

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.)

האתגר הקוגניטיבי בחישוב מנטלי: האם קשה לזכור או קשה לשכוח?

The Cognitive Challenge in Mental Calculation:

Is It Hard to Remember or Hard to Forget?

בהנחיית ד"ר דרור דותן

מגישה:

ליגל יריב, ת.ז. 201199411

אוגוסט 2024

תודות

ראשית, תודה למנחה שלי, ד"ר **דרור דותן**, על הליווי הצמוד לאורך כל הדרך, הנוכחות המכוונת, על הזמינות הבלתי פוסקת, ועל הבנה עמוקה ומשמעותית של מחקר אקדמי. הידע הנרחב והניסיון הרב שלך היוו עבורי מקור השראה ולמידה. ההכוונה שלך סייעה לי להתפתח הן מבחינה אקדמית והן מבחינה מקצועית.

תודה מיוחדת ל**פרופ' יואב קסלר**, על הליווי המקצועי והעזרה בכל שלבי המחקר. התמיכה והנכונות שלך לסייע בכל עת היוו חלק בלתי נפרד מהצלחת המחקר.

תודה ל**זהר כהן ורוני מנחם**, שביחד איתי תיכננו, גיבשו והריצו את ניסוי 1. תרומתכן הייתה קריטית להשלמת הפרויקט.

להורי היקרים, **ליאורה ויוסי** מצובה, אני מודה על התמיכה והאמונה הבלתי פוסקים. התמיכה שלכם היא הבסיס לכל הישגיי והדוגמה שלכם מהווה עבורי מודל לחיים.

ותודה למשפחה הפרטית שלי, ל**לירון**, שותף הדרך שלי, תודה על התמיכה הבלתי מתפשרת, על ההבנה והעידוד שלך בכל שלב. נוכחותך לצדי הייתה קריטית להצלחתי, תודה שעזרת ואפשרת לי להפוך את התזה למציאות. לילדי המדהימים, **איתמר ורז**, תודה שהאמנתם, עזרתם והתרגשתם לאורך כל הדרך. אתם ההשראה שלי להמשיך ולהשקיע.

תקציר

זיכרון פעיל הוא מרכיב חיוני בחיי היום-יום: הוא מאפשר לנו לעבד, לאחסן ולשמור מידע לזמן קצר, וכך לנהל משימות מורכבות בזמן אמת. קיבולת הזיכרון הפעיל מוגבלת ביותר, וחריגה ממנה עלולה ליצור הפרעות בין הפריטים ולפגוע בזיכרון. לכן חשוב להחזיק בזיכרון רק את פריטי המידע הרלוונטיים ביותר עבור המשימה. לשם כך, קיים מנגנון הסרה שמוציא מידע ישן ולא רלוונטי ומפנה מקום למידע חדש.

בהקשר האקדמי הזיכרון הפעיל ממלא, בין השאר, מקום מרכזי בפתרון בעיות מתמטיות, וספציפית בביצוע חישובים אריתמטיים – אחת מהיכולות הבסיסיות במתמטיקה. באלגוריתם חישובי עם כמה שלבים, הזיכרון הפעיל מאפשר לנו לשמור את תוצאות הביניים ולעבוד עליהן. למרות זאת, מעטים המחקרים שניסו להבין בצורה מעמיקה את התפקיד המדויק של הזיכרון הפעיל בהפעלת אלגוריתם של חישוב, ואת האופן בו קושי בזיכרון הפעיל בא לידי ביטוי בתרגילי חישוב.

כדי לסייע להשלים את הפער הנ"ל, המחקר הנוכחי בדק איך הסרה והפרעה משפיעות על ביצוע פרוצדורות חישוביות. המשתתפים ביצעו פרוצדורה חישובית בה נדרשו לזכור כמה ערכים, לאחזר אותם מהזיכרון בכמה בשלבים, ולבצע עליהם חישובים. בניסוי 1, הם התבקשו בחלק מהצעדים לאחזר ערך שכבר אחזרו בצעד קודם ("אחזור שני"), ובצעדים אחרים לאחזר ערך שטרם אחזרו בצעד קודם ("אחזור ראשון"). שיעור הטעויות היה גבוה יותר בצעדי אחזור ראשון. אנו מציעים שמדובר באפקט של הפרעה: בכל צעד בו משתנה נמצא בזיכרון הפעיל ללא שימוש, הוא עובר הפרעה מצד המשתתפים האחרים. במערך הניסוי שלנו, המשתנה בצעדי האחזור הראשון היה בזיכרון מספר צעדים גדול יותר עד אחזורו בהשוואה לצעדי אחזור שני, לכן סבל מיותר הפרעות. בניסוי 2, יצרנו עומס זיכרון גדול יותר, שמגדיל את הסיכוי שהמשתתפים יסירו פריטים מהזיכרון כדי לפנות מקום לחישוב. היתרון של צעדי אחזור שני, שראינו בניסוי 1, הצטמצם – בהתאמה לרעיון שתהליך ההסרה (התכוף יותר בניסוי 2) פוגע בייצוג הפריט הספציפי שהוסר, ולכן פוגע בביצוע בצעדי אחזור שני יותר מאשר בצעדי אחזור ראשון. ניתוח נוסף, שהשווה בין פריטים שונים בתוך כל ניסוי, חיזק את מסקנותינו. בנוסף, ניתוח תיאורטי של המטלה איפשר לנו להצביע על רמת הייצוג הספציפית בזיכרון בה מתרחשת ההסרה המזיקה ביותר, ולהציע שורת הסברים מכאניסטיים ספציפיים לגבי האופן שבו ההסרה וההפרעה פוגעות בזיכרון וכתוצאה מכך בביצוע הפרוצדורה החישובית.

המחקר מדגיש את העובדה שקושי במתמטיקה יכול לנבוע ממגוון מנגנונים כלליים, כמו זיכרון פעיל, ולא בהכרח ממנגנון ספציפי הקשור רק למתמטיקה. מכאן שחשוב להבין קשיים במתמטיקה בהקשר רחב של תפקודים קוגניטיביים כלליים, ולא להתמקד רק במנגנונים ספציפיים הקשורים למתמטיקה עצמה. המחקר גם תומך ברעיון שזיכרון פעיל כולל בתוכו כמה תתי-מנגנונים, שכל אחד מהם יכול ליצור קושי ספציפי וממוקד אפילו אצל אנשים עם תפקוד קוגניטיבי תקין, ואולי גם אצל אנשים עם ליקויים קוגניטיביים ספציפיים.

Abstract

Working memory (WM) is essential to our everyday functioning. It allows us to process, store, and maintain information for short periods of time, thereby allowing to run complex tasks in real time. The WM capacity is strictly limited; exceeding this capacity creates interference between items and consequently obstructs memory. Therefore, it is crucial to retain in memory only the information most relevant to the task at hand. To this end, there exists a removal mechanism that discards no-longer-relevant information and makes room for new, relevant information.

In academic tasks, WM plays a central role in solving math problems, specifically in performing arithmetic calculations — a fundamental math ability. When we need to execute a multi-step algorithm mentally, WM allows storing and processing intermediate results. Still, to date, only very few studies have attempted to understand the precise role of WM in mental arithmetic algorithms, and to describe how WM difficulties affect mental arithmetic.

To help bridge this gap, the present study examined how removal from WM and interference in WM affect the performance in arithmetic procedures. Participants performed a simple arithmetic procedure in which they were required, in each trial, to remember several values, retrieve them from WM in several steps, and perform calculations on them. In Experiment 1, in some steps they were asked to retrieve a value they have already retrieved in a previous step (“recurring retrieval”), whereas in other steps they retrieved a value that was not retrieved earlier (“first retrieval”). The error rate was higher in first-retrieval steps than in recurring-retrieval steps. We propose that this is an effect of interference: when a value remains in active memory without being used, in each step it is subject to interference from the other values being activated. In our experimental setup, the values in the first-retrieval steps were retained passively in WM more steps than the values in the recurring-retrieval steps, and consequently the values in first-retrieval steps suffered more interference. Experiment 2 imposed higher WM load, thereby increasing the likelihood of a value being removed from WM after each step. The “recurring-retrieval advantage”, observed in Experiment 1, diminished — consistent with the idea that the removal process (which occurs more frequently in Experiment 2) damaged the memory representation of the specific value removed, and thus it disrupted the recurring-retrieval steps more than the first-retrieval steps. Additional analyses, which examined random fluctuations within each experiment, reinforced these conclusions. Moreover, a theoretical analysis of the task allowed us to identify the specific WM representation levels wherein removal was the most difficult, and to propose several concrete mechanisms explaining how removal and interference may disrupt memory representations and consequently impede the mental execution of arithmetic procedures.

The study strongly suggests that math difficulties can stem not only from math-specific mechanisms, but also from domain-general mechanisms such as WM. Hence, it is important to understand math difficulties not only in the context of ‘mathematical’ cognitive processes but also in the broader context of general cognitive processing. The study also indicates that WM comprises several distinct sub-processes, each of which can create specific difficulties in predictable mathematical operations. We saw these difficulties in typically-developing individuals; presumably, they might be even more severe in individuals with learning disorders or specific cognitive deficits.

תוכן עניינים

6	1. מבוא
6	1.1 חשיבה מתמטית ויכולת חישוב
6	1.2 זיכרון פעיל
7	1.3 מנגנון ההסרה
8	1.4 הפרעה
9	1.5 המחקר הנוכחי
11	2. שיטה
11	2.1 משתתפים
11	2.2 קריטריון ההכללה במחקר
12	2.3 מטלות אחזור משתנים
12	2.3.1 ניסוי 1
12	2.3.2 ניסוי 2 - מטלת אחזור משתנים עם חישוב
13	2.4 ניתוח סטטיסטי
14	3. תוצאות
14	3.1 ניסוי 1 - ללא חישוב
15	3.2 השפעת החישוב: ניסוי 2 לעומת ניסוי 1
15	3.3 ניסוי 2 - ההבדל בין פריטים קלים לפריטים קשים
17	4. דיון
17	4.1 סיכום הממצאים ומסקנות
19	4.2 מנגנון ההסרה
19	4.2.1 באיזו רמת ייצוג בזיכרון מתרחשת ההסרה?
19	4.2.2 איך ומדוע בדיוק ההסרה פוגעת בזיכרון וכתוצאה מכך בחישוב?
20	4.2.3 השוואה למחקרים קודמים
21	4.3 המנגנון שעומד מאחורי ההפרעה
22	4.4 משמעות לגבי מתמטיקה
24	4.5 השלכות פרקטיות לשטח
24	4.6 סיכום
26	ביבליוגרפיה
29	נספחים
29	נספח א' - מחקר נירופסיכולוגי
29	שיטה
29	תוצאות ודיון

1. מבוא

1.1 חשיבה מתמטית ויכולת חישוב

תחום המתמטיקה הוא תחום מורכב המערב נושאים מגוונים שדורשים יכולות קוגניטיביות שונות כמו חשיבה כמותית, פענוח סמלים, יכולת מרחבית וזיכרון (Karagiannakis et al., 2014). חשיבה מתמטית היא יכולת חשובה שמשמשת אותנו לא רק לפתרון בעיות מתמטיות אלא גם לפעילויות בסיסיות בחיי היומיום (Mazzocco et al., 2011).

אחד ההיבטים המרכזיים של חשיבה מתמטית הוא היכולת לבצע חישובים אריתמטיים. ניתן לחלק את החישובים האלה לשני סוגים עיקריים: עובדות יסוד ואלגוריתמים. **עובדות יסוד** הן תרגילי חיבור וכפל חד ספרתיים שאותן אנו זוכרים בעל-פה (Cappelletti et al., 2005). לדוגמא, אנו זוכרים בעל-פה שהפתרון לעובדת היסוד $2+3$ הוא 5. **אלגוריתמים** הם פרוצדורות חישוביות בנות כמה שלבים, והם משמשים לפתרון בעיות מתמטיות מורכבות יותר, כגון חיבור או כפל רב ספרתי, פתרון משוואות ועוד (Cappelletti et al., 2005; Hittmair-Delazer et al., 1995). קיימת דיסוציאציה כפולה בין ידע של עובדות יסוד לבין ביצוע אלגוריתמים של חישוב רב ספרתי. כלומר, ייתכן כי אדם המתקשה בידע עובדות יסוד לא יתקשה בביצוע אלגוריתמים של חישוב רב ספרתי, ולהיפך (Hittmair-Delazer et al., 1995; Temple, 1991).

ניתן לחלק את היכולת להתמודד עם אלגוריתמים חישובי לשלושה רבדים: ידע קונספטואלי, ידע פרוצדורלי ויכולת ההפעלה של האלגוריתם. **ידע קונספטואלי** הוא ההבנה של משמעות החישוב המתמטי, לרבות מהות האלגוריתם והעקרונות הכלליים של החישוב. לדוגמא, ההבנה שמשמעות פעולת החיבור היא הוספה. **ידע פרוצדורלי** מתייחס לשיטת החישוב ורצף השלבים אותם אנו צריכים לבצע בכדי להגיע לפתרון. לדוגמא, שיטת חישוב אחת של חיבור שני מספרים דו ספרתיים היא להתחיל מחיבור של שתי ספרות העשרות, לאחר מכן חיבור של שתי ספרות היחידות ולבסוף חיבור של שתי תוצאות הביניים לתוצאה סופית. **יכולת ההפעלה** של האלגוריתם מתייחסת למנגנונים הקוגניטיביים המאפשרים את הביצוע בפועל של החישוב, כגון זיכרון וקשב. קושי במתמטיקה יכול להתבטא בכל אחד מהיבטים אלו. כלומר, קיימים ליקויים סלקטיביים בידע קונספטואלי, ידע פרוצדורלי (Cappelletti et al., 2001, 2005), או ביכולת הפעלה של אלגוריתם (Semenza et al., 1997). במחקר הנוכחי נתמקד בהיבט השלישי, יכולת ההפעלה של האלגוריתם. נבדוק את התפקיד המדויק של זיכרון פעיל בהפעלת אלגוריתם של חישוב ואת האופן בו קושי בזיכרון פעיל בא לידי ביטוי בתרגילי חישוב.

