל פריט היה זהה במספר המילים, זהותן, הזמן שלקח להשמיע אותו, האינטונציה והמרווחים בין המילים. בצורה כזו הנבדק לא קיבל שום רמז לגבי איך לזכור את הרצף שהושמע, או מה הקשר בין המילים ששמע. המטרה הייתה לשלוט ולתת גירוי מבוקר ביותר שיצר פריטים מקבילים וזהים בכל תנאי, כדי לבודד את המשתנה היחיד שרצינו לראות את השפעתו - סדר המילים. ניסוי מבוקר זה אפשר לנו בחינה מדויקת של השפעת סדר הצגת המילים והצ'אנקינג התחבירי.

בניסוי 2 ו-3 הגירויים שהושמעו לנבדקים לא היו מוקלטים, אלא נאמרו על ידי הנסיינית. קצב הקראת הגירויים והאינטונציה נקבעו מראש. באופן זה יצרנו רמיזה מפורשת לנבדקים כיצד לבצע את הצ'אנקינג, על מנת לבודד את ההשפעה של גורם דחיסות המידע ולנטרל השפעה אפשרית של היכולת לזהות את הסדירות בגירוי. בניסויים אלה היו פרטים רבים שאינם נשלטים, למשל המרווחים בין המילים והרצפים, ואף טעויות אנוש. עם זאת, דווקא הניסויים האחרונים יצרו עוררות רבה יותר אצל הנבדקים, לעומת הניסוי הראשון שהיה מונוטוני יותר, וגם הגורם הזה עשוי להשפיע על רמת הביצוע. במחקרים הבאים יש להתייחס להיבטים אלו שעלולים ליצור הבדלים שיכולים לנבוע מעניין, מוטיבציה וקשב של המשתתפים בזמן הניסוי.

במחקר הנוכחי ניתחנו את התוצאות לפי שלושה פרמטרים של טעויות: במילים, בספרות ובקטגוריות. בניסויים אחרים אפשר לשקול לנתח גם את האינטונציה של המשתתפים, כאינדיקציה לאופן שבו עשו צ'אנקינג. על ידי ניתוח ההפסקות בדיבור, כמו גם עליה וירידה בטון הדיבור, ניתן לנסות ולהבין איפה בדיוק המשתתפים

פוחחים וסוגרים כל צ'אנק, ולכמה צ'אנקים חילקו. ייתכן שחישוב מרווחים והפסקות בין מילים שיוצרות מבנה תחבירי יכול גם לספק לנו מידע על אפיוני המבנים התחביריים, כמו ייצוג חוצה-שלשה. בנוסף, אפשר לבדוק זמני תגובה לחזרה על רצפים תחביריים לעומת רצפים לא תחביריים ולנסות להסיק על מנגנון הצ'אנקינג התחבירי.

8.5 מחקרי המשך

במחקר הנוכחי הראינו את קיומו של צ'אנקינג תחבירי, היכולת שלנו לאגד מילות מספר לתוך מבנה של מספר רב-ספרתי ללא הוראה מפורשת, באופן אוטומטי לכדי מבנים תחביריים שונים, אצל משתתפים ללא לקויות. בהמשך יהיה מעניין לקחת את הנושא למחקר נוירופסיכולוגי שיתמקד באפיון הייצוג התחבירי של מספרים תוך ניתוח דפוסי התפקוד של נבדקים עם ליקויים קוגניטיביים בעיבוד מספרים סימבוליים (דיסנומריה). שתי שיטות המחקר משלימות זו את זו: המחקר הקוגניטיבי מאפיין את התפקוד התקין של אנשים ללא לקויות, והמחקר הנוירופסיכולוגי מתמקד בליקויים במערכת הקוגניטיבית. זאת, מתוך הנחה שדפוסי הליקוי מהווים "תמונת מראה" של המנגנונים הקוגניטיביים התקינים: ליקוי בעיבוד סוג מידע ספציפי מעיד על כך שקיים מנגנון שמטפל במידע הספציפי הזה, ומנגנון זה הוא שנפגע (McCloskey, Caramazza, & Basili, 1985). מטרת המחקר יכולה להתמקד בהנחת קיומו של העץ התחבירי ומאפייניו. תיאוריות תחביריות גורסות שסוגים מסוימים של ליקוי תחבירי-שפתי נובעים מחוסר יכולת לייצג את העץ התחבירי של המשפט במלואו (Friedmann, 2001, 2006; Friedmann & Grodzinsky, 1997). חומרת הפגיעה נקבעת על פי הצומת הכי גבוה בעץ שאליה יכול להגיע האדם, כלומר מבנה העץ המורכב ביותר שאותו אדם יכול להבין או להפיק. ככל שהפגיעה חמורה יותר, האדם יתקשה גם בהפקה של מבנים יותר פשוטים. בדומה, גם בעיבוד מספרים נצפה לראות סוג טעויות טיפוסיות לכל דרגת חומרה של פגיעה בעץ. למשל, פגיעה המאפשרת יצירת מבנים תחביריים עד רמת המאות (למשל עבור המספר 375), אבל לא מאפשרת לייצר מבנים תחביריים מורכבים יותר (למשל עבור המספר 5627 שמצריך ייצוג חוצה-שלשה). ככל שהליקוי חמור יותר כך האדם יוכל לייצג מספרים קטנים יותר, והצומת הכי גבוה בעץ אליו יוכל להגיע יהיה נמוך יותר, למשל אדם עם ליקוי חמור יוכל לייצג עד מספרים של מאות בלבד ויתקשה לייצג מספרים של אלפים ומעלה. אדם עם ליקוי חמור אף יותר יתקשה אפילו לייצג מספרים דו ספרתיים ויצליח להפיק מספרים חד ספרתיים (דותן, פרידמן, ודהאן, 2018).

