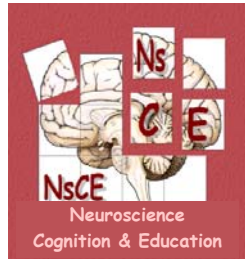


Neuroscience, Cognition and Education

An interdisciplinary think tank under the supervision
of the Chief Scientist of the Ministry of Education, Israel



מדע העצב, קוגניציה וחינוך

צוות חשיבה בין-אוניברסיטאי בחסות המדען הראשי
של משרד החינוך, ישראל

דו"ח מסכם

צוות החשיבה בנושא

מדע העצב, קוגניציה וחינוך

תוכן עניינים:

עמודים	נושא הפרק
2-3	פתיחה: מוח, בינה וחינוך אבישי הניק, המחלקה לפסיכולוגיה, מרכז זלוטובסקי לחקר העצב, המרכז לחקר הבסיס הנוירוקוגניטיבי של קוגניציה נומרית, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
4-28	מדע העצב, קוגניציה וחינוך- מבוא לדוח מסכם שרון נפרסטק, דזירה מלול, ואבישי הניק המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
29-63	מנגנונים מוחיים של ויסות- עצמי אנדראה ברגר, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
64-87	תרגול קוגניטיבי: מ-"ושיננתם לבניך" ועד לתוכנות אימון ממוחשבות רות שלו, היחידה לנוירולוגיה של הילד, מרכז רפואי שערי צדק, ירושלים
88-118	הבסיס הקוגניטיבי והנאורנאלי של למידה יוסף צלגוב, נשיא המכללה האקדמית אחווה באחריות אקדמית של אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, והמחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב רועי כהן-קדוש, המרכז למדעי העצב הקוגניטיבי, והמחלקה לפסיכולוגיה יוניברסיטי קולג', לונדון
119-156	תעתועי האינטואיציה ופתרון בעיות במדע רות סתוי וראובן בבאי, החוג להוראת המדעים, ביה"ס לחינוך ע"ש קונסטנטינר, אוניברסיטת תל-אביב
157-195	המוח המוסיקלי: מוסיקה ויכולות אחרות רוני יגר-גרנות, האוניברסיטה העברית, ירושלים דונה אבקסיס, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
196-214	שינה ולמידה אבי שדה, מרכז אדלר לחקר ההתפתחות והפסיכופתולוגיה של הילד, החוג לפסיכולוגיה, אוניברסיטת ת"א
215-235	דו לשוניות: פרספקטיבות מפסיכולוגיה קוגניטיבית ומדעי העצב ענת פריאור, מרכז אדמונד ג' ספרא לחקר המוח ולקויות הלמידה, הפקולטה לחינוך, אוניברסיטת חיפה
236-264	נוירו קוגניציה של עיבוד מידע נומרי ודיסקלקוליה התפתחותית אבישי הניק, המחלקה לפסיכולוגיה, מרכז זלוטובסקי לחקר העצב, המרכז לחקר הבסיס הנוירוקוגניטיבי של קוגניציה נומרית, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
265-291	היבטים התנהגותיים ונוירופסיכולוגיים של המשגה בפיזיקה מרים ריינר, הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל

פתיחה: מוח, בינה וחינוך

אבישי הניק

הדו"ח הנוכחי מסכם שתי שנות פעילות של צוות חשיבה בנושא מדעי העצב, מדעים קוגניטיביים וחינוך. הצוות הוקם בתגובה לפנייתו של פרופ' סיד שטראוס, המדען הראשי של משרד החינוך בשנת 2006, לחשיבה בנושא. הרושם הוא שבעולם כולו מתעורר משהו חדש. שני תחומי מחקר, צעירים יחסית - מדעים קוגניטיביים ומדע העצב - מצד אחד ותחום ותיק - חינוך - מצד שני, יוצרים שותפויות מעניינות ומבטיחות. בעוד רבים תוהים האם ניתן ליצור גשרים בין תחומי מדע אלה, צצו קבוצות עניין, מרכזי מחקר, תכניות לימודים, כתב עת, חברה אקדמית. כל אלה נראים מבשרים על לידתו של תחום חדש. פה נפגשים מדענים מתחומים שונים המעוניינים לברר שאלות חינוכיות בהקשר של מדעי העצב והקוגניציה.

פיתוחים טכנולוגיים מגוונים איפשרו הצצה אל תוך המוח. לדוגמה, ההדמיה המוחית בעזרת MRI תפקודי (fMRI) נתנה דחיפה לבדיקת האזורים המוחיים המעורבים בפעילויות שונות כמו קריאה, קשב וחשבון. כך התברר שאזורים המעורבים בקריאה עלולים להציג פעילות שונה אצל אנשים המתקשים בקריאה. מחקר זה עודד מדענים לחקור ולמצוא שלימוד הקריאה או תרגול המשפר יכולת קריאה בא לידי ביטוי בשינויים מוחיים באזורים אלה. סוג זה של מחקר מאפיין את תחום המחקר הקושר בין מדע העצב למדעים הקוגניטיביים - מדע העצב הקוגניטיבי. באופן דומה, מחקר אודות אימון או למידה, למשל תרגול של להטוטים עם כדורים (juggling) מוביל לשינויים מוחיים באזורים מוחיים ספציפיים. הפסקת התרגול מובילה להעלמות השינויים האלה.

אם כן, למידה והתפתחות מובילים לשינויים מוחיים ממשיים שניתן לצפות בהם. מכאן קל להבין את הקשר לחינוך, שעיקר עיסוקו - למידה. המוח הוא האיבר המרכזי בלמידה האנושית ועל כן ראוי לרתום את הידע המצטבר על איבר זה לחינוך. עם זאת, המעבר של הידע

ממדע העצב לחינוך או היישום שלו לכיתת בית הספר, במקרים רבים אינו פשוט וישיר. אולם, ברור שהבנת המערכות המוחיות והתהליכים הניורוקוגניטיביים המעורבים בלמידה היא בעלת ערך לחינוך ולמחנכים. בבית הספר לרפואה לומדים הסטודנטים גנטיקה וביולוגיה מולקולארית, נושאים שאין להם יישום בחיי היום-יום שלהם כרופאים. אולם אין חולק שלידע בגנטיקה וביולוגיה מולקולארית יש ערך בחינוך רפואי. רבים מבינים שצבירת ידע במדע בסיסי אינה מתרגמת ישירות או באופן מידי ליישום, אלא לאחר עבודה רבה וממושכת, לעתים לאחר שנות דור. אולם, אין ספק שללא מדע בסיסי מעולה לא יופיעו יישומים בעלי ערך כמו למשל תרופות חדשות ברפואה. בצורה דומה לא ניתן לצפות לקפיצת דרך ממדע העצב לשינוי או שיפור בחינוך.

בנוסף, הרושם הוא שיש ערך במעבר מידע דו-סטרי, לא רק מהמדענים אל המחנכים אלא מהמערכת החינוכית אל המדענים. ההכרה של תהליך הלמידה המתרחש בין כתלי בית הספר היא בעלת ערך רב עבור החוקרים. למשל, חוקרים העוסקים בלמידת חשבון ובהשפעה של שינה על זכרון, כדאי שיכירו את המתרחש בבית הספר, את המגבלות והנושאים הפדגוגיים המעורבים. הכרות כזאת תעודד שאלות שיש בהן עניין משותף ותעודד החלפת מידע בעל ערך בין הצדדים המעורבים.

אנו חוזים ביצירה והתפתחות של תחום חדש. מדובר בתהליך מעניין ומעורר השראה. אנו חייבים לצפות אל מעבר לקשר הישיר בין המעבדה לכיתה. יש ערך לכינוסם של אנשי מדע מהתחומים שנזכרו לצורך חשיבה ומחקר משותפים שיקדמו את התחום החדש. התחום הזה יתרום לחינוך של ילדים ומבוגרים גם יחד. משרדי חינוך במדינות רבות נותנים דעתם על העניין. מעצבי מדיניות, קרנות מחקר ואוניברסיטאות צריכים ליצור את הסביבה שתאפשר צמיחה של התחום הזה.

מדע העצב, קוגניציה וחינוך- מבוא לדוח מסכם

שרון נפרסטק, דזירה מלול, ואבישי הניק

המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

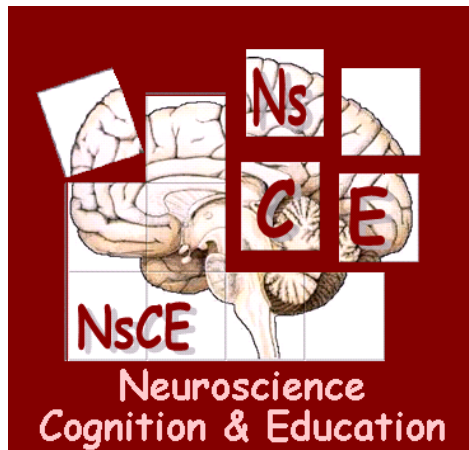
"The art of education is never easy...In the conditions of modern life the rule is absolute, [a country] that does not value trained intelligence is doomed." (Alfred North Whitehead, 1967)

"אמנות החינוך לעולם אינה משימה פשוטה...בתנאי החיים המודרניים, הכלל הוא חד משמעי, [אומה] שאינה מעריכה את פיתוח התבונה, סופה אבדון."