1.2 זיכרון פעיל

יש סוגים שונים של זיכרון ודרכים שונות לתאר את חלוקתם. אחת מהן היא חלוקה לזיכרון לטווח ארוך, זיכרון לטווח קצר וזיכרון פעיל. ההבדל העיקרי בין זיכרון לטווח ארוך וזיכרון לטווח קצר הוא משך הזמן שהמידע נשמר והקיבולת של הזיכרון (Cowan, 2008). זיכרון לטווח קצר מוגדר כמנגנון אחסון של יחידות מידע המוחזקות לפרק זמן קצר ובאופן פסיבי. הזיכרון הפעיל מוגדר כמנגנון אחסון לטווח קצר באופן שמאפשר גם עיבוד של המידע וביצוע מניפולציה המשרתת את המשימה או הפעולה אותה אנו מבצעים (Baddeley & Hitch, 1974; Durstewitz et al., 2000; Ecker, Oberauer, et al., 2014; Gathercole, 1999; Lintz & Johnson, 2021; Oberauer, 2002; O'Reilly et al., 1999; Performance, 2000; Swanson & Beebe-Frankenberger, 2004). פתרון בעיות במתמטיקה בכלל,

וחישוב בפרט, דורשים שימוש בסוגי הזיכרון השונים, כולל זיכרון פעיל (Cowan, 2008; Peng et al., 2016; DeStefano & LeFevre, 2004; Friedman et al., 2018; Kessler & Meiran, 2008).

זיכרון פעיל הוא אחד המנגנונים המאפשר לנו להתמודד עם משימות שונות ביום יום ודרישות הסביבה המשתנות במהירות (Kessler & Meiran, 2008). הוא חשוב כיוון שלעיתים קרובות במהלך היום יום שלנו עלינו לבצע משימות הכוללת זכירה של מידע לפרק זמן קצר ועיבוד שלו; לדוגמה לזכור מידע מילולי או לבצע חישוב מתמטי מורכב הכולל אחסון מחשבתי של תוצרי הביניים של החישובים שלנו. היכולת הגמישה לאחסון ולתפעל מידע בזיכרון הפעיל חשובה ביותר לתפקוד הקוגניטיבי האפקטיבי שלנו (Gathercole, 1999). לזיכרון הפעיל תפקיד חשוב ביכולות מתמטיות בכלל ובפתרון תרגילי חישוב בפרט משום שמטלות אלו דורשות, בין היתר, אחסון מידע לטווח קצר ובו זמנית ביצוע מניפולציה על המידע המאוחסן. לדוגמה, בביצוע תרגיל חיבור רב ספרתי יש צורך לזכור את התרגיל, את שלבי האלגוריתם, ואת תוצאות הביניים שמתקבלות תוך כדי החישובים השונים (Peng et al., 2016).

Oberauer (2002) תיאר מודל זיכרון המורכב משלושה סוגי ייצוג שונים של המידע – שלוש דרכים שונות שבהן המידע מוחזק ומעובד. כל אחד מ-3 הייצוגים הוא סוג מסוים של אקטיבציה של מידע ב-LTM (זיכרון לטווח ארוך), והם יוצרים 3 רמות שונות של נגישות המידע המאוחסן ב-LTM. הייצוג הראשון, עם רמת הנגישות הנמוכה ביותר, הוא ALTM (Activated part of Long-Term Memory) – תפקידו לשמור את כלל המידע הרלוונטי למשימה מסוימת, כולל המידע שיידרש לשלביה המאוחרים יותר. הייצוג השני הוא RDA (Region of Direct Access) שתפקידו להתמקד בפריטים שעליהם נרצה להפעיל תהליך קוגניטיבי מסוים. ייצוג זה מוגבל לקיבולת של 3-4 פריטים. כיום מתייחסים לייצוג הזה כזיכרון הפעיל. הייצוג השלישי הוא FOA (Focus Of Attention), והוא מאפשר את הנגישות הגבוהה ביותר למידע. תפקידו לייצג את הפריט הספציפי שעליו מתבצעת המניפולציה הקוגניטיבית הנוכחית. בנוסף, במצב הבסיס המידע נמצא ב-LTM ללא אקטיבציה, ואינו חלק מ-3 הייצוגים הללו.

1.3 מנגנון ההסרה

קיבולת הזיכרון הפעיל מוגבלת ביותר (3-4 פריטים), לכן חשוב להחזיק בזיכרון הפעיל את פריטי המידע הרלוונטיים ביותר עבור המשימה ולשים לב לרמזים מהסביבה בנוגע לרלוונטיות עתידית של פריטים אלו או אחרים (Lintz & Johnson, 2021; Williams & Woodman, 2012). נקודה קריטית היא שכדאי להחזיק בזיכרון רק את המידע הרלוונטי, ולא מידע אחר: עומס במידע לא רלוונטי יפריע לגישה למידע הנדרש, וכך לא יתבצע תהליך קוגניטיבי יעיל, דבר שעלול לפגוע בביצוע המשימה. כדי למנוע זאת, נדרש מבנה קוגניטיבי שמבטיח שמידע ישן ולא רלוונטי יוסר ויפנה מקום למידע חדש ורלוונטי, וכך יתאפשר שימוש יעיל בקיבולת המוגבלת של הזיכרון הפעיל (Ecker, Lewandowsky, et al., 2014; Ecker, Oberauer, et al., 2014; Lewis-Peacock et al., 2018).

התהליך של החלפת מידע ישן במידע חדש נקרא עדכון הזיכרון הפעיל (Ecker, Lewandowsky, et al., 2014). פורמלית, עדכון מוגדר כהחלפת תוכן הזיכרון הנוכחי או שינוי שלו בתוכן חדש על-פי קלט חדש, כאשר ייתכן שחלקים מסוימים מתוכן הזיכרון ישתנו וחלקים אחרים יישארו ללא שינוי (Kessler & Meiran, 2008; Morris & Jones, 1990). תהליך העדכון נחשב לאחד משלושה תהליכים ניהוליים עיקריים (Ecker, Lewandowsky, et al., 2014), והוא חיוני לפונקציות קוגניטיביות גבוהות שונות בכלל, ולפעולות חישוב מתמטיות בפרט (Cragg & Gilmore, 2014). לדוגמה, כשאנו פותרים

את התרגיל 3+8, יש שלב בו אנחנו צריכים לעדכן את תוכן הזיכרון – להוסיף לזיכרון את התוצאה שחושבה (11) ולהסיר מהזיכרון את האופרנדים 3 ו-8 (Ecker, Oberauer, et al., 2014).

ניתן לחלק את פעולת העדכון לשני תהליכים: **הסרה** של מידע ישן ולא רלוונטי (Lewis-Peacock et al., 2018) ו**קידוד** מידע חדש. יש הטוענים שההסרה לא יכולה להתחיל לפני שהמידע החדש יוצג לקידוד (Ecker, Oberauer, et al., 2014). מנגד, יש הטוענים כי הסרה יכולה להתבצע מראש, לקראת תהליך הקידוד, עוד לפני שהמידע החדש מוצג. בכל מקרה, תהליך ההסרה אינו רק תוצר לוואי של החלפת פריטים ישנים בחדשים, אלא תהליך נפרד שיכול להתרחש באופן יזום ובצורה מכוונת. כלומר, מדובר בתהליך אקטיבי שמוכוון מטרה ולא בדעיכה טבעית של המידע בזיכרון (DeStefano & LeFevre, 2004; Lewis-Peacock et al., 2018).

ניתן לראות כמה סוגי עדויות לקיומו של תהליך הסרה ולכך שהוא נפרד מתהליך הקידוד: ראשית, יש מחקרים שהצליחו לבודד את תהליך ההסרה ותהליך הקידוד והראו שפעולת ההסרה איטית, קשה יותר ולא תמיד מיושמת ביעילות בכל המצבים (Ecker, Lewandowsky, et al., 2014). שנית, אם מידע מסוים הוסר מהזיכרון, יכולת הגישה אליו פוחתת, לפעמים אפילו עד כדי אי נגישות, כלומר המידע נשכח לחלוטין. שלישית, יש שיפור בביצועים במשימות זיכרון פעיל לאחר הסרת מידע לא רלוונטי. רביעית, הפעילות העצבית פוחתת בהתאמה למידע שהוסר (Lewis-Peacock et al., 2018; Muter, 1980).

יש סוגים שונים של הסרה, וניתן לסווג אותם במספר דרכים. סיווג אחד הוא הסרה קבועה לעומת הסרה זמנית. **הסרה קבועה** מתרחשת כשהמידע הופך ללא רלוונטי ומוסר מהזיכרון הפעיל לצמיתות, אך עדיין יכול להישאר בזיכרון לטווח ארוך (Williams et al., 2013; Ecker, Oberauer, et al., 2014). במודל של Oberauer (2002) שתיארנו לעיל, פירוש הדבר הוא שהמידע עובר מהזיכרון הפעיל אל LTM. **הסרה זמנית** מתרחשת כשהמידע הופך ללא רלוונטי באופן זמני אך עדיין נחוץ למשימה הנוכחית וניתן לשחזרו על-ידי רמזים לצורך שימוש חוזר בהמשך – כלומר, המידע עובר מ-RDA אל ALTM (Ecker, Oberauer, et al., 2014). המחקר הנוכחי יתמקד בהסרה זמנית.

סיווג נוסף של פעולת ההסרה הוא לפי היקף המידע שהוסר. כדי שתתבצע פעולת הסרה, תחילה יש לגשת למידע הנוכחי בזיכרון בצורה סלקטיבית ולהחליט האם להסיר את כולו, כלומר **הסרה מלאה**, או רק חלק מהפריטים, כלומר **הסרה חלקית**. הסרה מלאה נעשית בצורת "מחיקה" של כל הזיכרון בבת אחת, והסרה חלקית נעשית פריט אחר פריט. בהתאמה, הסרה חלקית איטית וקשה יותר מהסרה מלאה (Kessler & Meiran, 2008). המחקר הנוכחי יתמקד בהסרה חלקית.

1.4 הפרעה

הרעיון של הפרעה מבוסס על ההנחה שהזיכרון הפעיל מוגבל במספר הפריטים שהוא יכול לאחסן (עד 3-4 פריטים), וכאשר מספר הפריטים חורג מקיבולת הזיכרון, נוצר עומס שגורם להפרעה בין ייצוגי הפריטים השונים בזיכרון.

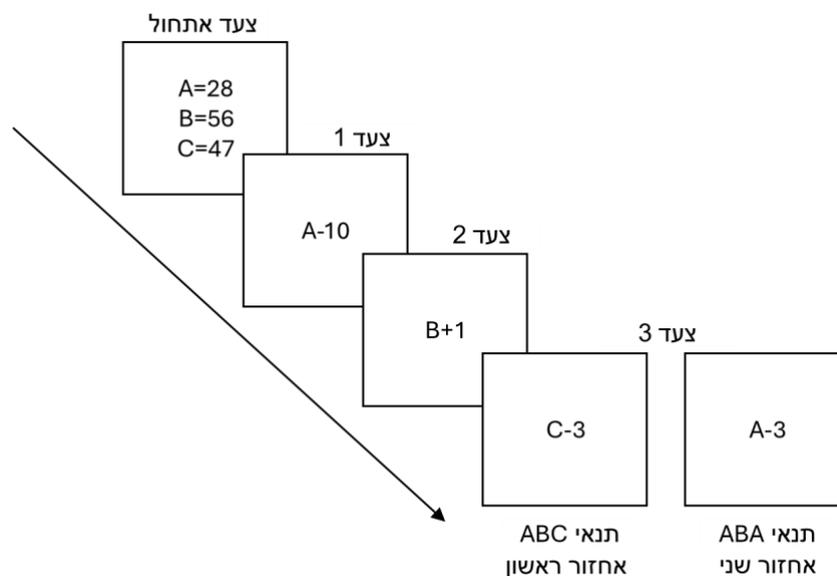
הפרעה יכולה לנבוע משתי סיבות עיקריות: מספר הפריטים המאוחסנים בזיכרון והדמיון ביניהם. ככל שמאוחסנים בזיכרון הפעיל יותר פריטים (ובעיקר אם מספרם עולה על קיבולת הזיכרון), וככל שהדמיון ביניהם יותר גדול, גדל הסיכוי לעומס כמו גם לחפיפה בין התכונות (features) של הפריטים השונים, וכתוצאה מכך – בלבול ופגיעה ביכולת לעבד ולשלוף כל פריט בנפרד ולהבחין ביניהם (Oberauer & Lin, 2017).

יש שני סוגים עיקריים של הפרעות; הפרעה פנימית והפרעה חיצונית. במחקר הנוכחי נתמקד בהפרעה פנימית, שנוצרת כאשר הפריטים בזיכרון הפעיל משפיעים זה על זה כאמור לעיל, למשל כתוצאה ממספר פריטים גדול או דמיון בין הפריטים. הפרעה חיצונית, בה לא נתמקד במחקר זה, נגרמת מגירויים חיצוניים חזותיים או שמיעתיים שמשפיעים את הדעת ומשפיעים על היכולת לשמור על המידע בזיכרון. הן הפרעה פנימית והן הפרעה חיצונית מובילות לשגיאות בזיהוי, שליפה ובשימור המידע (Oberauer & Lin, 2017).

1.5 המחקר הנוכחי

יש עדויות רבות להפרעה, ויש גם מחקרים (אם כי פחות) שמצאו עדויות למנגנון ההסרה. עם זאת, מעטים המחקרים שניסו להבין את התפקיד המדויק של הסרה והפרעה בהפעלת אלגוריתם חישוב. במחקר הנוכחי אנחנו רוצים לעשות צעד כדי לגשר על הפער הזה. למחקר שתי מטרות עיקריות: (1) לספק עדות נוספת לקיומו של מנגנון הסרה. (2) לבדוק האם מנגנון ההסרה והמנגנון שיוצר הפרעה משפיעים על ביצוע פרוצדורות חישוביות, ובאיזה אופן.

כדי לבדוק את השאלות האלה, השתמשנו במטלה בה המשתתפים נדרשו לאחזר ערכים מהזיכרון לפי פרוצדורה חישובית נתונה. בכל פריט, המשתתפים התבקשו לזכור שלושה ערכים (למשל, $A=23$, $B=62$, $C=71$, להלן "משתנים"), ואז, בסדרה של 3 צעדים, לומר אותם. בשני הצעדים הראשונים, הם התבקשו לאחזר משתנה אחר בכל צעד (למשל A ואז B). בצעד השלישי, שהיה הצעד הקריטי, הם נדרשו לאחזר משתנה שעדיין לא נשאלו עליו (C , "אחזור ראשון"), או לאחזר את המשתנה שכבר נשאלו עליו בצעד הראשון (A , להלן "אחזור שני") (תרשים 1).