במחקר זה ראינו את אפקט הצ'אנקינג התחבירי עם מילות מספר, ניתן לראות את אותו אפקט בניסוי עם פרדיגמה דומה הכוללת מילות תפל במבנה של מספרים (למשל, "קלוב מאות וצרידים"). על ידי שימוש במילות תפל ניתן לשלול הסברים חלופיים הקשורים בידע קודם, מסומנות המילים והיכרות עם סדר קטגוריות ולזקק את הידע המבני-תחבירי. שימוש במילות תפל מאלץ את המשתתפים להישען על הידע התחבירי של המספר בלבד

לביצוע ציאנקינג כדי לזכור את הגירוי המושמע (מתוך עבודת הסמינר של גל פוס וקרן סיגל, 2020). בהמשך יהיה אפשר להרחיב את הניסוי למבנים מגוונים ונוספים.

9. סיכום

המחקר הנוכחי מוסיף ידע בתחום שבו רב הנסתר על הגלוי, תחביר מספרים. ניסינו לבדוק תופעות שמרמזות על קיומם וטיבם של מבנים תחביריים במספרים מילוליים. מחקר מסוג זה יכול להוסיף ידע על מנגנונים קוגניטיביים תחביריים-מספריים שמאפשרים עיבוד של מספרים מילוליים. אינפורמציה זו יכולה להשלים את התמונה באשר למודל קריאת מספרים ולאשש את קיומם של תהליכים תחביריים בעיבוד מספרים, שמייצגים במפורש את המבנה של המספר המילולי. למחקר הנוכחי יש חשיבות משלושה היבטים שונים: ראשית, הראינו שיש ייצוג מפורש של המבנה התחבירי של מספרים מילוליים. שנית, המחקר מציג פרדיגמה מוכרת עם כמה שינויים חדשים שמאפשרים לחקור עיבוד מספרים מילוליים תוך שימוש בתופעת ציאנקינג. מחקרי המשך יוכלו להשתמש בווריאציות שונות של הפרדיגמה הזו, עם משתתפים עם או ללא לקויות כדי לאפיין את מערכת התחביר המספרי. שלישית, במחקר זה הראינו את הדפוס התקין אצל המשתתפים ללא לקויות. זו יכולה להיות נקודת-השוואה למחקרי המשך למחקרים נורופסיכולוגים שיתמקדו בנבדקים עם לקויות. מטרת-העל של מחקר זה הוא לבסס תשתית קוגניטיבית שיכולה לעזור בהבנת מנגנוני למידה ולקויות למידה. בשנים האחרונות, נראה כי הולכת וגדלה ההבנה שהיכולת לעבד, לקרוא ולכתוב מספרים תלויה במידה רבה ביכולת לעבד את המבנה התחבירי שלהם. האתגר התחבירי שעומד בפני ילדים שרוכשים את חוקיו הוא מורכב ולוקח זמן רב ונראה כי ההבנה שלהם את התחביר יכולה לנבא הצלחה בתחום המתמטיקה בגיל מאוחר יותר (Dotan & Dehaene, 2020; Dotan et al., 2021; Dotan & Friedmann, 2018; McCloskey, 1992; Miura & Okamoto, 1989). בהתאם לכך, אנחנו מקווים שבהמשך ניתן יהיה לפתח תכניות הוראה במתמטיקה שישומו דגש על ההבנה התחבירית של המספר באופן מפורש ודרך זה לעבוד גם עם תלמידים עם ליקויות הקשורות ספציפית בתחביר המספרי.