במשך שנים רבות, מדע העצב וחינוך התקדמו במסלולים בלתי תלויים. אולם, לאחרונה היו ניסיונות ליצור קשר בין שני זרמי מחשבה ומחקר אלה. קריאות לאינטגרציה הופיעו במספר מאמרים (Ansari & Coch, 2006; Goswami, 2006; Posner & Rothbart, 2005) אשר הציעו שהבנת תפקוד המוח, אליה ניתן להגיע במדע העצב ובמיוחד במדע העצב הקוגניטיבי, יכולה וצריכה להיות מוטמעת בחשיבה החינוכית. מאמצים אחרים הביאו לבניית עזרי הוראה 'מבוססי מוח', שמטרתם לשפר מיומנויות קוגניטיביות או לשמר יכולות קוגניטיביות. ניסיונות שילוב נוספים הופיעו בדמות מרכזי מחקר למדע העצב וחינוך המכוונים לעודד עבודה משותפת של אנשי מדע העצב ואנשי חינוך. למשל, הקרן הלאומית למדע של ארה"ב, NSF, הקצתה למעלה מ-90 מיליון דולר לארבעה צוותים רב-תחומיים הכוללים מדענים הבאים ממדע העצב הקוגניטיבי ומחינוך. הארגון לשיתוף פעולה ופיתוח כלכלי, OECD, יזם בשנת 1999 פרויקט שנקרא "מדעי הלמידה וחקר המוח". מטרת הפרויקט הייתה לעודד שיתוף פעולה בין מדעי הלמידה וחקר המוח מצד אחד ובין חוקרים למתווי מדיניות מצד שני. אף שרבים סבורים שניתן

לגשר בין חינוך למדעי העצב ראוי גם לשים לב לביקורת המושמעת לעתים. כך למשל, במאמר ב- John Bruer, 1997 גרס שבאשר ליישום מידע ועקרונות של מדעי העצב לחינוך מדובר עדיין ב-'גשר רחוק מדי' (Bruer, 1997). הוא הציע שהגשר האפשרי והסביר הוא בין המדעים הקוגניטיביים לחינוך. בכל מקרה, נראה שתנועת המידע בין מדעי העצב והקוגניציה לבין חינוך אסור שתהיה חד סטרית. ההתנסויות של אנשי חינוך והידע שרכשו יכולים לסייע בזיהוי נושאים הדורשים מחקר והסבר מדעי.

מדע העצב (neuroscience) עוסק בחקר מבנה המוח. דיסציפלינה צעירה יחסית זו, התקדמה בצורה משמעותית בעשורים האחרונים והציעה לנו תובנות חשובות על מוח האדם. המדע הקוגניטיבי (cognitive science) עוסק בחקר תפקודים מנטאליים גבוהים כמו למידה, תפיסה, קשב, שפה, זיכרון, רגשות. בשנים האחרונות אנו עדים לגידול מהיר של תחום המשלב את שני המדעים הללו ונקרא מדע העצב הקוגניטיבי (cognitive neuroscience). מטרת התחום להבין תפקודים גבוהים, כמו אלה שנזכרו, ואת ההקשר המוחי שלהם. המחקר במדע העצב הקוגניטיבי משלב מדענים מתחומי דעת שונים כמו נוירולוגיה, פיזיולוגיה, פסיכיאטריה, פסיכולוגיה, מחשבים, בלשנות. ההתקדמות המהירה במדע העצב הקוגניטיבי, קשורה בפיתוחן של שיטות מחקר לא פולשניות כמו הדמיה מוחית תפקודית (functional MRI – fMRI). נראה כי הבנת תפקוד המוח באמצעות מדע העצב, ובמיוחד, מדע העצב הקוגניטיבי, צריכה להיות מוטמעת בחשיבה שלנו אודות חינוך. עם זאת, השימוש בהבנות אלו צריך להיות שימוש זהיר, מבוסס ראיות (evidence based) על מנת להימנע מיצירת הטיות ומיתוסים. השיחה הדו כיוונית (cross talk) בין מדע העצב הקוגניטיבי לחינוך הינה בעלת חשיבות עליונה המאפשרת כיווני מחקר ושיטות הטמעה חדשניות.



ביולי, 2006, יצא המדען הראשי של משרד החינוך בקול קורא להגשת הצעות לצוות חשיבה ותכנון בנושא מדע המוח, המדעים הקוגניטיביים והשלכותיהם על תחום החינוך. צוות החשיבה הנוכחי, המורכב מאנשי מדע העצב, הפסיכולוגיה והחינוך, הוקם בהמשך לקריאה זו. צוות החשיבה שם לו למטרה ללמוד ולהבין מהם הצמתים בהם מדע העצב, המדעים

הקוגניטיביים והחינוך עשויים להיפגש, והיכן קשרים בין תחומים אלה יכולים להיות בעלי ערך.

הדו"ח הנוכחי מרכז את עיקרי עבודת הצוות במהלך השנתיים האחרונות (ראה לוגו).

פרק המבוא כולל סקירה כללית של עיקרי פעילות הצוות במהלך 24 חודשי העבודה;

מיפוי של תחום מחקר ועיסוק זה בעולם כיום בדגש על כתבי עת, תוכניות לימוד ומרכזים; כמו כן

יסקרו מספר מאמרים ועבודות שהינם בעלי תרומה מרכזית להתפתחות התחום.

סיכום עיקרי פעילות הצוות:

1. דוחות דו חודשיים ודוח מסכם - בהתאם לתוצרים שסוכם מראש, מדי חודשיים, הגיש

הצוות דוח המסכם את עיקרי הפעילות שלו לתקופה זו. כל דוח הכיל נספחים כגון,

תיאורי מרצים חיצוניים שהציגו בפני הצוות, תקצירים ודעות שנכתבו על ידי חברי הצוות

וכותבים חיצוניים, עדכונים בנושא אתר האינטרנט וימי העיון, ועוד.

2. ימי עיון לקהל הרחב - עם תחילת עבודת הצוות סוכם על קיום סדרה של שלושה ימי עיון

לקהל הרחב (ראה נספח). ימי העיון נבנו והוצאו לפועל בשיתוף עם מכון מופ"ת - בית

ספר למחקר ופיתוח תוכניות בהכשרת עובדי חינוך והוראה במכללות. הקשר עם מופ"ת

נבע מדיון בצוות שבמהלכו נקבע שקהל היעד להפצת המידע בתחום הם מורי המורים

ובעלי מקצועות קרובים (למשל, פסיכולוגים חינוכיים). לצורך כך הוקם צוות היגוי משותף

לצוות החשיבה ולמכון מופ"ת כאשר, מכון מופ"ת סיפק את התשתית הניהולית לקיום ימי העיון ואילו חברי הצוות היו

אמונים על התכנים והמרצים- בהם חברי הצוות ומרצים חיצוניים. ימי

העיון היו פתוחים למורי המורים וגם לקהל הרחב. מטרת סדרת ימי העיון הייתה

להציג לקהל את המחקרים העכשוויים בתחומי מדע

העצב הקוגניטיבי ולדון בהשלוכות האפשריות של

תחומים אלו על החינוך. המידע על ימי העיון הופץ

למורי מורים במכללות, מנהלים ומורים, סטודנטים

The image shows three overlapping brochures for a conference series. The top brochure is titled 'Mind, Brain & Education 3: The Science of Learning'. The middle one is 'Mind, Brain & Education 2: The Science of Learning'. The bottom one is 'Mind, Brain & Education 1: Brain & Education'. Each brochure includes a table of contents with times, a list of speakers and topics, and logos of participating institutions like Tel Aviv University, Bar Ilan University, and others.

להוראה, וצוותים פארא-חינוכיים בהם יועצים חינוכיים, פסיכולוגים חינוכיים, וקלינאי תקשורת. כדי לענות לצרכים של קהל היעד המגוון, נבנו ימי העיון בצורה הדרגתית כאשר ביום העיון הראשון הושם דגש על מבואות, ואילו ביום השני והשלישי התאפשרה העמקה בתכנים. בנוסף, על מנת לאפשר ערוץ דו כיווני של תקשורת עם אנשי ה"שטח", לצד הרצאות פרונטאליות של מומחים בתחומים שונים, נערכו בכל יום עיון מפגשים מצומצמים בהם התאפשר דיון בלתי אמצעי בין המשתתפים למומחה בתחום

מסוים. סיכום התכנים שעלו בדיונים אלו, לצד המשובים שהתקבלו בסיום כל יום עיון, שמשו בסיס לתכנון יום העיון העוקב וכן לבחירת הנושאים לכתיבת הדוח המסכם.

3. מפגשים והעשרה תוך צוותיים - במהלך 24 חודשי העבודה של הצוות, נפגשו חברי הצוות באופן שוטף. בנוסף לפגישות העבודה, נערכו שתי סדנאות עבודה מרוכזות בנות יומיים לכל חברי הצוות. במהלך המפגשים והסדנאות, הציגו חברי הצוות את עבודתם ושמעו הצגות של מרצים אורחים (מהארץ ומחו"ל) בנושאים הקרובים לעבודת הצוות. בנוסף, סוכמו במהלך מפגשים אלו הנושאים והדגשים לימי העיון שהצוות ערך, וכן התוצרים העיקריים הצפויים להתקבל מהעבודה. להלן פירוט נושאי ההצגות:

א. הרצאות של חברי הצוות- כל אחד מחברי הצוות נתן הרצאה בפורום הצוותי על תחום המחקר שלו. בסיום כל הצגה נערך דיון על האימפליקציות האפשריות של תחום זה על החינוך:

- i. קשב וליקויי קשב- פרופ' רות שלו וד"ר אנדראה ברגר
 - ii. מנגנוני קריאה והפרעות קריאה- פרופ' שלמה בנטין
 - iii. למידת מיומנויות: פרספקטיבה קוגניטיבית ומוחית- פרופ' יוסי צלגוב בשיתוף עם ד"ר רועי-כהן קדוש (שיחת ועידה באינטרנט מלונדון)
 - iv. למידה קונספטואלית בעזרת מידע חושי - פרופ' מרים ריינר
 - v. אינטואיציה במדע ובמתמטיקה - פרופ' רות סתוי
- ב. הרצאות של מרצים חיצוניים- מרצים חיצוניים בעלי מגיעה לתחומי העבודה של הצוות הציגו בפני הצוות. לאחר הצגות אלו נערך דיון על האימפליקציות האפשריות של העבודה על תחום החינוך:
- i. להכין את המוח לבית הספר- פרופ' מייקל פוזנר, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת יוג'ין, אורגון¹.