תרשים 1. דוגמה לפריט בניסוי 2. הצעדים הראשונים זהים בשני התנאים: אתחול ערכי 3 המשתנים, ואז 2 צעדים בהם נדרש אחזור של 2 משתנים שונים. הצעד האחרון (הקריטי) שונה בין שני התנאים: תנאי ABC (אחזור ראשון) יש אחזור של המשתנה השלישי, ואילו בתנאי ABA (אחזור שני) יש אחזור של המשתנה שכבר הופיע בצעד 1.

המניפולציה הזאת – אחזור ראשון לעומת אחזור שני – אינפורמטיבית כיוון שהיא מאפשרת פעולה של שני מנגנונים שונים שהשפעתם מנוגדת. מנגנון אחד הוא מנגנון שיוצר הפרעה. הרעיון כאן הוא שכל אחזור דורש לבצע אקטיבציה של המשתנה הרלוונטי, דבר שאמור ליצור הפרעה לערכים האחרים. כתוצאה מכך,

אם בצעד הקריטי מאחזרים את המשתנה C (אחזור ראשון), מדובר במשתנה שכבר "הופרע" פעמיים, ע"י כל אחד משני הצעדים הקודמים (A,B), אבל אם בצעד הקריטי מאחזרים את המשתנה A (אחזור שני), הוא "הופרע" רק פעם אחת, ע"י הצעד השני (B). כתוצאה מכך, אחוז הטעויות בצעד הקריטי צפוי להיות נמוך יותר בצעדי אחזור שני מאשר בצעדי אחזור ראשון - "אפקט יתרון החזרה". בדיון, נציג גם הסבר אפשרי נוסף (פרט להפרעה) לתופעה זו.

לעומת זאת, מנגנון ההסרה יוצר אפקט הפוך. בסיום כל צעד, אם אכן יש תהליך הסרה, הוא יוריד את רמת האקטיבציה של המשתנה שאוחזר באותו צעד. אם התהליך הזה מתבצע באופן לא אופטימלי, הוא עלול לפגוע בייצוג של המשתנה שהוסר, ולפגוע ביכולת לשלוף אותו בהמשך. כתוצאה מכך נצפה לאחוז טעויות גבוה יותר בצעדים של אחזור שני בהשוואה לצעדים של אחזור ראשון - "אפקט מחיר החזרה".

כלומר, מערך המחקר שלנו יוצר "תחרות" בין 2 אפקטים שפועלים בכיוונים הפוכים - אפקט יתרון החזרה ואפקט מחיר החזרה, ומאפשר לבדוק איזה מהאפקטים חזק יותר ומתי. בנוסף, כדי לבדוק את השפעת המטלה וההקשר, ערכנו 2 ניסויים בפרדיגמה הנ"ל. ניסוי 1 התבצע כמתואר לעיל. ניסוי 2 היה זהה פרט לכך שבכל צעד המשתתפים התבקשו לא רק לאחזר את המשתנה המבוקש אלא גם לבצע עליו מניפולציה חישובית פשוטה (למשל $A+10$, $B-9$ וכו'). הדרישה לבצע חישוב מגדילה את העומס על הזיכרון הפעיל, ובעקבות זאת את הסיכוי שמידע יוסר מ-RDA אל ה-ALTM כדי "לפנות מקום" לחישוב. התוצאה צפויה להיות הגדלה של השפעת ההסרה (אפקט מחיר החזרה) בהשוואה לניסוי 1.

2. שיטה

2.1 משתתפים

בניסוי 1 היו 25 משתתפים בגילאי 19-46 (ממוצע: 25.95, ס"ת: 6)¹ ובניסוי 2 היו 30 משתתפים בגילאי 19-57 (ממוצע: 28.2, ס"ת: 7.03). המשתתפים היו דוברי עברית כשפת אם, שלמדו בגן וביה"ס יסודי בעברית בישראל וללא לקויות למידה או הפרעת קשב ידועות. הם גויסו דרך האוניברסיטה והרשתות החברתיות. המפגשים התקיימו בזום והמשתתפים קיבלו תשלום עבור השתתפותם. המחקר אושר ע"י ועדת האתיקה של האוניברסיטה.

2.2 קריטריון להכללה במחקר

המשתתפים עברו סינון מקדים – מבדק זיכרון לטווח קצר ומבדק זיכרון פעיל – כדי לוודא שתפקודי הזיכרון שלהם ברמה מינימלית לביצוע המטלה. הכללנו רק משתתפים שעברו בהצלחה את 2 המבדקים. בניסוי 2, בו העומס החישובי גדול יותר, דרשנו מהמשתתפים גם לעמוד בהצלחה ב-2 מבדקי סינון אריתמטיים (ידע של עובדות יסוד ויכולת ביצוע תרגילי חישוב רב - ספרתיים).

עובדות יסוד אריתמטיות

המשתתפים שמעו תרגילי חישוב חד-ספרתיים וענו עליהם בעל-פה. הם הונחו להימנע משימוש באסטרטגיות חישוב. שימוש באסטרטגיה נחשב כטעות. המבדק כלל 45 פריטים: 15 תרגילי חיבור חד ספרתיים, 10 תרגילי חיסור בהם האופרנד השני והתוצאה הינם חד ספרתיים, 15 תרגילי כפל חד-ספרתיים ו-5 תרגילי חילוק מתוך לוח הכפל. למחקר נכנסו רק משתתפים שהצליחו ב-70% מהפריטים לפחות.

חישוב רב ספרתי

המשתתפים שמעו 10 תרגילי חיבור רב-ספרתיים והתבקשו לפתור אותם בעל-פה ולהגיד בקול את התוצאה. הם התבקשו לחבר את ספרות המאות, אח"כ העשרות, ולבסוף היחידות. נאסר לכתוב, לדמיין את התרגיל כתוב, או להשתמש באסטרטגיה חיצונית אחרת (כגון סימון הספרות באוויר או שימוש בכל טכניקה ויזואלית אחרת). הם התבקשו לתמלל בקול רם את שלבי החישוב שהם מבצעים אך הקריטריון להצלחה היה רק התוצאה הסופית. כל תרגיל כלל שני מחוברים תלת-ספרתיים (לדוגמא, 248+631 או 134+682) שהורכבו מהספרות 9-1, ללא הספרה 0 וללא מילות "X-עשרה". למחקר נכנסו רק משתתפים שהצליחו ב-70% מהפריטים לפחות.

ספאן ספרות (מתוך סוללת "פריגבי", פרידמן וגבעון, 2008)

המטלה בדקה את קיבולת הזיכרון לטווח קצר של המשתתפים. בכל צעד הושמע למשתתפים רצף של ספרות באורכים שונים בקצב של ספרה לשנייה, והם התבקשו לחזור על הרצף באותו סדר בו הושמע. המטלה הורכבה מ-8 רמות (החל מרצף של 2 ספרות ועד לרצף של 9 ספרות), בכל רמה 5 רצפים. ממשיכים לרמה הבאה רק אם המשתתפים זכרו 3 רצפים ברמה הנוכחית. טווח הזכירה מוגדר כרמה הגבוהה ביותר שבה המשתתפים זכרו לפחות 3 רצפים מתוך ה-5, ועוד חצי נקודה אם זכרו 2 רצפים בשלב האחרון. בקבוצת

¹ חסרים נתוני גיל ל-4 משתתפים.

ביקורת של 202 משתתפים, הספאן הממוצע היה 6.6 (ס"ת 1.06). למחקר נכנסו רק משתתפים עם ספאן ספרות 5 או יותר ($z = -1.53$).

ספאן ספרות לאחור (מתוך סוללת "פריגבי", פרידמן וגבעון, 2008)

המטלה בדקה את קיבולת הזיכרון הפעיל של המשתתפים. היא הועברה בצורה דומה למטלת ספאן ספרות שתוארה לעיל, בהבדל אחד: על המשתתפים היה לחזור על כל רצף ספרות ששמעו בצורה הפוכה – מהסוף להתחלה. בקבוצת ביקורת של 105 משתתפים, הספאן הממוצע היה 5.4 (ס"ת 1.09). למחקר נכנסו רק משתתפים עם ספאן לאחור 3 או יותר ($z = -2.19$).

2.3 מטלות אחזור משתנים

2.3.1 ניסוי 1²

כל פריט במטלה הורכב מרצף של 4 צעדים, שהוצגו בזה אחר זה על המסך (תרשים 1). בצעד הראשון, צעד האתחול, הוצגו על המסך שלושה משתנים (להלן A, B, C) למשך 8 שניות והמשתתפים התבקשו לזכור אותם. בכל אחד משלושת הצעדים הבאים (להלן צעדים 1-3) המשתתפים התבקשו לאחזר את אחד המשתנים ולומר אותו בקול: בצעד 1 את המשתנה A, בצעד השני את המשתנה B, ובצעד השלישי את C (להלן תנאי ABC) או את A (תנאי ABA). בצעדי האחזור לא הייתה הגבלת זמן. ההבדל הקריטי הוא בצעד השלישי: בתנאי ABC, המשתתפים צריכים לאחזר את המשתנה C, שעדיין לא אחזרו (אחזור ראשון). לעומת זאת, בתנאי ABA המשתתפים צריכים לאחזר את המשתנה A, שעבר אחזור (אחזור שני).

הניסוי כלל 40 פריטים, כאשר כל פריט הופיע בשני תנאים: ABC ו-ABA, כלומר 80 פריטים בסך הכל, שהוצגו בסדר אקראי. ערכי המשתנים היו מספרים דו-ספרתיים, ללא מספרים שלמים וללא מספרי עשרה (לדוגמא, $A=21$, $B=74$, $C=35$). שמות המשתנים היו A, B, C או X, Y, Z לסירוגין, כאשר סדר שמות המשתנים – מי מופיע בצעד הראשון, השני והשלישי – היה אקראי. עם זאת, למען הפשטות, להלן נתייחס לשמות המשתנים תמיד באותיות A, B, C כדי לציין את המשתנה שהוצג בצעד הראשון, בצעד השני, ובצעד השלישי בתנאי ABC. המשתתפים הונחו מראש שבצעדי האחזור הם אמורים לחשוב רק על המשתנה שהוצג, ולא להעלות בזיכרונם אף משתנה אחר או להמשיך ולשנן את שאר המשתנים.

2.3.2 ניסוי 2 - מטלת אחזור משתנים עם חישוב

המטרה של ניסוי 2 היא להגדיל את העומס על הזיכרון הפעיל. המטלה היתה זהה לניסוי 1, בהבדל אחד: בכל אחד מ-3 צעדי האחזור המשתתפים התבקשו לא רק לאחזר את הערך של אחד המשתנים אלא גם לבצע עליו פרוצדורה חישובית - להוסיף או להפחית ערך מסוים. לשם כך, בכל צעד אחזור הוצג למשתתפים חישוב פשוט שמתבסס על אחד המשתנים, למשל $A+30$, והמשתתף אמר בקול את התוצאה. כל החישובים היו פעולות חיבור או חיסור, בהן האופרנד הראשון היה אחד המשתנים והאופרנד השני היה מספר חד ספרתי או מספר דו-ספרתי שלם. כל החישובים לא דרשו חציית עשרת.

² איסוף הנתונים והפיילוט בניסוי 1 הורץ כחלק מעבודת סמינר יחד עם זהר כהן ורוני מנחם.

2.4 ניתוח סטטיסטי

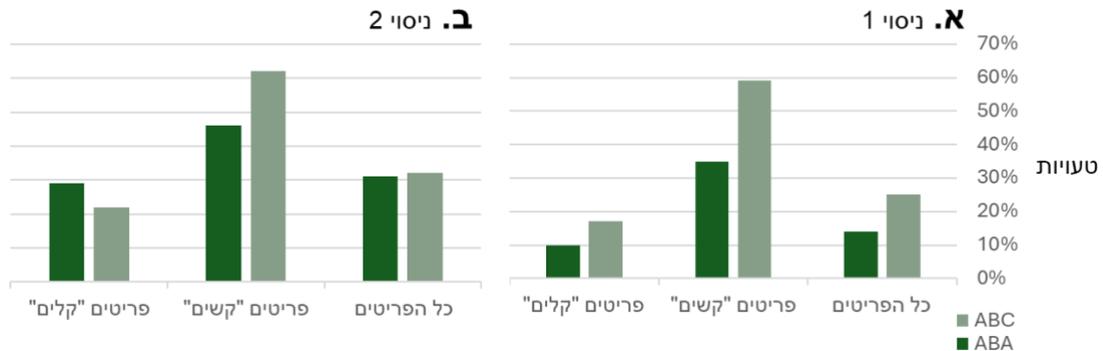
ניתוח הנתונים בוצע בעזרת (Linear Mixed Model) LMM. יחידת הניתוח היתה פריט, והמשתנה התלוי היה קיומה או אי-קיומה של טעות בצעד השלישי והקריטי. המשתתף היה גורם אקראי, והגורמים מפורטים בהמשך, לכל ניתוח בנפרד. כדי לבדוק את רמת המובהקות של גורם ספציפי השתמשנו ב-Likelihood ratio test, והשווינו את הנראות של המודל המלא לנראות של מודל מקביל, שהיה זהה למודל הקודם פרט לכך שהושמט ממנו הגורם הרלוונטי (מבחן חד-זנבי).

3. תוצאות

3.1 ניסוי 1 - ללא חישוב

כדי לבדוק את מנגנוני הזיכרון המעורבים במטלה, ערכנו השוואה של אחוזי הטעויות של הצעדים הקריטיים (הצעד השלישי בכל פריט) בין תנאי ABC לתנאי ABA. כאמור, בצעד הקריטי בתנאי ABC המשתתף מתבקש לאחזר משתנה שעוד לא נשאל עליו, ואילו בצעד הקריטי בתנאי ABA המשתתף מתבקש לאחזר משתנה שכבר נשאל עליו. אם במעבר בין הצעדים מתרחש תהליך של הסרת המידע מהצעד הקודם, והקושי של תהליך זה הוא מספיק משמעותי, נצפה לאחוז טעויות גבוה יותר בתנאי ABA, בו הפריט הקריטי כבר עבר תהליך של הסרה, מאשר בתנאי ABC, בו הפריט הקריטי לא עבר תהליך של הסרה - "אפקט מחיר החזרה". לעומת זאת, אם במעבר בין הצעדים מתרחשת הפרעה, כך שהאחוז של כל משתנה פוגע בייצוג של 2 המשתנים האחרים, וזהו הקושי המשמעותי במטלה, נצפה לאחוז טעויות גבוה יותר בתנאי ABC ("אפקט יתרון החזרה"), כיוון שבתנאי זה המשתנה בצעד הקריטי (C) "הופרע" פעמיים, ע"י כל אחד משני הצעדים הקודמים (A,B) בעוד שבתנאי ABA המשתנה בצעד הקריטי (A) "הופרע" רק פעם אחת, ע"י הצעד השני (B). אם שני האפקטים קיימים והשפעתם דומה, לא נראה הבדל בין התנאים.