מקורות

- גביעון, א', פרידמן, נ' (2008). פריגבי – סוללה לאבחון זיכרון עבודה פונולוגי. *שפה ומוח*, 7, 161-180.
- מנדלסון-ברש, ת' (2020). מודל לכתיבת מספרים רב-ספרתיים, המבוסס על ייצוג היררכי תחבירי של המספר. עבודה לתואר מוסמך, אוניברסיטת תל-אביב.
- קוה, ג. (2008). נוירופסיכולוגיה קוגניטיבית – מבוא ומדריך קריאה (עמ' 5-27). האוניברסיטה הפתוחה.
- Basso, A., & Beschin, N. (2000). Number transcoding and number word spelling in a left-brain-damaged non-aphasic acalculic patient. *Neurocase*, 4(2), 129-139.
- Barrouillet, P., Thevenot, C., & Fayol, M. (2010). Evidence for knowledge of the syntax of large numbers in preschoolers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 105(3), 264-271.
- Binder, J. R., & Desai, R. H. (2011). The neurobiology of semantic memory. *Trends in cognitive sciences*, 15(11), 527-536.
- Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W., & Conant, L. L. (2009). Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cerebral cortex*, 19(12), 2767-2796.
- Blanco-Elorrieta, E., & Pyllkänen, L. (2016). Composition of complex numbers: Delineating the computational role of the left anterior temporal lobe. *NeuroImage*, 124, 194-203.
- Bock, K., Dell, G. S., Chang, F., & Onishi, K. H. (2007). Persistent structural priming from language comprehension to language production. *Cognition*, 104(3), 437-458.
- Bock, K., & Griffin, Z. M. (2000). The persistence of structural priming: Transient activation or implicit learning? *Journal of Experimental Psychology: General*, 129(2), 177.
- Castles, A., & Friedmann, N. (2014). Developmental dyslexia and the phonological deficit hypothesis. *Mind & Language*, 29(3), 270-285.
- Chekaf, M., Cowan, N., & Mathy, F. (2016). Chunk formation in immediate memory and how it relates to data compression. *Cognition*, 155, 96-107.
- Chomsky, N. (1957). Syntactic structures. 's-Gravenhage: Mouton. *The Hague, The Netherlands*.
- 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.
- Cohen, L., & Dehaene, S. (1991). Neglect dyslexia for numbers? A case report. *Cognitive Neuropsychology*, 8(1), 39-58.
- Cohen, L., & Dehaene, S. (2000). Calculating without reading: Unsuspected residual abilities in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology*, 17(6), 563-583.
- Coltheart, M., & Kohonen, S. (2012). Acquired and developmental disorders of reading and spelling. *The Handbook of the Neuropsychology of Language*, 1, 892-920.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108(1), 204.
- 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.
- Dehaene, S., Meyniel, F., Wacogne, C., Wang, L., & Pallier, C. (2015). The neural representation of sequences: from transition probabilities to algebraic patterns and linguistic trees. *Neuron*, 88(1), 2-19.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3-6), 487-506.