¹ <http://campus.achva.ac.il/nsce/Default.aspx> ניתן לצפות בשידור ההרצאה בקישור הבא

ii. דו לשוניות- ד"ר ענת פריאור, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת קרנג'י

מלון

iii. מוזיקה, מוח ומה שביניהם- ד"ר רוני יגר-גרנות, החוג למוסיקולוגיה,

האוניברסיטה העברית בירושלים, וד"ר דונה אבקאסיס, המחלקה

לאומנויות, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

4. אתר אינטרנט²- במהלך 24 חודשי העבודה של הצוות הוקם אתר אינטרנט הפתוח

לקהל הרחב. האתר מופיע בשתי שפות (עברית ואנגלית) וניתן למצוא בו: תיאור של

מטרות הצוות וחברי הצוות, מידע על אירועים כגון ימי העיון שאירגן הצוות והרצאות

הקשורות לנושאי העניין של הצוות, קישורים לאתרי אינטרנט של אוניברסיטאות וצוותי

חשיבה מהעולם העוסקים בתחומים דומים, וכן קישורים לתקצירים (חדשות ודעות).

תקצירים אלו נכתבו בידי חברי הצוות, בידי כותבים חיצוניים, או תורגמו מכתבי עת

רלוונטיים (באישור כתבי העת) והוכנסו לאתר. נושאי התקצירים המופיעים באתר:

א. דו לשוניות ומיומנות קוגניטיבית- פרופ' אבישי הניק

ב. תקופה קריטית לרכישת שפה שנייה- ד"ר ענת פריאור

ג. ללמוד איך ללמוד- פרופ' יוסי צלגוב

ד. לומדים להפנות את תשומת הלב- תרגום של ענת צ'סנובסקי למאמר דעה של

Rachel Jones שהתפרסם בכתב העת PLoS Biology.

ה. תאי עצב ותפיסת כמות- תרגום של ענת צ'סנובסקי למאמר דעה של Liza

Gross שהתפרסם בכתב העת PLoS Biology.

ו. מחקרי מוח בחינוך- פרופ' אבישי הניק

ז. יסות עצמי מול ונלמד- ד"ר אנדראה ברגר, פרופ' אורה קופמן, פרופ' אבישי

הניק

² <http://campus.achva.ac.il/nsce>

- ח. הבדלים בין המינים בתהליכי עיבוד שפה במוח- תקציר בידי ד"ר טלי ביתן
- ט. דיסקלקוליה התפתחותית- פרופ' אבישי הניק, ד"ר אורלי רובינשטיין
- י. מדע העצב, קוגניציה וחינוך- לאן?- פרופ' אבישי הניק
- יא. מקורה של הסתייגות מבוגרים ממדע בילדות- תרגום של פרופ' רות סתוי
למאמר של Paul Bloom, Deena Skolnick Weisberg שהתפרסם בירחון
Science ותורגם לעברית באישור כתב העת.

בנוסף, מכיל האתר כתובת דוא"ל ליצירת קשר עם הצוות. תא דואר זה שימש לקבלת
משובים פרטיים ותגובות על ימי העיון והאתר וכן אפשר להעביר מידע על ימי עיון
מתוכננים לגורמים שהתעניינו בכך.

בחלק זה של הפרק נסקור בקצרה את כתבי העת, המרכזים ותוכניות הלימוד העוסקות בממשק
שבין מדע העצב, המדעים הקוגניטיביים וחינוך.

כתבי עת בנושא מדע העצב הקוגניטיבי וחינוך:

בשנים האחרונות קיים גידול בעיסוק בממשק שבין מדע העצב, המדע הקוגניטיבי וחינוך.
קיימים מספר כתבי עת המפרסמים עבודות בתחום. השפעתם של כתבי העת הללו גדלה הן
לאור התעניינות גדלה בתחום והן לאור עלייה בזמינות המידע ברשת. כתב העת המרכזי העוסק
בתחום הינו ³ Mind, Brain and Education שהינו כתב העת הרשמי של האגודה הבינלאומית
למחשבה, מוח וחינוך (IMBES- International Mind, Brain and Education Society).
מטרתו העיקרית של כתב העת הינה לשמש פורום להצגה של מחקר בסיסי ויישומי בלמידה
והתפתחות, לכלול ניתוחים מתוך ביולוגיה, המדעים הקוגניטיביים והחינוך ובתוך כך לגשר על

³ <http://www3.interscience.wiley.com/journal/117982931/home>

תחום נרחב של ממצאים מתוך מדע העצב ובעיות חינוכיות רלוונטיות. הירחון הראשון ראה אור באפריל 2007, בידי Wiley Blackwell וכבר בשנה הראשונה להוצאתו הוכר כירחון החדש הטוב ביותר בשנת 2007 בקטגוריה של מדעי הרוח והחברה על ידי האגודה האמריקאנית להוצאה לאור.

כתבי עת נוספים עוסקים בתחום ממשק זה, בהם:

1. ⁴ Cognition and Instruction – כתב העת עוסק באופן ייחודי בנושאים בסיסיים הנוגעים בתהליכים המנטאליים והתרבותיים והתנאים ללמידה ויכולות אינטלקטואליות. הירחון מדגיש את ה"איך" בלמידה ובאימון אינטלקטואלי.
2. ⁵ Contemporary Educational Psychology – כתב עת המפרסם מאמרים העוסקים ביישום של תיאוריות פסיכולוגיות ומדעיות על תהליכי החינוך.
3. ⁶ Educational Researcher – כתב העת מכיל מאמרים מתחומים שונים בעלי חשיבות לקהילת המחקר החינוכי.
4. ⁷ Journal of the Learning Science – כתב העת משמש פורום בין-תחומי להצגת מחקרים על למידה וחינוך. כמו כן, מחפש כתב העת לאמץ דרכים חדשות לחשיבה על למידה שיאפשרו הרחבה של ההבנה המדעית אודות האופן שבו קוגניציה וקוגניציה חברתית משפיעות על חינוך.

⁴ <http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t775648096>

⁵ http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/622811/description#description

⁶ <http://edr.sagepub.com/>

⁷ <http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t775653672~db=all>

אגודות ומרכזים:

במקרים רבים, כתבי העת העוסקים בממשק שבין מדע העצב, מדע העצב הקוגניטיבי וחינוך, צמחו מתוך אגודות ומרכזים שהוקמו לעניין זה. להלן מספר דוגמאות למרכזים ואגודות מסוג זה:

1. International Mind Brain and Education Society⁸ (IMBES) - חברה בינלאומית חדשה ובולטת שהוקמה בשנת 2004. משימת החברה הינה לסייע לשיתוף פעולה בין-תרבותי בכל התחומים הרלוונטיים לממשק שבין מחשבה, מוח וחינוך במחקר, בתיאוריה ו/או בפרקטיקה. האגודה מוציאה לאור את כתב העת Mind Brain and Education, וכן עלונים ומצגות הנגישות ברשת.

2. Brain, Neuroscience and Education Special Interest Group⁹ - קבוצה זו הוקמה ב-1988 בידי האגודה האמריקאנית למחקר חינוכי. כיום, מהווה את הקבוצה הוותיקה ביותר המתמחה במחקר של מדע העצב והחינוך. מטרת הקבוצה לקדם את ההבנה של מחקר בתחום מדע העצב בתוך הקהילה החינוכית. מטרה זו מושגת באמצעות קידום מחקר בתחום מדע העצב שיש לו השפעות ישימות בחינוך, וכן על ידי הקמת פורום לדיון בנושאים ובמחלוקות המקשרות בין תחומים אלו.

3. Center for Educational Research and Innovation¹⁰ (CERI) – המרכז הוקם בידי הארגון לשיתוף פעולה ופיתוח כלכלי, OECD, ויזם פרויקט בשם "מוח ולמידה" במטרה להגיע להבנה טובה יותר של תהליכי הלמידה של הפרט במהלך החיים. בחלקו הראשון של הפרויקט (1999-2002), קבוצה בינלאומית של חוקרים מתחומים שונים נפגשה על מנת לבחון את ההשלכות האפשריות של ממצאי מחקר עכשוויים בתחום מוח ולמידה על מקבלי החלטות. תוצאות שלב זה של הפרויקט פורסמו תחת הכותרת:

⁸ <http://www.imbes.org>

⁹ <http://www.tc.umn.edu/~athe0007/BNEsig/>

¹⁰ http://www.oecd.org/department/0,3355,en_2649_35845581_1_1_1_1_1,00.html

"Understanding the Brain: Towards a New Learning Science". השלב השני של הפרויקט (2002-2006), התמקד בשלושה תחומי תוכן עיקריים: קריאה, מספרים ולמידה, לאורך החיים, באמצעות שלוש רשתות בינלאומיות. באופן ספציפי, חוקרים בתחום מדע העצב הקוגניטיבי נדרשו לעסוק בשאלות מתוך נושאים אלו שהן רלוונטיות באופן ישיר לחינוך. סיכום עיקרי הממצאים של שלב זה בפרויקט הופיעו בפרסום הבא: "Understanding the Brain: The Birth of a Learning Science". אחת המטרות הינה לעודד דיאלוג בין מחנכים ומדענים על האופן שבו כל אחד מהתחומים יכול לסייע להבנה של השאלה- איך אנו לומדים. מאמץ בינלאומי ובין- תחומי מסוג זה שופך אור על בעיות בתחום החינוך ומשחק תפקיד חשוב בפתרון.

4. ¹¹ Center for Neuroscience in Education, University of Cambridge – המרכז

למדע העצב בחינוך באוניברסיטת קמברידג', שואף ליישם את ההתפתחויות האחרונות בהבנת המוח לקידום החינוך. המרכז הוקם בשנת 2005 בתוך הפקולטה לחינוך על מנת לאפשר העברת מידע דו כיוונית בין החוקרים לאנשי החינוך. בנוסף, היה זה המרכז הראשון בעולם שהכיל ציוד להדמיה מוחית (לא פולשנית) בתוך הפקולטה לחינוך. מטרת החוקרים במרכז הינה להבין כיצד המוח מתפקד ומשתנה לאורך ההתפתחות של מיומנויות קריאה וחשבון, ולחקור את ההתפתחות של כישורים נלווים כגון שפה, הבנת מושג המספר וקשב. בנוסף לחקר תהליכים נורמטיביים, מדענים במרכז חוקרים גם סטיות מהתפתחות נורמטיבית כגון לקויות למידה (דיסלקציה ודיסקלקוליה).