הממצאים הראו אפקט של יתרון החזרה - אחוז הטעויות היה גבוה יותר בתנאי ABC מאשר בתנאי ABA (תרשים 2, העמודות הימניות). כדי לבדוק אם ההבדל הזה מובהק, ערכנו ניתוח LLMM (Logistic Linear Mixed Model) על הטעויות בצעד השלישי. הנבדק היה גורם אקראי, והתנאי (ABC / ABA) היה גורם תוך-נבדקי יחיד. אפקט התנאי היה מובהק ($\chi^2 = 40.7, p < .001$).



תרשים 2. אחוז הטעויות בצעד הקריטי (הצעד השלישי). הפריטים הקשים/קלים הם אלה בהם היתה/לא היתה טעות בצעד 2, בהתאמה. בפריטים הקלים בניסוי 2, שיעור הטעויות היה גבוה יותר בתנאי ABA מאשר בתנאי ABC. במצבים האחרים, הדפוס היה הפוך.

ממצאים אלה מראים שקיים תהליך שגורם לקושי גדול יותר בתנאי ABC מאשר בתנאי ABA, למשל תהליך של הפרעה, והשפעתו גדולה יותר מההשפעה האפשרית של תהליך הסרה. לגבי תהליך ההסרה, יש שתי אפשרויות: או שלא קיים תהליך הסרה, או שהוא קיים אבל השפעתו קטנה יותר מזו של התהליך הנגדי (הפרעה או אחר).

3.2 השפעת החישוב: ניסוי 2 לעומת ניסוי 1

בניסוי 2, שיעור הטעויות הכללי בצעד הקריטי (השלישי בכל פריט) היה גבוה יחסית (40%), והיה גבוה מניסוי 1 (20%, $unpaired\ t(53) = 4.16, one-tailed\ p < .001$) – ממצא לא מפתיע, כיוון שבניסוי 2 כל צעד דרש גם מניפולציה חישובית. בניגוד לניסוי 1, כאן לחלק מהמשתתפים היה שיעור טעויות גבוה במיוחד – דבר שמצביע על כך שהניסוי היה קשה מדי עבורם. לפיכך, הוצאנו מהניתוח 8 משתתפים ששיעור הטעויות שלהם בצעד השלישי היה גבוה במיוחד (מעל 50%).

כאמור, ההבדל הקריטי בין ניסוי 2 לניסוי 1 היה העובדה שכאן נוספה פרוצדורה חישובית בכל אחד מ-3 הצעדים בפריט. כלומר, בכל צעד המשתתפים מתבקשים לא רק לאחזר את הערך של אחד המשתנים (כמו בניסוי 1) אלא גם להוסיף לו או להפחית ממנו ערך מסוים. החישוב מגדיל את העומס על הזיכרון הפעיל, ולכן מגדיל את הסיכוי שכדי להתמודד עם העומס הזה המשתתפים יעבירו את המשתנים האחרים (אלה שלא שייכים לצעד הנוכחי) מה-RDA אל ה-ALTM. ספציפית, בין הצעד הראשון לצעד השני, משתנה A צפוי לעבור מ-RDA אל ALTM. אם המעבר הזה כולל תהליך של הסרה, הייצוג של A עלול להיפגע, ולכן נצפה לראות כאן אפקט משמעותי יותר של מנגנון ההסרה מאשר בניסוי 1. כלומר, נצפה שאפקט יתרון החזרה שראינו בניסוי 1 (יותר טעויות בתנאי ABC מאשר ABA) יצטמצם ואולי אפילו כיוונו יתהפך.

הממצאים איששו את ההשערה: אפקט יתרון החזרה אכן הצטמצם, ואחוז הטעויות בתנאי ABA היה גבוה רק באופן מזערי מתנאי ABC (הפרש של 1%, תרשים ב2, 2 העמודות הימניות). כדי לבדוק אם אפקט יתרון החזרה הצטמצם באופן מובהק בניסוי 2 בהשוואה לניסוי 1, הרצנו LLMM על הטעויות בצעד השלישי, עם המשתתף כגורם אקראי ועם 3 גורמים: התנאי (ABC/ABA) כגורם תוך-נבדקי, הניסוי (1 או 2) כגורם בין נבדקים, והאינטראקציה ביניהם. גורם האינטראקציה היה מובהק ($\chi^2 = 28.0, p = .001$). ממצאים אלה תואמים את זה שבניסוי 2 מנגנון ההסרה משפיע באופן משמעותי יותר מאשר בניסוי 1.

3.3 ניסוי 2 – ההבדל בין פריטים קלים לפריטים קשים

כעת עברנו לנתח את תוצאות ניסוי 2 בפני עצמו. התחלנו בניתוח זהה לזה שנערך בניסוי 1: השווינו בין התנאים באמצעות LLMM (Logistic Linear Mixed Model) על הטעויות בצעד השלישי. המשתתף היה גורם אקראי, והתנאי (ABA / ABC) היה גורם תוך-נבדקי יחיד. הניתוח אישש את הרושם הוויזואלי מתרשים ב2 (2 העמודות הימניות): אפקט התנאי לא היה מובהק ($\chi^2 = 0.24, p = .63$). הסבר אפשרי לממצא זה הוא שכפי ששיערנו, בניסוי 2 אכן פועלים שני אפקטים שונים בכיוונים מנוגדים. אפקט אחד הוא אפקט יתרון החזרה, שזיהינו כבר בניסוי 1. אפקט זה עשוי לנבוע למשל ממנגנון שיוצר הפרעה, והוא גורם לאחוז טעויות גבוה יותר בתנאי ABC. האפקט השני הוא אפקט מחיר החזרה, שנובע ממנגנון ההסרה וגורם לאחוז טעויות גבוה יותר בתנאי ABA. עצמתם של שני האפקטים דומה כך שהם מתאזנים ו"מבטלים" זה את זה, והתוצאה הסופית היא שאין הבדל בין התנאים.

כדי לבדוק את ההשערה הזאת, ניסינו להבחין בין הפריטים בהם אפקט יתרון החזרה היה משמעותי יותר לבין הפריטים בהם אפקט מחיר החזרה היה משמעותי יותר. כדי לבצע את ההפרדה הזאת, השתמשנו באחוז הטעויות בצעד השני בכל פריט. המידע הזה אינפורמטיבי כיוון שאפקט מחיר החזרה לא אמור להשפיע על הצעד השני, ולעומת זאת אפקט יתרון החזרה כן אמור להשפיע על הצעד השני. הסיבה לכך היא כלהלן. אם אפקט מחיר החזרה אכן נובע ממנגנון הסרה, הוא ישפיע רק על הצעד הקריטי (השלישי) כיוון שרק בצעד הזה המשתתפים התבקשו לאחזר משתנה שעבר הסרה. לעומת זאת, אם אפקט יתרון החזרה

אכן נובע ממנגנון שיוצר הפרעה, הוא משפיע לא רק על הצעד הקריטי אלא גם על צעדים אחרים: בכל צעד, ההפרעה משפיעה על כל המשתנים שלא מופיעים באותו צעד. ספציפית, האחזור בצעד הראשון פוגע גם במשתנה שיופיע בצעד השני.

אם ההנחות האלה נכונות, נצפה שבפריטים בהם לא היתה טעות בצעד השני, כלומר לא היתה השפעה משמעותית של המנגנון שיוצר הפרעה, ההשפעה של מנגנון ההסרה תהיה משמעותית יותר מזו של ההפרעה, ולכן נראה את אפקט מחיר החזרה, כלומר יותר טעויות בתנאי ABA. בפריטים בהם היתה טעות בצעד השני, כלומר היתה השפעה משמעותית של הפרעה, ההשפעה של מנגנון ההסרה תהיה קטנה יותר מזו של ההפרעה, ולכן נראה את אפקט יתרון החזרה, כלומר יותר טעויות בתנאי ABC.

הממצאים איששו את ההשערה הזאת (תרשים ב2). כדי לבדוק סטטיסטית אם קיומן של טעויות בצעד השני אכן השפיע על דפוס התוצאות בצעד השלישי, הרצנו LLMM על הטעויות בצעד השלישי, עם המשתתף כגורם אקראי, ועם 3 גורמים: התנאי (ABC/ABA) כגורם תוך-נבדקי, הצעד השני (טעות או לא טעות) כגורם בין נבדקים, והאינטראקציה ביניהם. בהתאמה להשערה, האינטראקציה הייתה מובהקת ($\chi^2 = 15.9, p = .001$). לא זאת בלבד, אלא גם כשבדקנו כל אחד משני האפקטים בנפרד - אפקט יתרון החזרה בפריטים עם טעות בצעד השני, ואפקט מחיר החזרה על הפריטים ללא טעות בצעד השני - כל אחד מהם היה מובהק (ובכיוונים הפוכים). ניתחנו את כל אחת משתי קבוצות הפריטים בנפרד באמצעות LLMM (Logistic Linear Mixed Model) על הטעויות בצעד השלישי. הנבדק היה גורם אקראי, והתנאי (ABA / ABC) היה גורם תוך-נבדקי יחיד. גורם התנאי היה מובהק גם בפריטים בהם היתה טעות בצעד השני ($\chi^2 = 9.0, p = .003$) וגם בפריטים בהם לא היתה טעות בצעד השני ($\chi^2 = 7.4, p = .006$). ממצאים אלה מהווים אינדיקציה נוספת לקיומו של מנגנון ההסרה.

וידאנו שהאינטראקציה הנ"ל קשורה ספציפית לטעויות בצעד הקריטי (השלישי). כשהרצנו את אותו LLMM, כשהפעם המשתנה התלוי היה הטעויות בצעד הראשון (ולא השלישי), האינטראקציה לא היתה מובהקת ($\chi^2 = 0.40, p = .52$). וידאנו גם שהממצאים יציבים ואינם ארטיפקט של החלטה מתודולוגית שרירותית שלנו. דפוס התוצאות בתרשים ב2, ואפקט האינטראקציה שתואר בפסקה הקודמת, נמצאו גם כשבדקנו את כל הנבדקים (כולל אלה עם אחוז טעויות כללי מעל 50%), וגם כשבדקנו רק את 10 הנבדקים הטובים ביותר (לא כולל נבדקת אחת שלא עשתה טעויות כלל).

אישוש נוסף להשערה לפיה קיימים שני אפקטים מנוגדים זה לזה, ובניסוי 2 השפעת ההסרה משמעותית יותר, מגיע מהשוואה שערךנו בין ניסוי 1 לניסוי 2, וכללה רק את הפריטים הקריטיים, כלומר אותם פריטים בהם המשתתפים לא טעו בצעד השני. כפי שראינו, בניסוי 2 בפריטים האלה ראינו אפקט מובהק של מחיר החזרה, בהתאמה לרעיון שהיתה פה השפעה משמעותית של מנגנון ההסרה. בניסוי 1, בפריטים האלה ראינו אפקט הפוך - יתרון החזרה (תרשים א2), בהתאמה לרעיון שהיתה פה השפעה משמעותית של מנגנון הפוך, למשל מנגנון שיוצר הפרעה. האפקט הזה היה מובהק בניתוח LLMM על הטעויות בצעד השלישי בשני התנאים כאשר המשתתפים ענו תשובה נכונה בצעד השני. הנבדק היה גורם אקראי והתנאי (ABA / ABC) היה גורם תוך-נבדקי ($\chi^2 = 17.0, p = .001$). כאשר השוונו ישירות את הפריטים הקריטיים (ללא טעות בצעד 2) בין ניסוי 1 לניסוי 2, ההבדל בין שני הניסויים היה מובהק: LLMM על הטעויות בצעד השלישי, עם המשתתף כגורם אקראי, התנאי (ABC/ABA) כגורם תוך-נבדקי, הניסוי (1 או 2) כגורם בין נבדקים, והאינטראקציה ביניהם, הראה אפקט מובהק של גורם האינטראקציה ($\chi^2 = 0.40, p = .52$).

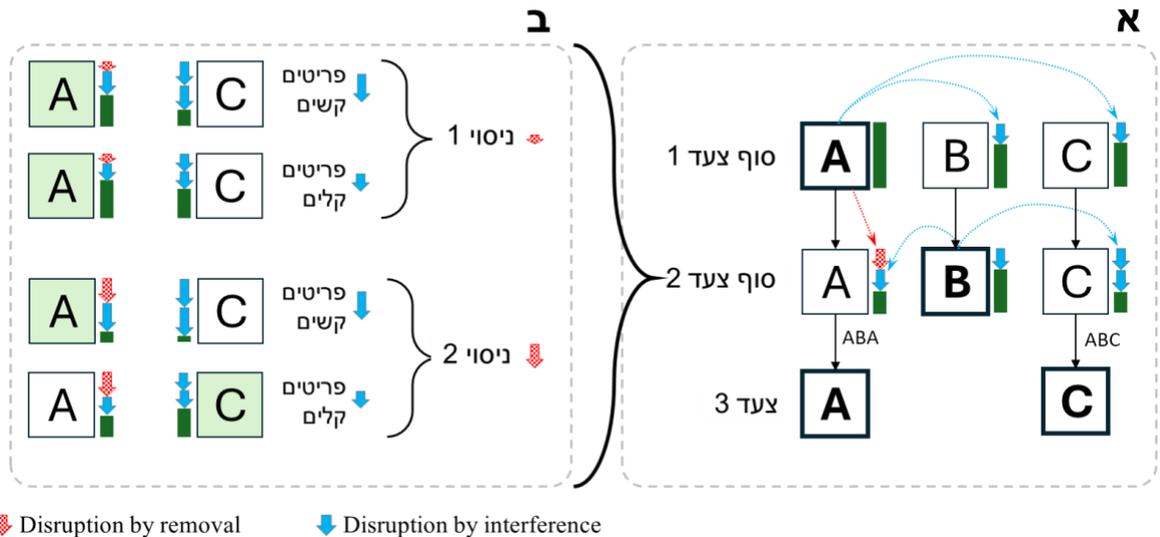
4. דיון

4.1 סיכום הממצאים ומסקנות

מטרות המחקר היו לבדוק את תפקידם של מנגנונים ספציפיים של זיכרון פעיל, כולל מנגנון ההסרה, בביצוע פרוצדורות חישוביות, ולספק עדות נוספת לקיומו של מנגנון זה בקרב אוכלוסייה טיפוסית (אנשים ללא לקויות למידה). לשם כך בדקנו את ביצועיהם של 30 משתתפים ללא לקויות למידה או הפרעת קשב. השתמשנו במטלה בה המשתתפים נדרשו לאחזר ערכים מהזיכרון לפי פרוצדורה נתונה, ללא חישוב (ניסוי 1) ועם חישוב (ניסוי 2). בצעדים הקריטיים, בתנאי ABC המשתתפים נדרשו לאחזר משתנה שטרם נשאלו עליו (אחזור ראשון) ואילו בתנאי ABA המשתתפים נדרשו לאחזר משתנה שכבר נשאלו עליו (אחזור שני).