- Deloche, G., & Seron, X. (1987). Numerical transcoding: A general production model. In G. Deloche & X. Seron (Eds.), *Mathematical disabilities: A cognitive neuropsychological perspective* (pp. 137-170).
- Dotan, D., & Dehaene, S. (2020). Parallel and serial processes in number-to-quantity conversion. *Cognition*, *204*, 104387.
- Dotan, D., Eliahou, O., & Cohen, S. (2021). Serial and syntactic processing in the visual analysis of multi-digit numbers. *Cortex*, *134*, 162-180.
- 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.
- Dotan, D., & Friedmann, N. (2018). A cognitive model for multidigit number reading: Inferences from individuals with selective impairments. *Cortex*, *101*, 249-281.
- Dotan, D., Friedmann, N., & Dehaene, S. (2014). Breaking down number syntax: Spared comprehension of multi-digit numbers in a patient with impaired digit-to-word conversion. *Cortex*, *59*, 62-73.
- Frankish, C. (1995). Intonation and auditory grouping in immediate serial recall. *Applied Cognitive Psychology*, *9*(7), S5-S22.
- Friedmann, N., & Colheart, M. (2018). Types of developmental dyslexia. In A. Bar-On, & D. Ravid (Eds.), *Handbook of Communication disorder: Theoretical, empirical, and applied linguistic perspectives* (pp.721-751).
- Friedmann, N. A., & Grodzinsky, Y. (1997). Tense and agreement in grammatical production: Pruning the syntactic tree. *Brain and Language*, *56*(3), 397-425.
- Friedmann, N., & Gvion, A. (2003). Sentence comprehension and working memory limitation in aphasia: A dissociation between semantic-syntactic and phonological reactivation. *Brain and Language*, *86*(1), 23-39.
- Friedmann, N., & Hatav, G. (2008). Agrammatic aphasia and the psychological reality of the syntactic tree. *Theoretical Hebrew Linguistics*, *339-368*.
- Friederici, A. D., Meyer, M., & Von Cramon, D. Y. (2000). Auditory language comprehension: an event-related fMRI study on the processing of syntactic and lexical information. *Brain and Language*, *74*(2), 289-300.
- Gobet, F., Lane, P. C., Croker, S., Cheng, P. C., Jones, G., Oliver, I., & Pine, J. M. (2001). Chunking mechanisms in human learning. *Trends in cognitive sciences*, *5*(6), 236-243.
- Hannagan, T., Amedi, A., Cohen, L., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2015). Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, *19*(7), 374-382.
- Humphries, C., Binder, J. R., Medler, D. A., & Liebenthal, E. (2006). Syntactic and semantic modulation of neural activity during auditory sentence comprehension. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(4), 665-679.
- Hung, Y. H., Pallier, C., Dehaene, S., Lin, Y. C., Chang, A., Tzeng, O. J. L., & Wu, D. H. (2015). Neural correlates of merging number words. *NeuroImage*, *122*, 33-43.
- Hurford, J. R. (1987). *Language and number: The emergence of a cognitive system*. B Blackwell: Oxford.
- Lochy, A., Domahs, F., Bartha, L., & Delazer, M. (2004). Specific order impairment in arabic number writing: A case-study. *Cognitive neuropsychology*, *21*(5), 555-575.
- Lochy, A., Pillon, A., Zesiger, P., & Seron, X. (2002). Verbal structure of numerals and digits handwriting: New evidence from kinematics. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *55*(1), 263-288.
- Mathy, F., & Feldman, J. (2012). What's magic about magic numbers? Chunking and data compression in short-term memory. *Cognition*, *122*(3), 346-362.

- Mazoyer, B. M., Tzourio, N., Frak, V., Syrota, A., Murayama, N., Levrier, O., ... & Mehler, J. (1993). The cortical representation of speech. *Journal of cognitive neuroscience*, *5*(4), 467-479.
- McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing: Evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, *44*(1-2), 107-157.
- McCloskey, M., & Caramazza, A. (1987). Cognitive mechanisms in normal and impaired number processing. In G. Deloche & X. Seron (Eds.), *Mathematical disabilities: A cognitive neuropsychological perspective* (pp. 201-219).
- McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, *4*(2), 171-196.
- McCloskey, M., Sokol, S. M., & Goodman, R. A. (1986). Cognitive processes in verbal-number production: Inferences from the performance of brain-damaged subjects. *Journal of Experimental Psychology: General*, *115*(4), 307.
- Miura, I. T., & Okamoto, Y. (1989). Comparisons of US and Japanese first graders' cognitive representation of number and understanding of place value. *Journal of Educational Psychology*, *81*(1), 109.
- Noel, M. P., & Seron, X. (1993). Arabic number reading deficit: A single case study or when 236 is read (2306) and judged superior to 1258. *Cognitive Neuropsychology*, *10*(4), 317-339.
- 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.
- Pallier, C., Devauchelle, A. D., & Dehaene, S. (2011). Cortical representation of the constituent structure of sentences. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(6), 2522-2527.
- Power, R. J. D., & Dal Martello, M. F. (1990). The dictation of Italian numerals. *Language and Cognitive Processes*, *5*(3), 237-254.
- Pollock, J. Y. (1989). Verb movement, universal grammar, and the structure of IP. *Linguistic Inquiry*, *20*(3), 365-424.
- Price, A. R., Bonner, M. F., Peelle, J. E., & Grossman, M. (2015). Converging evidence for the neuroanatomic basis of combinatorial semantics in the angular gyrus. *Journal of Neuroscience*, *35*(7), 3276-3284.
- Wolf, M., Bally, H., & Morris, R. (1986). Automaticity, retrieval processes, and reading: A longitudinal study in average and impaired readers. *Child Development*, 988-1000.