5. ¹² Oxford Cognitive Neuroscience Education Forum - קבוצה בלתי פורמאלית

של מדענים מתחום מדע העצב, פסיכולוגים ואנשי חינוך אשר נפגשו על מנת לפתח את העניין המשותף שלהם בהשלכות והיישומים של מחקר במדע העצב הקוגניטיבי על התיאוריה והפרקטיקה בחינוך. שתי המטרות העיקריות של הפורום הינן: (1) לערוך

¹¹ <http://www.educ.cam.ac.uk/centres/neuroscience/>

¹² <http://www.brookes.ac.uk/schools/education/rescon/ocnef/ocnef.html>

מחקר בתחום מדע העצב הקוגניטיבי שיכול לענות על שאלות מרכזיות בתחום החינוך;
(2) להעביר לאנשי החינוך ידע אודות מחקרים בתחום מדע העצב הקוגניטיבי שהינם
רלוונטיים לתחום החינוך, תוך כדי ניפוץ של נורו- מיתוסים הקיימים במעגלים
החינוכיים.

תוכניות לימודים:

אחד התוצרים של העבודה בתחום הינן תוכניות ללימודי בוגר ומוסמך בתחום הממשק
של מחשבה, מוח וחינוך.

1. ¹³ Master's Program in Mind Brain and Education, Harvard University –

תכנית לימודי המוסמך מוצעת לסטודנטים המעוניינים בקשר שבין קוגניציה, מדע העצב
ויישום חינוכי ובעיקר למידה, הוראה והתפתחות קוגניטיבית ורגשית. התכנית הינה בין-
תחומית, וכוללת לימודי פסיכולוגיה, חינוך ומדע העצב וכן פילוסופיה, אנתרופולוגיה,
בלשנות, מחשבים ותחומי מחקר רלוונטיים נוספים. בעבודתם, חלק מן התלמידים
מדגישים יישומים פרקטיים של עקרונות קוגניטיביים במטרה לקדם אינטגרציה של
מחקר ויישום.

2. Undergraduate Program, The Department of Education at Dartmouth

¹⁴ College- a Mind, Brain, and Education Approach – המחלקה לחינוך במכללת
דארטמאות' יזמה תכנית לימודי בוגר, המכוונת על ידי הגישה המשלבת מחשבה, מוח,
וחינוך (MBE). המחלקה מובילה בחשיבה על החינוך על ידי התמקדות בהבנת
ההתפתחות הקוגניטיבית, הרגשית, השפתית, החברתית והמוסרית של ילדים
ומתבגרים מנקודות מבט שונות. המשימה המרכזית של המחלקה הינה לעצב את
החשיבה אודות היישום בכיתת הלימוד. המרצים במחלקה משלבים את התלמידים

¹³ <http://www.gse.harvard.edu/academics/masters/mbe/>

¹⁴ <http://www.dartmouth.edu/~educ/about/mbe.html>

בעבודת המחקר, קרי איסוף וניתוח של ממצאים נירוקוגניטיביים, בשילוב של טכניקות הדמיה לא פולשניות.

3. Master's of Science in Neurosciences and Education, Teacher's College, Columbia University¹⁵ – תוכנית לימודי המוסמך מתמקדת בהשלכות של ההתפתחויות האחרונות בקשר שבין מוח והתנהגות. אחת המטרות של התוכנית הבין-תחומית הינה להכשיר מומחים דו תחומיים היכולים לגשר על הפער שנוצר בין המחקר העומד בבסיס הבנת המוח, ההתנהגות והקוגניציה, לבין הבעיות המתעוררות בבתי הספר ובקליניקה. מטרה נוספת הינה לספק הכנה וחוויה שתאפשר לתלמידים להרחיב את הידע שלהם וליצור את ההקשרים בין מדע העצב, הקוגניציה והחינוך לבין היישום הקליני.

4. Pre- Doctoral Program, Minnesota Interdisciplinary Training in Education – Research Program, College of Education and Human Development¹⁶ אוניברסיטת מינסוטה היא אחת מ-10 אוניברסיטאות אשר קיבלה מימון מידי המכון למדעי החינוך (Institute of Education Sciences) של משרד החינוך האמריקאני, כדי להציע תוכנית לימודים בינתחומית במדעי החינוך. התוכנית מתמקדת בשיטות מחקר ניסויי ובמדעים קוגניטיביים ויישומם בנושאים חינוכיים. תחומי העניין מגוונים וכוללים: מדעים קוגניטיביים, מדע העצב, פסיכולוגיה חינוכית, פסיכולוגיה התפתחותית ועוד.

5. Graduate Program in Mind, Brain and Teaching, John Hopkins University¹⁷ – תוכנית הלימודים במחשבה, מוח והוראה מתמקדת באופן שבו מדע העצב ומדע העצב הקוגניטיבי יכולים לסייע לשיפור תחום החינוך. הקורסים בתוכנית

¹⁵ [http://www.tc.columbia.edu/bbs/NeuroSci/detail.asp?Id=Degree+Requirements&Info=Masters+of+Science+\(M.S.\)](http://www.tc.columbia.edu/bbs/NeuroSci/detail.asp?Id=Degree+Requirements&Info=Masters+of+Science+(M.S.))

¹⁶ <http://www.cehd.umn.edu/MITER/?default.html>

¹⁷ <http://education.jhu.edu/otherspecializations/mind-brain/>

מתמקדים בלמידה והתפתחות תוך שימוש במחקר בסיס ויישומי מהתחומים הבאים:
מדעים קוגניטיביים, פסיכולוגיה ומדע העצב, נירולוגיה, וחינוך.

בשנים האחרונות התפרסמו מספר עבודות בתחום המוח, מחשבה וחינוך. עבודות אלה העלו תרומה משמעותית להתפתחות התחום.

מחשבה, מוח וחינוך- לידתה של תנועה:

התחום החדש של מחשבה מוח וחינוך נוצר בניסיון להפגיש יחד ביולוגיה, מדעים קוגניטיביים, התפתחות וחינוך על מנת ליצור בסיס מחקרי איתן לחינוך (Fischer, 2009). תחום זה מציע גישה חדשה לאיחוד מחקר וחינוך תוך שיתוף פעולה בין אנשי השטח והמדענים במטרה להעלות שאלות מחקר שסייעו להשפיע ולעצב את מדיניות החינוך. מודל עבודה זה שונה מהמודל המסורתי בכך שהמורים מהווים חלק אינטגרלי מהמחקר ואינם רק מקבלים מידע שנאסף ועובד עבורם על ידי החוקרים. במאמרו, טוען Fischer כי אחד הגורמים שהביא ליצירת התנועה החדשה למחשבה, מוח וחינוך הוא העדר תשתית מחקרית בחינוך, להערכת היעילות של למידה והוראה (עמוד 4). על מנת להעריך תחומים אלו, ממשלות אחדות פנו לשימוש במבחנים סטנדרטיים בהם: Program for International Student Assessment [OECD], No Child Left Behind. אולם, הערכות מסוג זה אינן שלמות בכך שהן מתקשות לבחון את היעילות של למידה והוראה ואינן מאפשרות התייחסות למשוב של המורים והלומדים. בשלהי המאה ה-20 ותחילת המאה ה-21, הוקמו קבוצות שונות ברחבי העולם בעלות עניין בממשק שבין מחשבה, מוח וחינוך. בפריס, della Chiesa ועמיתים הקימו את הפרויקט Learning Sciences and Brain Research and Innovation of the OECD והביאו לפרסום של שני ספרים על מוח ולמידה. בטוקיו, הוקמה אגודת Baby Science Society of Japan שהחלה בסדרה של מחקרי אורך בנושאי למידה והתפתחות. בקמברידג', הוקמה תוכנית אימון בשם Mind, Brain and Education לצד סדרה של כנסים בנושא למידה והמוח,

שמטרתם הייתה ללמד מורים אודות מדע העצב וגנטיקה וכיצד תחומים אלו קשורים לחינוך. מספר שנים מאוחר יותר חברו הקבוצות הללו יחד ליצירת האגודה הבינלאומית למחשבה, מוח וחינוך The International MBE Society אשר אחד התוצרים המשמעותיים שלה הוא הירחון Mind Brain and Education. חוקרים אחדים הביעו ספקות על הקישור בין ביולוגיה לחינוך ותיארו פער זה כגשר רחוק לגישור משום שלטענתם, הקישור התיאורטי והיישומי בין ידע ביולוגי ללמידה הינו בלתי אפשרי. אך טיעונים מסוג זה מתעלמים מהתועלת שבשימוש במושגים ביולוגיים לחשיבה וניתוח של מצבים חינוכיים. לעתים תכופות, הבנת היסודות הביולוגיים (אורגניים) של מסלולי למידה מזרזת את המטרות החינוכיות ובאותו הזמן מסייעת בהבנת שאלות מדעיות בתחום מדע העצב. דוגמא קיצונית לכך הינה מחקר בילדים שעברו כריתה של אחת ההמיספרות כתוצאה מאפילפסיה. חלק מהילדים הללו שגדלו בסביבות מעודדות למידה הצליחו לפתח מיומנויות למידה ברמה גבוהה בניגוד לציפיות ולגישות נירופסיכולוגיות מסורתיות. ישנן מספר דוגמאות בעולם המודרני לשילוב שבין מחקר ופרקטיקה לשם העלאת שאלות מחקר רלוונטיות ויישומן בפתרון בעיות בשטח. דוגמא אחת כזו הינה מתחום הרפואה כאשר ביולוגים ופרקטיקנטים (רופאים, אחיות) עובדים יחד בבתי חולים אוניברסיטאיים על מנת לאחד את המחקר על חולי ובריאות. במאמרם מ-2008 Hinton and Fischer מציינים כי בניגוד לתחום הרפואה, בתחום החינוך ישנו מספר קטן בלבד של בתי ספר לחינוך העורכים מחקר על הוראה ולמידה כחלק אינטגרלי משימתם. בהתבסס על רעיונו של Dewey (1896) (כפי שמופיע ב Fischer, 2009) הם מציעים להקים לאנשי החינוך מוסד הדומה לבית החולים האוניברסיטאי- בית ספר מחקרי research school- שיאפשר לקשר בין עבודתם של החוקרים ואנשי השטח ולייצר שיטות מחקר ושאלות מחקר הנוגעות לנושאים מרכזיים בחינוך. על פי המודל המוצע, בתי הספר המחקריים יהיו בתי ספר אמיתיים (פרטיים, וציבוריים) שיהיו ממוקמים בסמוך לאוניברסיטאות ובאופן ספציפי לפקולטות לחינוך בתוך האוניברסיטאות. תשתית נוספת שתאפשר בסיס מחקרי ללמידה והוראה הינו יצירת מאגרי ידע שיעסקו בלמידה

והתפתחות. מספר מאגרים מסוג זה כבר קיימים בהם: The National Assessment of Education Progress¹⁸; The National Institute of Child Health and Human Development- Child Care Project.