הממצאים הראו שני אפקטים מנוגדים לגבי הצעד הקריטי, שכל אחד מהם בא לידי ביטוי במצבים שונים. האפקט הראשון היה אחוז טעויות גבוה יותר באחזור שני (תנאי ABA) לעומת אחזור ראשון (תנאי ABC) (אפקט יתרון החזרה). זה קרה בניסוי 2, ספציפית בפריטים בהם למשתתפים היה קל יותר (האינדיקציה לכך שהיה קל היתה שהם לא טעו בצעד השני, זה שקדם לצעד הקריטי). האפקט השני היה הפוך: אחוז טעויות גבוה יותר בצעד הקריטי בתנאי ABC לעומת תנאי ABA (אפקט מחיר החזרה). זה קרה בניסוי 2, ספציפית בפריטים בהם למשתתפים היה קשה יותר (טעו בצעד השני), ובכל הפריטים בניסוי 1.

המסקנה העיקרית מהממצאים שתוארו היא שקיימים שני מנגנונים שונים, שפועלים באופן שונה זה מזה, ויוצרים קושי במצבים שונים, ובניסוי שלנו הם משפיעים בכיוונים מנוגדים. מנגנון אחד גרם לקושי רב יותר בתנאי ABC מאשר בתנאי ABA. אנו מציעים שמדובר במנגנון שיוצר הפרעה, שפועל כך שבכל פעם שמעלים אקטיבציה של משתנה, זה מפריע לשני המשתתפים האחרים (תרשים 3א, חצים כחולים). המנגנון הזה יוצר קושי רב יותר ככל שחולפים יותר צעדים מהפעם האחרונה בה אותו משתנה אוחזר, כיוון שהייצוג של המשתנה נפגע בכל פעם שיש אחזור של משתנה אחר. במערך הניסוי שלנו, אם בצעד 3, הצעד הקריטי, המשתתפים אחזרו את המשתנה C (אחזור ראשון), מדובר במשתנה שכבר "הופרע" פעמיים, ע"י כל אחד משני הצעדים הקודמים (A,B). אבל אם הם מאחזרים את המשתנה A (אחזור שני) הוא "הופרע" רק פעם אחת, ע"י הצעד השני (B). לכן המנגנון הזה גורם לקושי גדול יותר בצעדי אחזור ראשון (תנאי ABC) לעומת צעדי אחזור שני (תנאי ABA) - אפקט יתרון החזרה (תרשים 3א). אותו מנגנון גם גרם, בחלק מהמקרים, לטעויות בצעד השני. משום כך, באותם פריטים בהם השפעת ההפרעה היתה גדולה יותר (למשל בגלל תנודות רגעיות אקראיות), היה סיכוי גדול יותר לטעות בצעד השני, ובהתאמה גם בצעד השלישי, הקריטי, בתנאי ABC. כלומר אפקט יתרון חזרה גדול יותר בפריטים ה"קלים". הסבר דומה ניתן להציע גם באמצעות מנגנונים אחרים, שאינם הפרעה; נדון בכך להלן, בפרק 4.3.



תרשים 3. (א) תיאור סכמטי של המצבים בהם יש השפעה מזיקה של הסרה (חצים אדומים) והפרעה (חצים כחולים) על ייצוג המשתנים. בכל פעם שיש אקטיבציה של משתנה, ההפרעה פוגעת בייצוג של המשתנים האחרים. בכל פעם שיש הסרה של משתנה (כשעוברים ממנו למשתנה אחר), ההסרה פוגעת בייצוג של אותו משתנה. (ב) העצמה היחסית של ההפרעה וההסרה במקרים השונים. ההשפעה המזיקה של ההסרה חזקה יותר בניסוי 2: בגלל דרישות הזיכרון הגבוהות בניסוי זה, הסיכוי להסרת משתנה מ-RDA אל ALTM בסיום הצעד (כדי לפנות מקום לחישובים הבאים) גבוה יותר מאשר בניסוי 1. רמת ההשפעה המזיקה של הפרעה משתנה באופן אקראי בפריטים השונים ("קשים" ו"קלים").

לעומת זאת, המנגנון השני פועל בצורה כזו כך שבכל פעם שמסירים משתנה מהזיכרון, ספציפית, מורידים את האקטיבציה של משתנה מה-RDA אל ה-ALTM, זה פוגע בייצוג של אותו משתנה בזיכרון. המנגנון הזה יוצר קושי במצבים בהם המשתתפים היו צריכים לאחזר משתנה שכבר נשאלו עליו קודם. במערך הניסוי שלנו, זה קרה בצעד השלישי בפריטי ABA, כאשר המשתתפים התבקשו לאחזר משתנה שכבר עבר תהליך של הורדת אקטיבציה מה-RDA אל ה-ALTM בצעד 1. כתוצאה מתהליך הורדת האקטיבציה (בסיום צעד 1) ייצוג המשתנה נפגע, ולכן בצעד השלישי והקריטי היה קושי רב יותר בצעדי אחזור שני (תנאי ABA) מאשר צעדי אחזור ראשון (תנאי ABC) - אפקט מחיר החזרה (תרשים 3א). הדרישה לבצע חישוב בניסוי 2 הגדילה את העומס על הזיכרון הפעיל, ובעקבות זאת את הסיכוי שמידע יוסר מה-RDA אל ה-ALTM כדי "לפנות מקום" לחישוב. בהתאמה, אכן בניסוי 2 ראינו השפעה גדולה יותר של מנגנון ההסרה.

השילוב של שני המנגנונים האלו מביא למצב שבסוף הצעד השני משתנה C הופרע פעמיים בשני הצעדים הקודמים, ולעומת זאת משתנה A הופרע פעם אחת בצעד 2 והוסר פעם אחת בצעד 1. במצב כזה, דפוס התוצאות בצעד השלישי, בו שאלנו או על משתנה A או על משתנה C, נקבע ע"י מי מהמצבים יותר קשה: אם שתי הפרעות פוגעות בייצוג של משתנה בזיכרון יותר מהפרעה אחת והסרה אחת, אז בתנאי ABC יהיו יותר טעויות. לעומת זאת, אם הפרעה והסרה פוגעות בזיכרון יותר משתי הפרעות, אז בתנאי ABA יהיו יותר טעויות. בפשטות, השאלה היא למי יש השפעה חזקה יותר - להפרעה הנוספת או להסרה הנוספת.

העוצמה היחסית של ההפרעה וההסרה נקבעה ע"י שני גורמים: הניסוי (1 או 2) וסוג הפריטים (קלים לעומת קשים). בניסוי 2 (לעומת 1) השפעת ההסרה גדולה יותר, כי הסיכוי להסרה היה גדול יותר בניסוי 2 מאשר בניסוי 1, והתוצאה היא קושי גדול יותר בתנאי ABA בניסוי 2. השפעת ההפרעה דומה בשני הניסויים, אבל יש בה תנודות אקראיות, כך שבפריטים "קלים" (לעומת קשים) יש קושי גדול יותר בתנאי

ABA - יש בהם פחות הפרעה מאשר בפריטים הקשים. קיומה של טעות בצעד 2 הוא מדד היוריסטי להיותו של פריט מסוים קל יותר או קשה יותר מבחינה זו. השילוב של 2 הגורמים גרם לכך שבפריטים הקלים בניסוי 2 היה את האפקט המצטבר של שני הגורמים האלה שפועלים "נגד" תנאי ABA, ובמצב הזה אחוז הטעויות בתנאי ABA היה גבוה יותר מתנאי ABC (תרשים 3, שורה תחתונה). בשאר המצבים, כשאחד הגורמים פעל "נגד" ABA ואחד נגד ABC (או ניסוי 2 או פריטים קלים אבל לא שניהם יחד), אחוז הטעויות היה גבוה יותר בתנאי ABC לעומת תנאי ABA (תרשים 3). גם כששניהם פעלו נגד ABC (בניסוי 1 בפריטים הקלים), אחוז הטעויות היה גבוה יותר בתנאי ABC, ובפער עוד יותר גדול.

4.2 מנגנון ההסרה

מחקרים רבים על זיכרון פעיל מתמקדים ביתרונות של תהליך ההסרה (Lewiss-Peacock et al., 2018; Ecker, Lewandowsky, et al., 2014; Ecker, Oberauer, et al., 2014). במחקר הנוכחי, הדגשנו דווקא את העלויות והמחירים הנלווים לתהליך ההסרה, והראינו שעלויות להיות טעויות בחישוב בעקבות תהליך ההסרה כיוון שהתהליך הזה מתבצע באופן לא אוטומטי.

4.2.1 באיזו רמת ייצוג בזיכרון מתרחשת ההסרה?

במודל הזיכרון הפעיל של Oberauer (2002) תוארו 3 רמות שונות של נגישות למידע המאוחסן ב-LTM. הראשון, ALTM (Activated part of Long-Term Memory), משמר את המידע שיהיה רלוונטי בשלבים הבאים של המשימה. השני, RDA (Region of Direct Access), מחזיק את הפריטים של השלב הנוכחי במשימה, שעליהם נרצה להפעיל תהליך קוגניטיבי מסוים. ה-RDA הוא הזיכרון הפעיל, והוא מוגבל בקיבולת הפריטים שהוא יכול להכיל (3-4). השלישי, FOA (Focus of Attention), מחזיק את הפריט הספציפי שעליו מתבצעת המניפולציה הקוגניטיבית הנוכחית. עולה השאלה בין אלו רמות מתרחשת ההסרה שאנחנו רואים את האפקט שלה במחקר הנוכחי - הסרה מ-FOA אל RDA או מ-RDA אל ALTM - והאם מדובר באותה הסרה בשני הניסויים.

הממצאים תומכים באפשרות השניה – כלומר, ההשפעה המזיקה של ההסרה היא בעיקר במעבר מ-RDA אל ALTM. בניסוי 1 המשתתפים נדרשו לזכור 3 משתנים ולשלוף בכל פעם אחד מהם ע"פ התנאים השונים. לעומת זאת, בניסוי 2 המשתתפים נדרשו לזכור 3 משתנים, לשלוף בכל פעם את אחד מהם ע"פ התנאים השונים ובנוסף בכל פעם גם לבצע חישוב על אותו משתנה. החישוב בניסוי 2 תפס מקום ב-RDA ולכן הגדיל את העומס על הזיכרון הפעיל בהשוואה לניסוי 1, ולכן הגדיל את הסיכוי של משתנה מסוים לעבור מ-RDA אל ALTM, ובהתאמה את הנזק שנגרם ע"י ההסרה. בניסוי 1 לא ראינו את אפקט ההסרה כלל; הסבר אפשרי לממצא זה הוא שהמשתנים בניסוי 1 כלל לא עברו תהליך הסרה מ-RDA אל ALTM. כלומר ה-RDA הצליח להכיל את שלושת המשתנים ובכל פעם להתמקד במשתנה אחר ע"י ה-FOA. אם התרחש תהליך של הסרה, אז הוא בא לידי ביטוי במעבר בין ה-FOA ל-RDA ולא היה תהליך הסרה מ-RDA ל-ALTM. כלומר, הסרה מ-FOA ל-RDA שונה מהסרה מ-RDA ל-ALTM, ונראה שהסרה מ-RDA ל-ALTM קשה יותר.

4.2.2 איך ומדוע בדיוק ההסרה פוגעת בזיכרון וכתוצאה מכך בחישוב?

מה בדיוק קורה בתהליך ההסרה שגורם לטעויות בחישוב? הסבר אחד אפשרי הוא שהייצוג של פריט נפגע כאשר הוא עובר מ-RDA ל-ALTM, אבל רק אם כבר קיימים פריטים אחרים ב-ALTM. בסוף צעד האתחול, בו המשתתפים ראו את שלושת המשתנים, מתרחשת הסרה מ-RDA ל-ALTM אבל ההסרה הזו לא פוגעת בייצוג הפריטים משום שה-ALTM עדיין ריק. לעומת זאת, ההסרה של משתנה A בסוף צעד

1, כאשר ב-ALTM כבר היו ערכים אחרים (B, C), כן פגעה בייצוג שלו. את הספציפיות של הקושי בהסרה, כלומר העובדה שהשפעתה המזיקה מתרחשת רק כאשר ה-ALTM "כבר מלא", אפשר להסביר למשל בתור קושי ב"קישור" הפריט בחזרה ל-ALTM. הקישור הזה הוא סוג של עדכון של ה-ALTM; אם כבר יש פריטים ב-ALTM, מדובר בעדכון חלקי של ה-ALTM. ייתכן שעדכון חלקי הוא קשה יותר כמו שהסרה חלקית קשה יותר (Kessler & Meiran, 2008).

הסבר שני הוא "הסרת יתר" של הפריטים. במקום שהפריט יחזור ל-ALTM הוא "זז" רחוק מדי, אל ה-LTM (ההסרה "חזקה" מדי), וכתוצאה מכך הייצוג שלו נהיה פחות זמין ונגרמות טעויות. כלומר, הקושי הוא לא להוריד את האקטיבציה של פריט מסוים, אלא להוריד את האקטיבציה שלו בצורה מתונה בלבד, כך שלא יגיע ל-LTM. אפשר לתאר את ההסבר הזה גם במונחים של הסרה קבועה לעומת זמנית. הסרה קבועה מתרחשת כשהמידע הופך ללא רלוונטי ומוסר מהזיכרון הפעיל לצמיתות, אך עדיין יכול להישאר בזיכרון לטווח ארוך (Ecker, Oberauer, et al., 2014; Williams et al., 2013). הסרה זמנית מתרחשת כשהמידע הופך ללא רלוונטי באופן זמני אך עדיין עובר מהזיכרון הפעיל אל LTM. הסרה זמנית מתרחשת כשהמידע הופך ללא רלוונטי באופן זמני אך עדיין נחוץ למשימה הנוכחית וניתן לשחזרו לצורך שימוש חוזר בהמשך – כלומר, המידע עובר מ-RDA אל ALTM (Ecker, Oberauer, et al., 2014). "הסרת יתר" היא למעשה ביצוע של הסרה קבועה במצב בו היה צריך לבצע הסרה זמנית.

הסבר שלישי מדגיש את זה שבניסוי 2, בסוף כל צעד יש להסיר מ-RDA לא ערך אחד אלא כמה ערכים: את ערך המשתנה, את הערך שהוספנו לו, ואת תוצאת החישוב. את הערך המוסף ואת התוצאה יש להסיר לחלוטין (ל-LTM), ואת ערך המשתנה יש להחזיר אל ה-ALTM. מצב זה נקרא "הסרה חלקית", כיוון שהיא פועלת רק על חלק מהפריטים (או ליתר דיוק: במקרה זה, פועלת על פריטים שונים באופן שונה). זאת בניגוד להסרה מלאה, שנעשית בצורת "מחיקה" של כל הזיכרון בבת אחת. הסרה חלקית, מהסוג שכנראה מתרחש כאן, היא איטית וקשה יותר מהסרה מלאה (Kessler & Meiran, 2008), וייתכן שזהו הקושי שאנחנו רואים כאן. ספציפית, כדי שתהליך ההסרה החלקית יתבצע במדויק צריך, בשלב ראשון, לתייג כל פריט – האם הוא מיועד להסרה זמנית או להסרה לצמיתות, ובשלב שני לבצע את ההסרות (Lewis-Peacock et al., 2018). הקושי שראינו כאן יכול להיות או בתיוג נכון של "יעד ההסרה" של כל אחד מהערכים, או בהסרה עצמה במצב בו היא לשני "יעדים" שונים.

4.2.3 השוואה למחקרים קודמים

במחקרים קודמים נבדקה תופעת ההסרה בהקשרים שונים. אף על פי שאין מחקרים רבים המראים הסרה בהקשר של חישוב, קיימים מחקרים שמדגימים הסרה במהלך ביצוע רצף פעולות (כמו אצלנו), למשל במחקר של Ecker ועמיתיו (2014). מאפיין חשוב של המחקר הנוכחי היא שההסרה נבדקה כאן בהקשר חישוב מתמטי אך עם זאת באופן מנותק מהקשר של ביצוע אלגוריתם מתמטי ידוע – בניגוד, למשל, לצבירן-גינת (2022), שבדקה הסרה בהקשר של אלגוריתם חיבור רב-ספרתי: אצלנו, סדרת החישובים לא נקבעה על ידי אלגוריתם ידוע מראש אלא הוצגה באופן מפורש. עם זאת, המטלה שלנו דומה לחישוב מתמטי "רגיל" בכך שיש רצף של פעולות חישוביות, ובכך המחקר הנוכחי תורם להבנת התהליכים המעורבים בחישוב. הראינו גם שבאופן לא מפתיע, ההוספה של דרישה לחשב במסגרת אחד הצעדים (בניסוי 2 לעומת ניסוי 1) מעמיסה על הזיכרון הפעיל ומגדילה את כמות ההסרות. מצב זה עשוי להתרחש גם במתמטיקה. למשל, אלגוריתם מתמטי של תרגילי חיבור וחיסור עם חציית עשרת קשה יותר לעומת תרגילי חיבור וחיסור ללא חציית עשרת (ניר, 2023). ייתכן שאחת הסיבות לכך שחציית עשרת קשה יותר היא משום שהיא יוצרת יותר עומס, דבר שמגדיל את כמות ההסרות הנדרשות.

4.3 המנגנון שעומד מאחורי הפרעה

ברוב המצבים, האחזור הראשון (ABC) של המשתנים היה קשה יותר מהאחזור השני (ABA). ההסבר שהצענו לכך היה הפרעה בין ייצוגי המשתנים בזיכרון: בכל פעם שהאקטיבציה של משתנה מסוים עלתה זה פגע במשתנים האחרים ונוצרה הפרעה. כתוצאה מכך, ככל שמשתנה נמצא ב-ALTM יותר צעדים – הייצוג שלו נפגע יותר.

מהו המנגנון הספציפי שגורם להפרעה? יש לכך כמה הסברים אפשריים. הסבר אחד הוא שהייצוגים השונים בזיכרון הפעיל מפריעים זה לזה. כאשר ישנם מספר פריטים בזיכרון הפעיל, הם יכולים "להתערבב" זה בזה, כלומר להקטין את רמת המובחנות בין הפריטים, וזה מקשה על שליפת כל פריט בנפרד. מודל זיכרון מתחרים זה בזה על העלאת האקטיבציה, כאשר ייחודיות הפריט ממלאת תפקיד מרכזי. זיכרונות ייחודיים הם יותר מבודדים בזיכרון (כלומר יש להם ייצוג ייחודי ומובחן), מה שמקל על שליפתם בהשוואה לזיכרונות דומים (Brown et al., 2007). ההפרעה בין הפריטים יכולה לקרות, למשל, בגלל חפיפה בין התכונות של הפריטים השונים (Oberauer & Lin, 2017).

הסבר שני מדגיש לא את נוכחות הפריטים בזיכרון הפעיל אלא את התהליך שמכניס אותם לזיכרון הפעיל. ההפרעה יכולה לקרות בגלל שהתהליכים הקוגניטיביים המעורבים בהעלאת האקטיבציה של פריט אחד מפריעים לתהליכים המעורבים בהעלאת האקטיבציה של פריט אחר (Lewis-Peacock et al., 2018; Oberauer et al., 2012). ייתכן והקושי הוא בניתוק סלקטיבי של פריט מה-ALTM וזה מה שיוצר את המחיר לפריטים האחרים ולמעשה יוצר הפרעה.

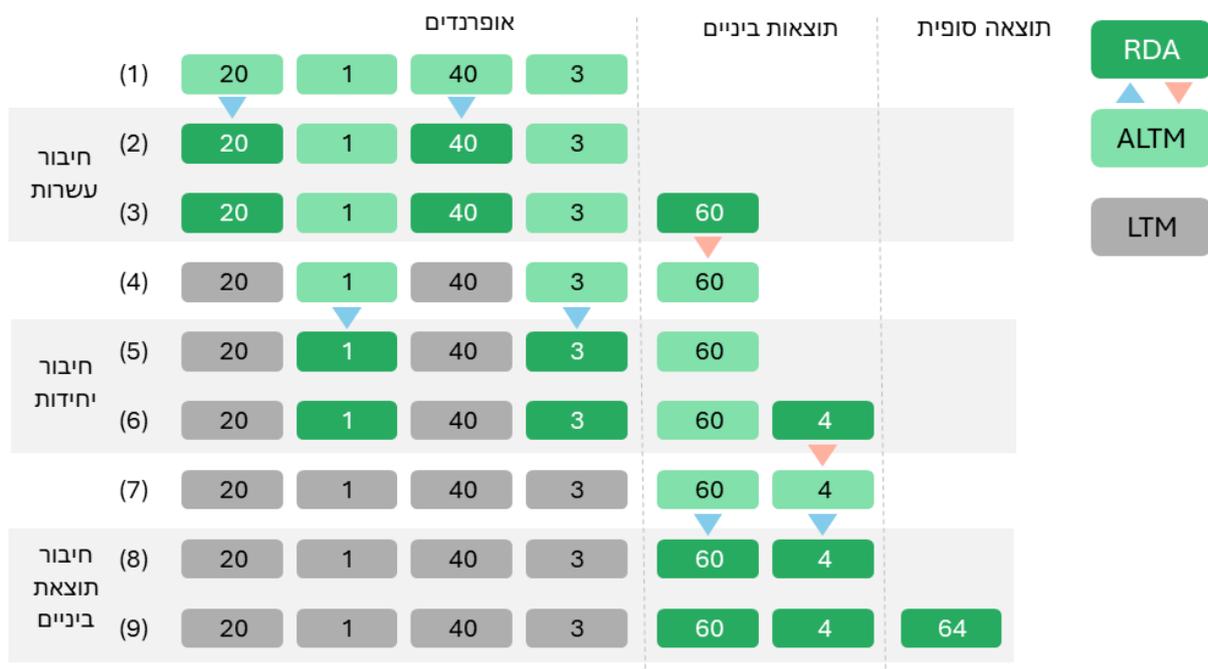
הסבר שלישי נעוץ בגישת הקצאת המשאבים, שטוענת שכדי לשמר מידע בזיכרון הפעיל, יש לנו כמות מוגבלת של משאבים, אותם אנו יכולים להקצות לפריטים שונים בזיכרון הפעיל. כל פריט בזיכרון הפעיל דורש חלק מהמשאבים הקוגניטיביים, ואפשר לחלק את המשאבים בין הפריטים באופן גמיש ורציף יחסית. כאשר מסירים פריט מהזיכרון הפעיל, המשאבים שהיו מוקצים לו משתחררים ויכולים להיות מוקצים מחדש לפריטים אחרים. ההקצאה מחדש של המשאבים משפרת את הזיכרון של הפריטים הנוותרים, מכיוון שכעת יש יותר משאבים זמינים עבורם (Adam et al., 2017; Schneegans & Bays, 2017; Sewell et al., 2014; Smith et al., 2016). RDA ו-ALTM מתחרים על אותם המשאבים, התוצאה היא שבכל פעם שרמת האקטיבציה של פריט מסוים עולה כשהוא עובר מ-ALTM ל-RDA, הוא תופס חלק גדול יותר מהמשאבים, ובהכרח זה בא על חשבון הפריטים האחרים שנשארו ב-ALTM. הרעיון ש-ALTM ו-RDA מתחרים על משאבים משותפים נתמך ע"י עבודתה של ניר (2023): היא הראתה שרמת התפקוד משתפרת בהתאמה לכמות המידע שנמצא ב-RDA ו-ALTM יחדיו.

לבסוף, הסבר רביעי לאפקט יתרון החזרה לא מתייחס כלל להפרעה, אלא רואה את האפקט כסוג של testing effect - התופעה בה הייצוג של מידע מתחזק אחרי שאנו נדרשים לשלוף אותו (Roediger & Karpicke, 2006). כאשר המשתתפים מתבקשים להתמודד עם משתנה שכבר נשאלו עליו (תנאי ABA), הדבר מקל עליהם משום שאותו משתנה עבר כבר תהליך של חיפוש ושליפה.

4.4 משמעויות לגבי מתמטיקה

ממצאי המחקר נושאים משמעויות אפשריות לגבי האופן בו אנחנו מבצעים פרוצדורות אריתמטיות מנטליות. כדי להדגים את המשמעויות האלה, נבחן אלגוריתם אריתמטי פשוט: חיבור דו-ספרתי בעל-פה. תרשים 4 מתאר את תהליך החישוב בעל-פה עפ"י המודל של Oberauer (2002) עבור התרגיל $21+43$, בהנחה שאסטרטגיית החישוב היא לחבר את שתי ספרות העשרות ($20+40=60$), אח"כ לחבר את שתי ספרות היחידות ($1+3=4$), ולבסוף למוזג את סכום העשרות וסכום היחידות לתוצאה הסופית ($60+4=64$). הרעיון הכללי הוא שבכל פעם שמבצעים חישוב ספציפי (למשל חיבור של העשרות או של היחידות), משתנה האקטיבציה של האופרנדים שדרושים לאותו חישוב (שתי מילות העשרות או שתי מילות היחידות) והם למעשה "עוברים" אל ה-RDA.

ספציפית, אנו מציעים שחישוב התרגיל $21+43$ פועל באופן הבא. ראשית, אחרי ששמענו את התרגיל, כל הספרות/מילות המספר של התרגיל (האופרנדים) – כלומר 3, 40, 1, 20 – עוברות הסרה מלאה מ-RDA אל ה-ALTM (שורה 1 בתרשים 4). כדי לחבר את העשרות, המילים 20 ו-40 יועברו ל-RDA, ושם תבצע פעולת החיבור (שורות 2-3). לאחר מכן, המילים 20 ו-40 יוסרו מה-RDA ל-LTM משום שאנו לא זקוקים להם יותר בחישוב התרגיל. תוצאת הביניים (60), לה נזדקק בהמשך, תעבור מ-RDA אל ה-ALTM (שורה 4) כדי לפנות את ה-RDA לטובת שלב החישוב הבא. כלומר, יש פה הסרה חלקית/סלקטיבית, כאשר האופרנדים (20, 40) עוברים הסרה לצמיתות ותוצאת הביניים (60) עוברת הסרה זמנית. חישוב היחידות מתבצע באופן דומה לחישוב העשרות (שורות 5-6). לבסוף, לאחר שחישבנו את סכום העשרות והיחידות (תוצאות הביניים 4, 60), תוצאות הביניים יועברו מ-ALTM אל ה-RDA ויחוברו לתוצאה סופית.



תרשים 4. השלבים בתהליך החישוב על פי מודל הזיכרון הפעיל של Oberauer (2002). החצים מציינים את מעברי המידע בין RDA ל-ALTM (כחול = העברה מ-RDA ל-ALTM, אדום = הסרה מ-RDA אל ALTM).