מודל העבודה הניסיוני של ה- Upper Valley:

לאחרונה, קבוצה של מחנכים וחוקרים ניסתה לבנות מודל עבודה לקשר בין מחשבה, מוח וחינוך. חברי הקבוצה הגיעו מתוך קהילה חינוכית קטנה באזור Upper Valley (Vermont, New Hampshire) בחוף המזרחי של ארה"ב, וחברו יחד על מנת ליצור כלים קונקרטיים לשיתוף פעולה בין בתי ספר ומעבדות מחקר ובין מורים וחוקרים (Coch et al., 2009). בין היתר, ערכו חברי הקבוצה שיעורים והרצאות לסטודנטים להוראה ולמורים, הקימו מעבדות מחקר למורים, ערכו כנסים בהם נערכו מפגשים בין החוקרים למורים, ועודדו כניסה של החוקרים לכיתות הלימוד. מטרתם העיקרית של חברי הקבוצה הייתה ליצור פורום דו כיווני: מחד, שאפו חברי הקבוצה להציג לאנשי מקצוע מתחום החינוך מידע עדכני שהוא בעל השלכות אפשריות על תחום החינוך. החוקרים התמקדו בעיקר בכל הנוגע להתפתחויות האחרונות בתחומי מדע העצב הקוגניטיבי- התפתחותי. מאידך, שאפו חברי הקבוצה לאפשר דיון בין אנשי החינוך לחוקרים על מידע מסוג זה. על מנת לאפשר את הדיון הפורה בין המורים לחוקרים, המורים נדרשו להבין ולהעריך את המחקרים שהוצגו בפניהם. בשל הפערים בחשיבה ושיטות העבודה בין המורים והחוקרים אחת השאלות המרכזיות הפכה להיות כיצד, מתי ואיך ללמד את המלמדים (אנשי החינוך) על מדע העצב. אחד הפתרונות שנבחרו היה לאפשר לאנשי החינוך הכשרה בסיסית ומתקדמת במדע העצב במהלכה נדרשו לתכנן ולבצע מחקר ניסויי בכיתתם (שני מחקרים לדוגמה עסקו בהשפעה של זיכרון על למידה, ובהזדמנויות לימודיות אצל ילד הסובל מאפילפסיה- מחקר אורך). בנוסף, ביקרו אנשי החינוך במעבדות העוסקות במחקר

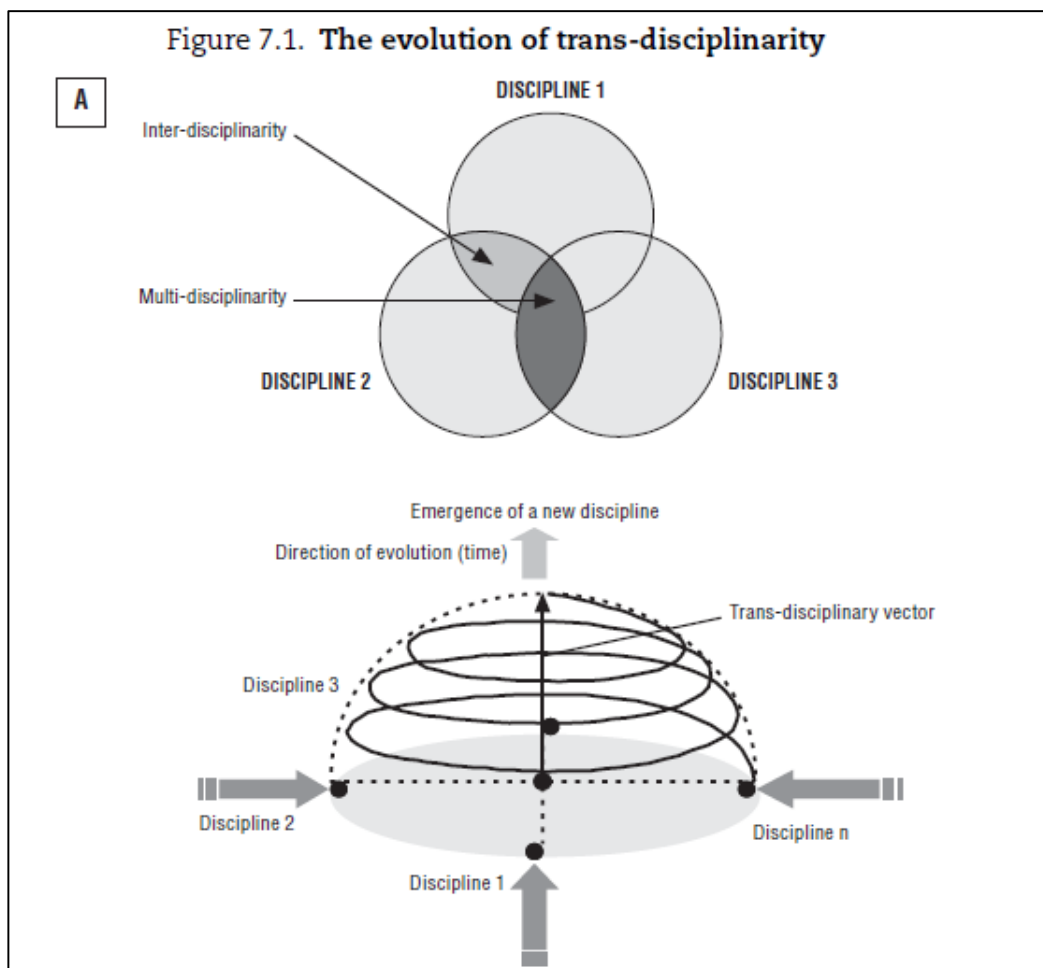
¹⁸ <http://nces.ed.gov/NationsReportCard/>

בתחום מדע עצב (בהן מעבדות העוסקות בהדמיה מוחית) וניהלו דיונים עם החוקרים. במקביל, החוקרים למדו יותר על מגבלות כיתת הלימוד והפכו מודעים יותר לבעיות והאתגרים עימם מתמודדים המורים. האזנה לתיאורי המורים על התנהגות התלמידים, סייעה לחוקרים להעלות שאלות מחקר חדשות שיכולות לסייע בהבנה של המנגנונים העומדים בבסיס התנהגויות אלו. החוקרים ציינו שתצפית באנשי חינוך המפרשים את נתוני המחקר שלהם, הייתה חוויה מרתקת. כמו כן, התברר כי לעיתים קשה למצוא שפה משותפת לדיון. החוקרים נדרשו לפתח שיטות חדשות להצגת הנתונים בפני המורים כך שההצגה תהיה ברורה אך ללא התפשרות על הממצאים. הנוכחות הפיזית בכיתות הלימוד והדיונים עם המורים אפשרו לחוקרים להעלות שאלות מחקר חדשות המבוססות על האופן שבו תלמידים באמת לומדים ולא על סמך התפיסות והמחשבות שלהם על האופן שבו מתבצעת למידה. אחד התוצרים של הדיון בין החוקרים לאנשי החינוך היה כנס בנושא "בניית התשתית" הנערך בקהילה אחת לשנתיים. כנס מסוג זה נועד לאפשר דיון בין קלינאים, חוקרים ואנשי חינוך, אודות מחקרים בתחום מדע העצב שהם בעלי השלכות על הוראה והישגי תלמידים.

יזמות מסוג הקבוצה ב Upper Valley הדגישו בין היתר, את החשיבות שבערוץ תקשורת דו כיווני בין החוקרים לשטח. תקשורת מסוג זה מחייבת קבלת משוב מהמורים. במהלך שנת 2005-2006 נערך מחקר בבריטניה אודות השקפותיהם של מחנכים על מקומו של מדע העצב בחינוך (Pickering and Howard-Jones, 2007). המחקר נערך באמצעות העברת שאלונים ל- 189 אנשי חינוך, וכן ראיונות עומק עם קבוצה קטנה יותר של משתתפים (11 ראיונות). השאלונים הועברו בשלושה אירועים שונים בהם נידון הקשר שבין מדע העצב והחינוך. אירועים אלו נבחנו זה מזה במידת המחויבות של המשתתפים (השתתפות חובה או מבחירה), וכן בקהל היעד (שני כנסים לאומיים מול קבוצת דיון בינלאומית). הממצאים העיקריים שעלו מתוך המחקר היו:

1. אנשי חינוך מבריטניה ומרחבי העולם הראו באופן כללי התלהבות לשילוב מדע העצב בחינוך. עם זאת, נראה כי אנשי החינוך אינם רוצים שיאמרו להם מה לעשות, אלא מחפשים להעשיר את הידע שלהם בתחום המחשבה והמוח, על מנת להשתמש בידע הזה כדי לתמוך בהחלטות שהם מקבלים בכיתת הלימוד.
2. אנשי החינוך בבריטניה ובעולם הדגישו את חשיבות התרומה של ניסיונם, דעותיהם ותפיסותיהם בפיתוח תחום זה של מחשבה, מוח וחינוך.
3. הבנה של תפקוד המוח נתפסת כחשובה בעיצוב והעברה של תוכניות לימוד לילדים ולמבוגרים, לזיהוי צרכים מיוחדים, ולקשר בין תזונה ולמידה. עם זאת, הבנות אלו נתפסות כתורמות פחות לבחירת התכנים הלימודיים.
4. אנשי חינוך רבים נעזרו ונעזרים בטווח רחב של יוזמות חינוכיות מבוססות מוח בהם שיטות הוראה ולמידה, סגנונות הוראה, רגש ולמידה, ורעיונות המבוססים על מחקר בתחום מדע העצב והמדעים הקוגניטיביים. מרבית היוזמות הללו נתפשות בידי המורים כמוצלחות.
5. אנשי החינוך והחוקרים נבחנו זה מזה במספר דרכים בהם דרישות התפקיד, היכרות עם התחום השני, והשפה בה הם משתמשים. כדי שמידע מתחום מדע העצב יהפוך לזמין ושימושי לאנשי חינוך, יידרש לעתים תרגום מתאים. במקביל, מספר יוזמות מבוססות מוח, יכולות להרוויח מחקירה מדעית.
6. תקשורת טובה מהווה מפתח מרכזי להתפתחות של שיתוף הפעולה בין מדע העצב והחינוך ופרקטיקנטים רבים מקווים להיות חלק אינטגרטיבי בפיתוח תחום זה. שתי יוזמות חיוביות שיכולות לקדם מאמץ זה הינן: (1) הוספת לימודי מדע העצב ולימודי פסיכולוגיה כחלק מתכנית הלימודים של מורים (2) פיתוח והעשרה של אנשי מקצוע המשלבים בין התחומים, במאמץ לגשר בין מדעני מדע העצב ואנשי החינוך בשטח.

שיתוף הפעולה בין אנשי החינוך בשטח לבין החוקרים מהווה דוגמא למיזוג בין תחומי. במאמר העוסק במחקרים חוצי-תחום במאה ה-21, מבחין הכותב בין המושגים "בין תחומי" ו- "רב תחומי", הממוקמים על משטח דו מימדי; למושג "חוצי-תחום" (trans-disciplinary), הממוקם על משטח תלת מימדי (Koizumi, 1998). מושג זה, שהוצע לראשונה בידי החוקר ועמיתו בשנת 1995, מתאר תהליך אבולוציוני שבמהלכו מספר תחומים נפרדים חוברים ברמה היררכית נמוכה, ומתמזגים תוך כדי גישור ליצירת תחום-על חדש (ראה איור).



מתוך: Organization for Economic Cooperation and Development. (2007). *Understanding the brain: The birth of a learning science*, page 136.

במסגרת פרויקט "Learning Sciences and Brain Research" (1999-2007) של ארגון ה-OECD, מרחיבים החוקרים את הדיון בממשק שבין מדע העצב והחינוך תוך כדי השימוש

במודל. בנוסף, החוקרים דנים במספר אתגרים אפשריים בבנייה ופיתוח של תחום העל המשלב מוח, מחשבה וחינוך (della Chiesa et al., 2009):

1. הצורך בשפה משותפת להמשגה העולה מעבר להבדלים סמנטיים בין התחומים.
2. על המומחים בתחום מדע העצב להיות בעלי יכולת ורצון לשתף את ממצאיהם עם אנשים מתחומי עניין אחרים.
3. המומחים בתחום מדע העצב נדרשים לתרגם את ממצאיהם ורעיונותיהם כך שיהיו ברורים גם להדיוטות.
4. על המומחים בתחום מדע העצב להאמין שהעברת המידע בין התחומים היא חיונית גם עבור מקבל המידע וגם עבור מוסר המידע.
5. המומחים בתחום החינוך חוששים מפני השינויים הצפויים עם החדרת תחום מדע העצב לחינוך ומפני האיום על העקרונות והשיטות עימם עבדו עד כה.
6. ניפוץ של נורו-מיתוסים הנובעים מחוסר הבנה, פרשנות שגויה או סילוף ועיוות ממצאים (לדוגמא: תקופות קריטיות להוראה ולמידה של תחומים מסוימים, בני אדם עושים שימוש רק בעשרה אחוזים מהמוח כולו, מוחם של גברים וילדים שונה ממוחן של נשים וילדות, ועוד).
7. סכנות אתיות בהן: ניצול לרעה של שימוש בשיטות הדמיה, צריכת חומרים מסוכנים העלולים להשפיע על פעילות המוח (לדוגמא, השימוש בריטלין לטיפול בהפרעת קשב), הסכנה שביצירת מערכת חינוך מכוונת מדע בלבד, ועוד.

מספר יוזמות הוקמו על מנת לאפשר ולתמוך בדיון שבין מוח, מחשבה וחינוך בהן: אתרי מידע ופורומים ברשת, כתבי עת ופרסומים המיועדים להורים ומורים- במטרה להפוך את מדע העצב נגיש להדיוטות, ובתי ספר מחקריים (research schools) המשלבים מחקר ויישום (כפי שצוין לעיל).

לסיכום, שנות ה-90 הוגדו "העשור של המוח" בידי הנשיא האמריקאני, ג'ורג' בוש, מושג אשר ממשיך להתקיים גם לאחר סיום העשור, ונראה כי יימשך להיות בר חשיבות בעשורים הבאים גם כן. במובן מסוים מה שאנו רואים לנגד עינינו הוא התפתחות שנבעה מעשור המוח. הרושם הוא שבשנים האחרונות התפתחה תנועה חדשה שמציבה אתגר של העברת מידע מתחומים של מחקר "טהור" לחינוך. עד כה נעשתה עבודה רבה אולם יש עוד לא מעט גשרים אותם יש לבנות ולטפח על מנת לענות לאתגר הזה. אנו עוסקים בדרכים הטובות והיעילות לפיתוח התבונה האנושית מחד ובגורמים המשפיעים על פיתוח התבונה האנושית. מדינות שונות בעולם משקיעות מאמץ ניכר בעניין והרושם הוא שיש צורך שמשרד החינוך של מדינת ישראל ייתן דעתו על העניין ועל המתרחש בעולם.

- Ansari, D., & Coch, D. (2006). Bridges over troubled waters: education and cognitive neuroscience. *Trends in Cognitive Sciences*, 10, 146-151.
- Bruer, J. T. (1997). Education and the brain: A bridge too far. *Educational Researcher*, 26, 4-16.
- Coch, D., Michlovitz, S. A., Ansari, D., & Baird, A. (2009). Building mind, brain, and education connections: The view from the Upper Valley. *Mind, Brain, and Education*, 3, 26-32.
- della Chiesa, B., Christoph, V., & Hinton, C. (2009). How many brains does it take to build a new light? Knowledge management challenges of a transdisciplinary project. *Mind, Brain, and Education*, 3, 16-25.
- Fischer, K. W. (2009). Mind, brain, and education: Building a scientific groundwork for learning and teaching. *Mind, Brain, and Education*, 3, 3-16.
- Goswami, U. (2006). Neuroscience and education: from research to practice? *Nature Reviews Neuroscience*, 7, 406-413.
- Hinton, C., & Fischer, K. W. (2008). Research schools: Grounding research in educational practice. *Mind, Brain, and Education*, 2, 157-160.
- Koizumi, H. (1998). A practical approach to transdisciplinary studies for the 21st century – The centennial of the discovery of the radium by the Curies. *Journal of Seizon and Life Sciences*, 9, 5-24.
- Organization for Economic Cooperation and Development. (2007). *Understanding the brain: The birth of a learning science*. Paris: Author.

- Pickering, S. J., & Howard-Jones, P. (2007). Educators' views on the role of neuroscience in education: Findings from a study of UK and international perspectives. *Mind, Brain, and Education, 1*, 109-113.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2005). Influencing brain networks: implications for education. *Trends in Cognitive Sciences, 9*, 99-103.



יום עיון בנושא:

בין מוח לחינוך - מדע העצב, קוגניציה וחינוך

בחסות צוות החשיבה בין-אוניברסיטאי בנושא זה, הפועל ביוזמתו ובתמיכתו של המדען הראשי של משרד החינוך
יתקיים ביום שני, ה' בטבת תשס"ח, 17 בדצמבר 2007 במכון מופ"ת

בתכנית:

התכנסות והרשמה 9:30-8:45

ברכות ודברי פתיחה 10:00-9:30

ד"ר מיכל גולן, מנהלת מכון מופ"ת

פרופ' אבישי הניק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב
פרופ' סידיני שטראוס, המדען הראשי של משרד החינוך

מבנה המוח ותפקודיו 10:35-10:00

ד"ר גליה אבידן, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב

טכניקות בחקר המוח - מבוא 11:10-10:35

ד"ר ליאון דעואל, המחלקה לפסיכולוגיה והמרכז לחישוביות עצבית, האוניברסיטה העברית בירושלים

תסמונת הפרעת קשב וריכוז: מהבסיס הניורוביולוגי לטיפול הפרמקולוגי 11:45-11:10

פרופ' רות שלו, מנהלת היחידה לניורולוגיה של הילד, מרכז רפואי שערי צדק

הפסקה 12:30-11:45

מושבים מקבילים: מפגשים עם מרצי המליאה ומסגרות דיון נוספות בנושאים: למידה וקוגניציה נומרית • ויסות עצמי
• שפה והפרעות שפה • למידה, חושים ומוח ועוד. (מידע נוסף בכתובת: www.mofet.macam.ac.il/iun/#4)

הפסקה 13:30-12:30

הבסיס הניורוקוגניטיבי לחשיבה כמותית וללקויות בה 13:50-13:30

פרופ' אבישי הניק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב

תעטועי האינטואיציה ופתרון בעיות במדע 14:25-13:50

פרופ' רות סתוי, ד"ר ראובן בבאי, החוג להוראת המדעים, אוניברסיטת תל אביב

15:00-14:25

חברי ועדת ההיגוי (לפי סדר א-ב):

זהבה בן-עמי, מכון מופ"ת; ד"ר אנדראה ברגר, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב; ד"ר מיכל גולן, מנהלת מכון מופ"ת; פרופ' אבישי הניק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב; ד"ר נורית זיידן, המכללה האקדמית לחינוך ע"ש קיי; דזירה מלול, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב; שרון נפרסטק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב; פרופ' יוסי צלגוב, נשיא המכללה האקדמית אחוה באחריות אקדמית של אוניברסיטת בן גוריון בנגב והמחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב; ד"ר שרה שמעוני, מכון מופ"ת, מכללת לוינסקי לחינוך