התיאור הנ"ל נתמך ע"י מחקרים בנושא זה (שני, 2020; צבירן-גינת, 2022; ניר, 2023). המחקר של ניר (2023) הראה שקיימת הסרה מה-RDA ל-LTM בסוף שלב חישוב, והיא מפחיתה את העומס על הזיכרון הפעיל. כלומר, מחקר זה הראה את התועלת של מנגנון ההסרה. המחקרים הניורופסיכולוגיים של שני (2020) וצבירן-גינת (2022) בחנו בפירוט את דפוסי הטעויות ומקורן אצל משתתפים עם לקות למידה שפוגעת בביצוע אלגוריתמים – ספציפית, תרגילי חיבור רב-ספרתי בעל-פה. החוקרות מצאו דיסוציאציה בין זכירת פריטי מידע מסוגים שונים: המשתתפים ביצעו כמות קטנה יחסית של טעויות באמירת האופרנדים כאשר חזרו עליהם לצורך החישוב, ויותר טעויות באמירת תוצאות הביניים שחושבו בשלב קודם כאשר הם חזרו עליהן לצורך מיוזגן לתוצאה סופית. החוקרות הסבירו את הדיסוציאציה הזאת בתור קושי סלקטיבי בהסרה חלקית וזמנית של מידע בזיכרון הפעיל, כלומר קושי בהעברת מידע מה-RDA אל ה-ALTM. קושי במעבר זה יבוא לידי ביטוי ב"פריטים משוחזרים" – כל פריט מידע שהיה ב-RDA, הוסר אל ה-ALTM בהסרה חלקית, ועכשיו נדרש בו שימוש נוסף (אותם מצבים שכאן קראנו להם "אחזור שני"). החוקרות הציעו שליקוי בתהליך ההסרה יפגע בפריטים משוחזרים בשלב השחזור: הליקוי יפגע בייצוג הפריט בזמן ההסרה, וזה יגרום לטעויות באחזורים הבאים של פריט זה. בחישובים הספציפיים שנבדקו במחקרים הנ"ל, שהיו תרגילי חיבור דומים לזה שתואר בתרשים 4, הפריטים המשוחזרים – אלה שהוסרו מ-RDA אל ALTM ובהמשך היה בהם שימוש – היו רק תוצאות הביניים (החצים האדומים בתרשים 4 מראים את נקודות ההסרה הקריטיות). האופרנדים מעולם לא עברו מצב של שחזור (הסרה ל-ALTM ואז אחזור נוסף), לכן היו בהם פחות טעויות. אכן, כאשר צבירן-גינת (2022) יצרה מטלה דומה בה גם האופרנדים עברו הסרה ואז שחזור (המשתתפים התבקשו לחזור על האופרנדים בסיום החישוב), גם באופרנדים היו טעויות רבות.

נקודה מעניינת היא שהקושי של המשתתפים במחקר של צבירן-גינת (2022) השפיע על תהליך ההסרה החלקית (החצים האדומים בתרשים 4) אבל לא על הסרה מלאה. בזמן שמיעת התרגיל, יש להניח שכל הפריטים נכנסו ל-RDA ואחרי זה עברו הסרה מלאה אל ה-ALTM לקראת תחילת החישוב (שורה 1 בתרשים 4). אילו למשתתפים היה קושי בהסרה מלאה, היינו מצפים שהם יעשו טעויות בכל הפריטים, כולל האופרנדים; בפועל, זה לא היה המצב. כלומר הקושי היה ספציפית בתהליך של הסרת מידע חלקית מ-RDA אל ALTM.

המחקר הנוכחי מחזק את המסקנות של המחקרים הנ"ל לגבי הקושי הסלקטיבי בתהליך הסרת מידע מה-RDA אל ה-ALTM. הראינו שההשפעה המזיקה של הסרה היא בעיקר במעבר פריטים מה-RDA ל-ALTM, ספציפית במצב של הסרה חלקית וכאשר כבר קיימים פריטים אחרים ב-ALTM. ממצא זה מקביל לגמרי לתופעה שצבירן-גינת (2022) תיארה. מסקנה סבירה מהדמיון בין ממצאי שני המחקרים היא שבשתי האוכלוסיות – המשתתפים עם לקויות אצל צבירן-גינת, והמשתתפים ללא לקויות במחקר שלנו – מתרחש תהליך הסרה דומה, ואצל שתי האוכלוסיות הוא יוצר קושי. ההבדל בין המשתתפים של צבירן-גינת לשלנו הוא לא תהליכים שונים איכותית, אלא אולי שאצלם הקושי שנגרם כתוצאה מההסרה גדול יותר – בין אם בגלל ליקוי בהסרה או בגלל ליקוי אחר שמגדיל את העומס ומעצים את הקושי הטבעי. מסקנה זו חשובה משום שעשויות להיות לה השלכות לגבי תהליך האבחון: אם הקושי בהסרה הוא לא תופעה שונה מבחינה איכותית, אלא הקצה של רצף טבעי, זה עלול להקשות על האבחון של קושי כזה.

ראינו כאן שבכל פעם שיש אקטיבציה של פריט מסוים בזיכרון, נוצרת הפרעה. באלגוריתם המתואר בתרשים 4, אפשר לשער שהפרעה כזאת מתרחשת בכל פעם שזוג אופרנדים עובר מ-ALTM ל-RDA, ואולי גם בכל פעם שה-FOA מתמקד באחד האופרנדים. מחקרים עתידיים יוכלו לבדוק את ההשערות האלה כדי

להעמיק את ההבנה של המנגנון שיוצר הפרעה ושל התהליכים הקוגניטיביים המעורבים בו. הבנה זו עשויה לאפשר פיתוח כלי אבחון מדויקים יותר שיכולים לזהות ליקויים ספציפיים.

4.5 השלכות פרקטיות לשטח

היכולת לתפעל מידע בזיכרון הפעיל חשובה ביותר לתפקוד הקוגניטיבי האפקטיבי שלנו (Gathercole, 1999). הזיכרון הפעיל נחשב למרכיב חיוני מבחינה אקדמית, שכן הוא מאפשר לתלמידים לאחסן ולעבד מידע באופן זמני בזמן ביצוע משימות קוגניטיביות מורכבות. קיים קשר מובהק בין יכולות הזיכרון הפעיל לבין הצלחה אקדמית ולבין מדדי אינטליגנציה (Oberauer et al., 2005), ותלמידים עם בעיות בזיכרון פעיל עשויים להתקל בקשיים במהלך הלמידה (Gathercole & Packiam Alloway, 2008).

למחקר הנוכחי עשויות להיות השלכות לגבי הוראה, אבחון וטיפול בלקויות למידה בתחום הזיכרון בכלל ובמתמטיקה בפרט. מחקרים הראו שאימון זיכרון פעיל יכול להביא לשיפור בביצוע משימות (Melby-Lervåg & Hulme, 2013). המחקר הנוכחי מציע כי בחלק מהמקרים הקושי לא בהכרח נובע מקושי בסיסי בתחום המתמטי אלא מקושי במנגנון כללי יותר – זיכרון פעיל. לא זאת בלבד, אלא שהזיכרון הפעיל כולל כמה תתי מנגנונים, מהם יכול לנבוע קושי ספציפי וממוקד יותר – ספציפית, מנגנון ההסרה והמנגנון שיוצר הפרעה. הבנה של מנגנוני הזיכרון האלה, ופיתוח כלים שמסוגלים לאבחן באופן מדויק את רמת התפקוד שלהם, עשויים לאפשר לזהות מוקדי קושי ספציפיים ולהתאים את דרך האימון והטיפול לכל אדם. שאלה מעניינת היא האם ניתן לאמן ספציפית את אותו תהליך של הסרה חלקית (סלקטיבית), שגורמת לקושי וטעויות בחישוב.

המחקר הנוכחי מצטרף לשורת מחקרים קודמים בכך שהוא מראה את ההשפעה של הפרעה בזיכרון (Oberauer & Lin, 2017; Brown et al., 2007). כאן, הראינו אותה במצבים ספציפיים באלגוריתם חישובי. מודל SIMPLE מציע דרכים לשפר את תפקוד הזיכרון על ידי הפחתת ההשפעה של הפרעה. אפשרות אחת היא לצמצם את הדמיון בין עקבות זיכרון על ידי יצירת שונות בין הפריטים – למשל, הצגת משתנים בצבעים, גדלים ומיקומים שונים (Brown et al., 2007). זוהי הצעה פדגוגית מעשית כיוון שבזמן למידה ניתן להרבות בטכניקות כמו שימוש בצבעים שונים או חלוקה לקבוצות שיכולות לסייע בצמצום ההפרעות (Oberauer & Lin, 2017). אכן, הפחתת הדמיון בין פריטים נמצאה כאפקטיבית גם בתחום המתמטי, כטכניקה שמסייעת ללמידת לוח הכפל (Dotan & Zviran-Ginat, 2022), אם כי במחקר ההוא לא היה מדובר על פרוצדורות חישוביות אלא על עובדות יסוד, ולא על תפעול הדמיון בזיכרון הפעיל אלא בזיכרון לטווח ארוך.

4.6 סיכום

יש חשיבות רבה לזיכרון הפעיל בכל תחומי החיים. הזיכרון הפעיל משמש אותנו בביצוע פעולות יום-יומיות כמו קריאה, הבנה, פתרון בעיות ותכנון (Gathercole & Packiam Alloway, 2008). כמו כן, תהליך החישוב הוא תהליך מורכב וישנה חשיבות רבה להבנה מעמיקה יותר של המנגנונים הקוגניטיביים העומדים בבסיסו משום שקשיים בו עשויים לנבוע ולבוא לידי ביטוי בדרכים שונות. המחקר הנוכחי מדגיש את החשיבות של הבנת המורכבות של מנגנון הזיכרון הפעיל – באופן כללי ולגבי חישוב בפרט. המחקר גם מעמיק בתפקידם של המנגנונים הקוגניטיביים ששותפים לתהליך, ספציפית מנגנון ההסרה והמנגנון שעומד מאחורי הפרעה, מראה את השפעתם השונה, ומסביר כיצד הם יוצרים קושי בחישוב. המחקר מציף שאלות פתוחות

מעניינות, שניתן יהיה לברר במחקרי המשך. לדוגמה, איזה מנגנון בדיוק פוגע בפריט שעבר הסרה, ומהו המנגנון הספציפי שגורם להפרעה.

למרות שהמחקר לא בדק ישירות את ההיבטים הפדגוגיים של זיכרון פעיל, מסקנותיו עשויות לסייע לקדם פיתוח של אסטרטגיות למידה חדשות לאבחון ולטיפול, המבוססות על מנגנונים קוגניטיביים שונים. ההבנה של המנגנונים הקוגניטיביים המובילים לטעויות בחישוב מאפשרת להתאים בצורה מיטבית אסטרטגיות למידה, שיטות הוראה והיבחנות לקשיים ולחוזקות של התלמידים. כדי לזהות את המנגנון הקוגניטיבי שבבסיסו עומד הקושי הספציפי של התלמיד, יש צורך במטלות אבחון מדויקות יותר וכך לתת מענה טיפולי נכון ומדויק יותר.

ביבליוגרפיה

- דותן, ד. (2022). סוללת חל"ב – חישובי ליבה בסיסיים. אוניברסיטת תל אביב.
- ניר, ש' (2023). איך מבצעים חציית עשרת, למה זה כל כך קשה, ומה אפשר ללמוד מכך על אלגוריתמים? (עבודת גמר לקבלת תואר מוסמך אוניברסיטה (A.M). אוניברסיטת תל אביב: תל אביב.
- פרידמן, א. ג. ונעמה. (2008). פריגבי-סוללה לאבחון זיכרון עבודה פונולוגי. 1990, 2–5.
- צבירן גינת, ש' (2022). איך טעויות חישוב קשורות לזיכרון העבודה שלנו? (עבודת גמר לקבלת תואר מוסמך אוניברסיטה (A.M). אוניברסיטת תל אביב: תל אביב.
- שני, ש' (2020). איך אנו מבצעים פרוצדורות חישוביות ולמה לחלקנו זה קשה? (עבודת גמר לקבלת תואר מוסמך אוניברסיטה (A.M). אוניברסיטת תל אביב: תל אביב.
- Adam, K. C. S., Vogel, E. K., & Awh, E. (2017). Clear evidence for item limits in visual working memory. *Cognitive Psychology*, *97*, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2017.07.001>
- 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)
- Barbarese, W. J., Katusic, S. K., Colligan, R. C., Weaver, A. L., & Jacobsen, S. J. (2005). Math Learning Disorder: Incidence in a Population-Based Birth Cohort, 1976–82, Rochester, Minn. *Ambulatory Pediatrics*, *5*(5), 281–289. <https://doi.org/10.1367/A04-209R.1>
- Berch, D. B., & Mazzocco, M. M. M. (2007). *Why is math so hard for some children?: The nature and origins of mathematical learning difficulties and disabilities*. Paul H. Brookes Pub. Co.
- Brown, G. D. A., Neath, I., & Chater, N. (2007). A temporal ratio model of memory. *Psychological Review*, *114*(3), 539–576. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.3.539>
- Campbell, J. I. D. (2005). *Handbook of Mathematical Cognition*. Psychology Press.
- Cappelletti, M., Butterworth, B., & Kopelman, M. (2001). Spared numerical abilities in a case of semantic dementia. *Neuropsychologia*, *39*(11), 1224–1239. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00035-5](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00035-5)
- Cappelletti, M., Kopelman, M. D., Morton, J., & Butterworth, B. (2005). Dissociations in numerical abilities revealed by progressive cognitive decline in a patient with semantic dementia. *Cognitive Neuropsychology*, *22*(7), 771–793. <https://doi.org/10.1080/02643290442000293>
- 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)
- Cragg, L., & Gilmore, C. (2014). Skills underlying mathematics: The role of executive function in the development of mathematics proficiency. *Trends in Neuroscience and Education*, *3*(2), 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.12.001>
- DeStefano, D., & LeFevre, J. (2004). The role of working memory in mental arithmetic. *European Journal of Cognitive Psychology*, *16*(3), 353–386. <https://doi.org/10.1080/09541440244000328>
- Dotan, D., & Zviran-Ginat, S. (2022). Elementary math in elementary school: The effect of interference on learning the multiplication table. *Cognitive Research: Principles and Implications*, *7*(1), 101. <https://doi.org/10.1186/s41235-022-00451-0>
- Durstewitz, D., Seamans, J. K., & Sejnowski, T. J. (2000). Neurocomputational models of working memory. *Nature Neuroscience*, *3*(11), Article 11. <https://doi.org/10.1038/81460>
- Ecker, U. K. H., Lewandowsky, S., & Oberauer, K. (2014). Removal of information from working memory: A specific updating process. *Journal of Memory and Language*, *74*, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2013.09.003>
- Ecker, U. K. H., Oberauer, K., & Lewandowsky, S. (2014). Working memory updating involves item-specific removal. *Journal of Memory and Language*, *74*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2014.03.006>
- Fletcher, J. M., Lyon, G. R., Fuchs, L. S., & Barnes, M. A. (2018). *Learning Disabilities: From Identification to Intervention*. Guilford Publications.
- Friedman, L. M., Rapport, M. D., Orban, S. A., Eckrich, S. J., & Calub, C. A. (2018). Applied Problem Solving in Children with ADHD: The Mediating Roles of Working Memory and Mathematical Calculation. *Journal of Abnormal Child Psychology*, *46*(3), 491–504. <https://doi.org/10.1007/s10802-017-0312-7>
- Gathercole, S. E. (1999). Cognitive approaches to the development of short-term memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *3*(11), 410–419. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(99\)01388-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01388-1)
- Gathercole, S., & Packiam Alloway, T. (2008). *Working Memory and Learning: A Practical Guide for Teachers*. 1–144.