Neuroscience, Cognition and Education

An interdisciplinary think tank under the supervision of the Chief Scientist of the Ministry of Education, Israel



בישראל יזם המדען הראשי של משרד החינוך הקמת צוות חשיבה, המורכב מאנשי מדע העצב, הפסיכולוגיה והחינוך. הצוות שם לו למטרה ללמוד ולהבין את הצמתים שבהם מדע העצב, המדעים הקוגניטיביים והחינוך עשויים להיפגש, והיכן קשרים בין תחומים אלה יכולים להיות בעלי ערך. הצוות אמור להצביע על התפתחויות בתחום מדעי המוח והמדעים הקוגניטיביים ועל השלכותיהן לתחום החינוך. כחלק מהמאמץ דיאלוג עם אנשי החינוך, צוות החשיבה משתף פעולה עם מכון מופ"ת, ובמסגרת זו נערך יום העיון הנוכחי. לפרטים נוספים: www.achva.ac.il/nsce

מדע העצב, קוגניציה וחינוך

צוות חשיבה בין-אוניברסיטאי בחסות המדען הראשי של משרד החינוך, ישראל

במשך שנים רבות מדע העצב והחינוך התקדמו במסלולים בלתי תלויים. אולם לאחרונה נעשו ניסיונות אחדים ליצור קשר בין שני זרמי מחשבה ומחקר אלה. חוקרים הציעו, כי הבנת תפקוד המוח, שניתן להגיע אליה במדע העצב, ובמיוחד במדע העצב הקוגניטיבי, יכולה וצריכה להיות מוטמעת בחשיבה החינוכית. מאמצים אחרים הביאו לבניית עזרי הוראה 'מבוססי מוח', שמטרתם לשפר מיומנויות קוגניטיביות או לשמר יכולות קוגניטיביות. ניסיונות שילוב נוספים הופיעו בדמות מרכזי מחקר למדע העצב והחינוך, המכוונים לעודד עבודה משותפת של אנשי מדע העצב ואנשי חינוך.

Participating Institutions:



Ben-Gurion University of the Negev



Achva Academic College



Hebrew University of Jerusalem



Shaare Zedek Medical Center



Tel Aviv University



Technion Israel Institute of Technology

ארגון: זהבה בן עמי, ראש מדור ימי עיון

www.mofet.macam.ac.il/iun/#4 (מדור ימי עיון)

גמול השתלמות: ההשתלמות בימי העיון מקנה למורים במסודות להכשרת עובדי הוראה צבירה של 6 שעות מתוך 14 השעות הנדרשות כמינימום שנתי לצבירת גמול בנושא "הכשרת מורים" בשנת לימודים אחת • דמי ההשתלמות: לנרשמים מראש - 60 ש"ח; לנרשמים ביום העיון - 70 ש"ח • ההרשמה באמצעות כרטיס אשראי בטלפון 03-6901406 (שלוחה 0), 03-6901428 או באתר מכון מופ"ת, מדור ימי עיון: www.mofet.macam.ac.il/iun



יום עיון בנושא:

בין מוח לחינוך 2: קשת של השפעות על למידה

בשיתוף עם צוות החשיבה הבין-אוניברסיטאי הפועל ביוזמתו ובתמיכתו של המדען הראשי של משרד החינוך

יתקיים ביום שלישי, כ"ה באדר ב' תשס"ח, 1 באפריל 2008 במכון מופ"ת

בתכנית:

התכנסות והרשמה	9:30-8:45
ברכות ודברי פתיחה	10:00-9:30
ד"ר מיכל גולן, מנהלת מכון מופ"ת פרופ' יוסי צלגוב, המכללה האקדמית אחוה; המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב פרופ' סידי שטראוס, המדען הראשי של משרד החינוך	
למידת מיומנויות: פרספקטיבה קוגניטיבית ומוחית	10:45-10:00
פרופ' יוסי צלגוב, המכללה האקדמית אחוה; המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב ד"ר רועי כהן-קדוש, המכון למדעי העצב הקוגניטיבי והמחלקה לפסיכולוגיה, יוניברסיטי קולג' לונדון	
מנגנונים מוחיים של יסודות עצמי	11:20-10:45
ד"ר אנדראה ברג, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב	
השפעת תזונה ומרכיבי תזונה על תהליכים קוגניטיביים אצל ילדים בגיל בית ספר	11:55-11:20
פרופ' שלמה יהודה, ראש המעבדה לפסיכופרמקולוגיה, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בר אילן	
הפסקה	12:30-11:55
מושבים מקבילים - מפגשים עם מרצי המליאה ומסגרות דיון נוספות בנושאים אלה:	14:00-12:30
השפעות של דחק על תפקידי ניהול ובקרה ■ טיפול בעזרת ריטלין בילדים הסובלים מהפרעת קשב וריכוז ■ הפרעות קריאה על רקע גנטי והתפתחותי ■ גישות, אישיות ויכולת למידה ■ האם החשיבה האינטואיטיבית מפריעה או מסייעת לנו בפתרון בעיות מדעיות? התכנית המלאה של המושבים המקבילים מופיעה באתר מכון מופ"ת (מדור ימי עיון) www.mofet.macam.ac.il/iun/#4	
הפסקה	14:20-14:00
תגבור תגובות מוחיות בעולם וירטואלי? כיצד שילובים מסוימים של גירויים חושיים יכולים לתגבר תגובות מוחיות	15:00-14:20
פרופ' מרים ריינר, הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל	

חברי ועדת ההיגוי (לפי סדר הא"ב):

זהבה בן-עמי, מכון מופ"ת; ד"ר מיכל גולן, מנהלת מכון מופ"ת; פרופ' אבישי הניק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב; דזירה מלול, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב; שרון נפרסטק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב; פרופ' יוסי צלגוב, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב ונשיא המכללה האקדמית אחוה באחריות אקדמית של אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

An interdisciplinary think tank under the supervision of the Chief Scientist of the Ministry of Education, Israel



צוות חשיבה בין-אוניברסיטאי
בחסות המדען הראשי של משרד החינוך, ישראל

שמות חברי הצוות (לפי סדר הא"ב)

צוות אקדמי: פרופ' שלמה בנטין, המחלקה לפסיכולוגיה, האוניברסיטה העברית בירושלים; ד"ר אנדראה ברג, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב; פרופ' אבישי הניק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב; פרופ' רות סתוי, החוג להוראת המדעים, אוניברסיטת תל אביב; פרופ' יוסי צלגוב, המכללה האקדמית אחוה; המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב; פרופ' מרים ריינר, החוג להוראת המדעים, הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל; פרופ' רות שלו, מנהלת היחידה לנוירולוגיה של הילד, המרכז הרפואי שערי צדק צוות מנהלי: דזירה מלול, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב; שרון נפרסטק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

לפרטים נוספים: www.achva.ac.il/nsce

ארכון: זהבה בן-עמי, ראש מדור ימי עיון

גמול השתלמות: ההשתתפות ביום העיון מקנה למורים במוסדות להכשרת עובדי הוראה צבירה של 6 שעות מתוך 14 השעות הנדרשות כמינימום שנתי לצבירת גמול השתלמות בשנת לימודים אחת. מכון מופ"ת ידווח על הזכאות כ"נושאים בהכשרת מורים" • דמי ההשתלמות: לנרשמים מראש - 60 ש"ח; לנרשמים ביום העיון - 70 ש"ח • ההרשמה באמצעות כרטיס אשראי בטלפון 03-6901406 (שלוחה 0), או באתר מכון מופ"ת, מדור ימי עיון: www.mofet.macam.ac.il/iun



מדע העצב, קוגניציה וחינוך
צוות חשיבה בין-אוניברסיטאי
בחסות המדען הראשי של משרד החינוך



מכון מופ"ת
בית ספר למחקר ולפיתוח תכניות
בהכשרת עובדי חינוך והוראה במכללות

יום עיון בנושא:

בין מוח לחינוך 3 - פענוח שפות המוח

בשיתוף עם צוות החשיבה הבין-אוניברסיטאי, הפועל ביוזמתו ובתמיכתו של המדען הראשי של משרד החינוך
יתקיים ביום שלישי, י"ט בכסלו תשס"ט, 16 בדצמבר 2008 במכון מופ"ת

בתכנית:	
9:30-8:45	התכנסות והרשמה
9:50-9:30	ברכות ודברי פתיחה ד"ר מיכל גולן, ראש מכון מופ"ת פרופ' אבישי הניק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב
10:30-9:50	המוח המוזיקלי: מוזיקה ויכולות אחרות ד"ר רוני יגר-גרנות, החוג למוזיקולוגיה, האוניברסיטה העברית בירושלים
11:10-10:30	היבטים קוגניטיביים ומוחיים של דו-לשוניות ד"ר ענת פריאור, המרכז לחקר המוח וללקויות למידה, אוניברסיטת חיפה
11:50-11:10	הפרעות קריאה על רקע גנטי והתפתחות פרופ' שלמה בנטינ, המחלקה לפסיכולוגיה והמרכז הבינתחומי לחישוביות עצבית, האוניברסיטה העברית בירושלים
12:30-11:50	הפסקה
14:00-12:30	מושבים מקבילים - מפגשים עם מרצי המליאה ומסגרות דיון נוספות בנושאים: קשרים בין הפרעות: ADHD, דיסלקציה ודיסקלקוליה, ד"ר אורלי רובינשטיין, המרכז לחקר המוח וללקויות למידה, אוניברסיטת חיפה מדע העצב, קוגניציה וחינוך- לאן? פרופ' אבישי הניק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב (מידע נוסף בכתובת: www.mofet.macam.ac.il/iun)
14:15-14:00	הפסקה
15:00-14:15	מה אתה עושה כשאתה קם בבוקר? הקשר בין שינה ותפקודי קשב, ריכוז ולמידה בילדי בית הספר פרופ' אבי שדה, ראש מעבדת השינה וראש מרכז אדלר לחקר ההתפתחות והפסיכולוגיה של הילד, החוג לפסיכולוגיה, אוניברסיטת תל אביב

ייתכנו שינויים בתכנית.