- Hittmair-Delazer, M., Sailer, U., & Benke, Th. (1995). Impaired Arithmetic Facts But Intact Conceptual Knowledge a Single—Case Study of Dyscalculia. *Cortex*, *31*(1), 139–147. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(13\)80112-8](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(13)80112-8)
- Hoyles, C., Wolf, A., Molyneux-Hodgson, S., & Kent, P. (2002). *Mathematical Skills in the Workplace*.
- Karagiannakis, G., Baccaglini-Frank, A., & Papadatos, Y. (2014). Mathematical learning difficulties subtypes classification. *Frontiers in Human Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00057>
- Kessler, Y., & Meiran, N. (2008). Two dissociable updating processes in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *34*, 1339–1348. <https://doi.org/10.1037/a0013078>
- Lanfranchi, S., Lucangeli, D., Jerman, O., & Lee, S. H. (2008). Math disabilities: Italian and U.S. perspectives. In T. E. Scruggs & M. A. Mastropieri (Eds.), *Personnel Preparation* (Vol. 21, pp. 277–308). Emerald Group Publishing Limited. [https://doi.org/10.1016/S0735-004X\(08\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0735-004X(08)00011-6)
- Lewis-Peacock, J. A., Kessler, Y., & Oberauer, K. (2018). The removal of information from working memory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1424*(1), 33–44. <https://doi.org/10.1111/nyas.13714>
- Lintz, E. N., & Johnson, M. R. (2021). Refreshing and removing items in working memory: Different approaches to equivalent processes? *Cognition*, *211*. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104655>
- Mazzocco, M. M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Impaired Acuity of the Approximate Number System Underlies Mathematical Learning Disability (Dyscalculia). *Child Development*, *82*(4), 1224–1237. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01608.x>
- Melby-Lervåg, M., & Hulme, C. (2013). Is working memory training effective? A meta-analytic review. *Developmental Psychology*, *49*(2), 270–291. <https://doi.org/10.1037/a0028228>
- Morris, N., & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: The role of the central executive. *British Journal of Psychology*, *81*, 111–121. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1990.tb02349.x>
- Muter, P. (1980). Very rapid forgetting. *Memory & Cognition*, *8*(2), 174–179. <https://doi.org/10.3758/BF03213420>
- Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: Exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *28*(3), 411. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.28.3.411>
- Oberauer, K., Lewandowsky, S., Farrell, S., Jarrold, C., & Greaves, M. (2012). Modeling working memory: An interference model of complex span. *Psychonomic Bulletin & Review*, *19*(5), 779–819. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0272-4>
- Oberauer, K., & Lin, H.-Y. (2017). An interference model of visual working memory. *Psychological Review*, *124*(1), 21–59. <https://doi.org/10.1037/rev0000044>
- Oberauer, K., Schulze, R., Wilhelm, O., & Süß, H.-M. (2005). Working Memory and Intelligence--Their Correlation and Their Relation: Comment on Ackerman, Beier, and Boyle (2005). *Psychological Bulletin*, *131*(1), 61–65. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.1.61>
- O'Reilly, R. C., Braver, T. S., & Cohen, J. D. (1999). A Biologically Based Computational Model of Working Memory. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of Working Memory* (1st ed., pp. 375–411). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174909.014>
- Parsons, S., & Bynner, J. (1997). Numeracy and employment. *Education + Training*, *39*(2), 43–51. <https://doi.org/10.1108/00400919710164125>
- Peng, P., Namkung, J., Barnes, M., & Sun, C. (2016). A meta-analysis of mathematics and working memory: Moderating effects of working memory domain, type of mathematics skill, and sample characteristics. *Journal of Educational Psychology*, *108*, 455–473. <https://doi.org/10.1037/edu0000079>
- Performance, I. S. on A. and. (2000). *Control of Cognitive Processes: Attention and Performance XVIII*. MIT Press.
- Rivera-Batiz, F. L. (1992). Quantitative Literacy and the Likelihood of Employment among Young Adults in the United States. *The Journal of Human Resources*, *27*(2), 313–328. <https://doi.org/10.2307/145737>
- Roediger, H. L., & Karpicke, J. D. (2006). The Power of Testing Memory: Basic Research and Implications for Educational Practice. *Perspectives on Psychological Science*, *1*(3), 181–210.
- Schneegans, S., & Bays, P. M. (2017). Neural Architecture for Feature Binding in Visual Working Memory. *Journal of Neuroscience*, *37*(14), 3913–3925. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3493-16.2017>

- Semenza, C., Miceli, L., & Girelli, L. (1997). A Deficit for Arithmetical Procedures: Lack of Knowledge or Lack of Monitoring? *Cortex*, *33*(3), 483–498. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70231-4](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70231-4)
- Sewell, D. K., Lilburn, S. D., & Smith, P. L. (2014). An information capacity limitation of visual short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *40*(6), 2214–2242. <https://doi.org/10.1037/a0037744>
- Smith, P. L., Lilburn, S. D., Corbett, E. A., Sewell, D. K., & Kyllingsbæk, S. (2016). The attention-weighted sample-size model of visual short-term memory: Attention capture predicts resource allocation and memory load. *Cognitive Psychology*, *89*, 71–105. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2016.07.002>
- Swanson, H. L., & Beebe-Frankenberger, M. (2004). The Relationship Between Working Memory and Mathematical Problem Solving in Children at Risk and Not at Risk for Serious Math Difficulties. *Journal of Educational Psychology*, *96*(3), 471. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.3.471>
- Temple, C. M. (1991). Procedural Dyscalculia and Number Fact Dyscalculia: Double Dissociation in Developmental Dyscalculia. *Cognitive Neuropsychology*, *8*(2), 155–176. <https://doi.org/10.1080/02643299108253370>
- Williams, M., Hong, S. W., Kang, M.-S., Carlisle, N. B., & Woodman, G. F. (2013). The benefit of forgetting. *Psychonomic Bulletin & Review*, *20*(2), 348–355. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0354-3>
- Williams, M., & Woodman, G. F. (2012). Directed forgetting and directed remembering in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *38*, 1206–1220. <https://doi.org/10.1037/a0027389>

נספחים

נספח א' - מחקר נוירופסיכולוגי

תחום לקויות הלמידה במתמטיקה הוא תחום מעניין שנחקר רבות בפסיכולוגיה הקוגניטיבית, אך קיימת חוסר הסכמה על הגדרתו, הקריטריונים והשכיחות שלו. תלמידים עם קשיים ביכולות קוגניטיביות שונות עלולים להתמודד עם קשיים שונים במתמטיקה (Karagiannakis et al., 2014). בסביבות 6-14% מהילדים בגיל בית הספר מתקשים במתמטיקה למרות משאבי למידה נאותים והצלחה במקצועות אחרים (Barbaresi et al., 2005). קשיים אלו יכולים לבוא לידי ביטוי במגוון מיומנויות מתמטיות, כולל פתרון בעיות חישוב ותחומים מתמטיים נוספים (Campbell, 2005; Fletcher et al., 2018; Lanfranchi et al., 2008). לקשיים אלה יש השפעות ארוכות טווח בהיבטים שונים של החיים – הצלחה בעבודה, קבלת החלטות פיננסיות, רווחה כלכלית, ופעילויות חברתיות (Berch & Mazzocco, 2007; Hoyles et al., 2002; Parsons & Bynner, 1997; Rivera-Batiz, 1992).

כפי שתואר בדיון, צבירן-גינת (2022) שיערה שאחת הסיבות לקושי בחישוב היא ליקוי סלקטיבי בתהליך ההסרה. כדי לבדוק את ההשערה שלה, בדקנו 2 מהמשתתפים במחקר שלה, עם קושי בחישוב. אם הקושי שלהם נובע מליקוי במנגנון ההסרה, כפי שצבירן-גינת טענה, נצפה שההשפעה של ההסרה (אפקט מחיר החזרה), כפי שתוארה בניסוי 2, תהיה גדולה יותר אצל שני המשתתפים האלה מאשר אצל המשתתפים בניסוי 2, שכלל הידוע לנו הם בעלי תפקוד קוגניטיבי תקין.

שיטה

בדקנו שני משתתפים בגיל 29 ו-26 שהשתתפו במחקר של צבירן-גינת (2022). המשתתפים דוברי עברית כשפת אם, ולמדו בגן וביה"ס יסודי בעברית בישראל. יש להם קושי בחישוב תרגילים רב-ספרתיים, ודפוס של קושי רב יותר בשליפת תוצאות-ביניים מאשר באופרנדים. המפגשים התקיימו בזום והמשתתפים קיבלו תשלום עבור השתתפותם.

המשתתפים עברו סינון מקדים כדי לוודא שיש להם את היכולות הבסיסיות לביצוע המטלה: חישוב וזיכרון פעיל ברמה סבירה. הסינון כלל 2 מבדקים אריתמטיים (ידע של עובדות יסוד ויכולת ביצוע תרגילי חישוב רב - ספרתיים) ו-2 מבדקי זיכרון לטווח קצר וזיכרון פעיל. הקריטריון להכללה במחקר הוא כפי שתואר בפרק השיטה (פרק 2), למעט מבדק חישוב רב ספרתי בו המשתתפים נדרשו להצלחה של 30% מהפריטים לכל היותר.

כדי לבדוק את מנגנון ההסרה, המשתתפים ביצעו את ניסוי 2 (מטלת אחזור משתנים עם חישוב).

תוצאות ודיון

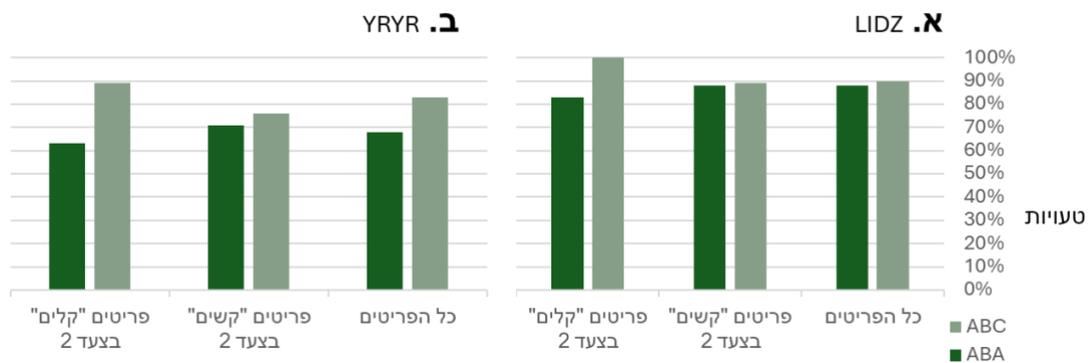
אחוזי הטעויות היו גבוהים מאוד (למעשה, גבוהים מדי) – מעל 70% אצל שני המשתתפים. חישובנו את ההפרש באחוזי הטעויות בצעדים הקריטיים (הצעד השלישי בכל פריט) בין תנאי ABC (צעדי אחזור ראשון) לתנאי ABA (צעדי אחזור שני). ההפרש הזה, "מחיר החזרה", חושב כך שערך חיובי מציין ביצוע גרוע יותר בתנאי ABA. אם למשתתפים יש ליקוי בתהליך הסרת מידע מ-RDA אל ALT, נצפה שמחיר החזרה יהיה גדול יותר אצלם מאשר אצל נבדקי הביקורת, כך שהם יעשו הרבה טעויות בתנאי ABA.

הממצאים היו הפוכים להשערה: לא רק שמחיר החזרה אצל 2 המשתתפים לא היה גבוה מזה של קבוצת הביקורת, הוא אפילו היה שלילי – כלומר, בניגוד לקבוצת הביקורת, אחוז הטעויות בתנאי ABC (אחזור

ראשון) היה גבוה יותר מאשר בתנאי ABA (אחזור שני, תרשים א1). דפוס זה נצפה גם בפריטים בהם הייתה טעות בצעד השני (צעד 2 "קשה") וגם כאשר לא הייתה טעות בצעד השני (צעד 2 "קל"; תרשים א1).

בדיעבד, להערכתנו, הממצאים לא תקפים כיוון שככל הנראה המטלה הייתה קשה מדי עבור המשתתפים. כאמור, אחוז הטעויות הכללי היה גבוה ביותר – מעל 70%. כתוצאה מכך, ייתכן שהממצאים לא משקפים את אותם מנגנונים שראינו בקבוצת הביקורת, אלא מנגנונים אחרים. לדוגמה, ייתכן שלפחות בחלק מהמצבים, המשתתפים השתמשו באסטרטגיה של זכירת רק חלק מהמשתנים. מצב כזה הוא אפשרי ואפילו סביר אם יש להם קיבולת נמוכה במיוחד של זיכרון פעיל. בהתאמה להסבר זה, גם בקבוצת הביקורת, המשתתפים שהראו אחוז טעויות גבוה מאד לא הראו את אותו דפוס כמו שאר בקבוצת הביקורת.

אם הבעיה היא אכן עומס גדול מדי על הזיכרון הפעיל, פתרון אפשרי עשוי להיות שינוי של המטלה כך שתהיה קלה יותר – למשל, להשתמש בערכים חד-ספרתיים במקום דו-ספרתיים.



תרשים א1. אחוז הטעויות בצעד הקריטי (הצעד השלישי). הפריטים הקשים/קלים הם אלה בהם היתה/לא היתה טעות בצעד 2, בהתאמה. שיעור הטעויות היה גבוה יותר בתנאי ABC מאשר בתנאי ABA אצל שני המשתתפים.