חברי ועדת ההיגוי (לפי סדר א'-ב'):

זהבה בן-עמי, מכון מופ"ת; ד"ר מיכל גולן, ראש מכון מופ"ת; פרופ' אבישי הניק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב; דזירה מלול, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב; שרון נפרסטק, המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב; ליאורה שפיצר, מכון מופ"ת

ארגון: זהבה בן עמי, ראש מדור ימי עיון וכנסים

גמול השתלמות: ההשתלמות ביום העיון מקנה למורים במוסדות להכשרת עובדי הוראה צבירה של 6 שעות מתוך 14 השעות הנדרשות כמינימום שנתי לצבירת גמול בשנת לימודים אחת. מכון מופ"ת ידווח על הזכאות כ"נושאים בהכשרת מורים" • דמי ההשתלמות: לנרשמים מראש - 60 ש"ח; לנרשמים ביום העיון - 80 ש"ח • ההרשמה באמצעות כרטיס אשראי בטלפון 03-6901406 (שלוחה 0), 03-6901428 או בחנות הווירטואלית של מכון מופ"ת: <http://shop.macam.ac.il>

www.mofet.macam.ac.il/iun

מדור ימי עיון וכנסים: 03-6901430/7 ■ sliora@macam.ac.il

לפרטים
נוספים

מנגנונים מוחיים של ויסות- עצמי

אנדראה ברגר

המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

1. מהו ויסות-עצמי

המונח ויסות-עצמי מתייחס בהגדרתו הרחבה ליכולת לנטר ולווסת רגשות והתנהגות, לפעול להשגת מטרה רצויה ו/או להסתגל לדרישות הקוגניטיביות והחברתיות של מצבים פרטניים. כאשר מדובר על ויסות רגשי, על פי רוב הכוונה היא למאפייני עוצמה וזמן של התגובה הרגשית (Thompson, 1994). באופן מפורט יותר, מדובר ביכולת להיענות להוראה או לבקשה; ליזום התנהגות ו/או לחדול ממנה על פי דרישות הנסיבות; להתאים את העוצמה, התדירות ומשך הזמן של פעולות מילוליות ומוטוריות בסביבות חברתיות וחינוכיות; לדחות סיפוקים (השגת חפץ או מטרה נחשקים); לנקוט התנהגות נאותה/מקובלת חברתית בהעדר ניטור חיצוני, לווסת תגובתיות אמוציונאלית, וכו'.

ככל הנראה אנו לא מדברים על תהליך אחד ויחיד, כי אם לקבוצה של מנגנוני ויסות העומדים ביסוד היכולת לבצע ויסות-עצמי. יחד עם זאת, נראה שישנו גורם אחד משותף המשפיע על מנגנוני הוויסות השונים. גורם זה הינו ההיבט הניהולי של הקשב (Posner & Rothbart, 1998, 2005; Ruff & Rothbart, 1996) במילים אחרות, על פי מודל זה, הקשב הניהולי הינו ההיבט המרכזי בהתפתחותו של ויסות-עצמי, והינו הבסיס לשליטה מעכבת, לאסטרטגיות של פתרון בעיות, ולניטור-עצמי.

ישנם הבדלים אינדיבידואלים גדולים ביכולת לויסות-עצמי ונראה שיש להבדלים אלה הלשכות חשובות ביותר בהתמודדות של הילד עם האתגרים האקדמיים והחברתיים. כך הודגם למשל במחקר המפורסם Mischel, Shoda, & Rodriguez (1989). במחקר מפורסם זה נבדקה היכולת של ילדים בני 4 לדחות סיפוקים. בפרדיגמה הניסויית הבסיסית, מציגים בפני

הילד שני פרסים אפשריים – אחד גדול ואחד קטן (למשל מרשמלו אחד לעומת שניים גדולים יותר). המשימה שלו הינה להמתין בחדר לבדו עד שהנסיין ישוב, כאשר לפניו מונחים על השולחן שני הפרסים ופעמון. אם הילד ימתין עד הסוף (כ-15 דקות), הוא יקבל את הפרס הגדול. במידה והילד אינו יכול/רוצה להמתין עוד, הוא רשאי לצלצל בפעמון לפני הזמן ולסיים כך את ההמתנה. במקרה זה הוא יאלץ להסתפק בפרס הקטן. מודדים את אורך הזמן שבו הילד מצליח "להחזיק מעמד" לפני שמצלצל בפעמון. בסדרה ארוכה של מחקרים נמצא שהיכולת לדחות את הסיפוק (ולהמתין זמן ארוך יותר) מנבא השתלבות מוצלחת יותר של הילד בבית הספר. זאת ועוד, במעקב אורך של יותר מ-10 שנים נמצא שאותם ילדים שחיכו יותר, היו בגיל ההתבגרות מסוגלים יותר לעמוד בפני פיתויים ולהתמודד עם מצבים מתסכלים. כמו כן נמצא שאותם ילדים אף השיגו ציונים גבוהים יותר במבחן הכניסה לקולג'.

קשרים בין יכולת ויסות-עצמי להצלחה אקדמית בגיל בית הספר נמצאו גם במחקרים רבים נוספים (Blair & Razza, 2007; Bull & Scerif, 2001; Fabes, Martin, Hanish, Anders, & Madden-Derdich, 2003; NICHD Early Child Care Research Network, 2003; Valiente, Lemery-Chalfant, Swanson, & Reiser, 2008)

יכולת ויסות-עצמי טובה מאפשרת ככל הנראה התמודדות טובה יותר עם המשימות המובנות הנדרשות במסגרת החינוכית, ומאפשרות לילד לארגן את ההתנהגות ולהתמודד עם הדרישות שהמסגרת החינוכית מציבה בפניו. מעניין אולי אף יותר, שיכולת הויסות העצמית משפיעה גם על ההשתלבות החברתית. כך נמצא, שילדים בעלי יכולות ויסות גבוהות יותר בגיל הגן מראים מיומנויות חברתיות גבוהות יותר בגיל בית הספר. הם מקובלים יותר ע"י קבוצת השווים, הינם בעלי נטייה פחותה יותר לבעיות התנהגות מוחצנות כגון אלימות ואף מפותחים יותר בתחומי מצפון ומוסר (Eisenberg, Smith, Sadovsky, & Spinrad, 2004).

ילדים אינם נולדים עם יכולת ויסות-עצמי בשלה, אלא יכולת זו מתפתחת בהדרגה במהלך הילדות. התפתחותה מושפעת הן מגורמים מולדים, כגון תכונות גנטיות, והן מהתנסויות החל מראשית החיים (Berger, et al., 2007). בינקות ילדים מפגינים יכולות ויסות מסוימות (Kopp, 1982), בעיקר בויסות היבטים פיזיולוגיים כגון הסדרת הנשימה אחרי בכי, והסטת מבט מגירוי אינטנסיבי מידי ה"מציף" וגורם לעוררות יתר.

הצורה הפרימיטיבית הראשונה של שליטה ניהולית מגיעה לידי בשילה סמוך לתום השנה הראשונה לחיים. ממחקרים על הושטת יד שנעשו בקרב תינוקות וגורי קופים עולה כי התפתחותה של התנהגות כזו דורשת יכולת לתכנן ולהוציא לפועל רצפי-פעילות וכן את היכולת לעכב פעולות רפלקסיביות מסוימות או נטיות תגובה דומיננטיות. פיא'לה סבר כי תינוקות מתקשים בהבנת עצמים ותכונותיהם, לרבות היחסים המרחביים שלהם. אף על פי כן, נראה כי תינוקות רכים, אפילו בגיל חמישה חודשים, מסוגלים לתפוס את מושג העצם אולם הם מתקשים להפגין את ההבנה הזו באמצעות הושטת יד. התנהגות זו בקרב תינוקות נחקרה על ידי Adele Diamond ועמיתיה שעשו שימוש במספר פרדיגמות. באחד הניסויים הוצבו לפני תינוק תיבה מפרספקס שקוף ולבנת עץ שהונחה לעתים בתוכה ולעתים מחוצה לה. תינוקות הצליחו לקחת את הלבנה בידיהם כאשר התאפשר להם מסלול ישיר אליה (כאשר הונחה לפני התיבה, צמוד לדופן הקדמית שלה, או במרכז התיבה, מרוחקת מהדופן הקדמית). ברם, כאשר הלבנה הונחה בתוך התיבה, מאחורי הדופן הקדמית וצמוד אליה, תינוקות נכשלו בלקיחתה. כדי לקחת בידיהם את העצם המבוקש במצב האחרון היה עליהם לבצע רצף של שתי תנועות כדי שידם לא תיתקל בדופן הקדמית של התיבה: תנועה ראשונה אשר תרחיק אותם מן העצם ותנועה שנייה אשר תקרב אותם חזרה אל העצם. יתרה מזאת, כאשר התינוקות נגעו בדופן התיבה, באופן רפלקסיבי הם לפתו אותה או הרתיעו את ידם. לעתים נדירות המשיכו תינוקות בני שבעה חודשים בניסיונות להגיע אל הלבנה. לעומת זאת, בקרב תינוקות בני עשרה חודשים התנהגויות רפלקסיביות מעין אלה לאחר נגיעה בדופן התיבה היו נדירות יותר. תינוקות אלה הצליחו לקחת

את הלבנה בידם בנסיבות הללו. נראה כי התינוקות הבוגרים יותר פיתחו יכולת לבצע פעולת השגה/הושטה הדורשת הן שינוי כיוון והן עיכוב תגובות רפלקסיביות של היד. דיימונד גילתה סימן נוסף לשליטה בקונפליקט קוגניטיבי המתרחשת בגילים הללו, שליטה הקשורה לפרדיגמה הקלאסית שפותחה בידי פיאז'ה, מטלת A-not-B. בניסוי זה מתרגלים ילדים להושיט יד אל עצם החבוי במיקום A, ולאחר מכן נבחנת יכולתם לחפש את העצם כשהוא מוחבא במיקום B. ילדים בני פחות משנים-עשר חודשים נוטים לחפש את העצם במקומו הקודם, אף על פי שראו את העצם נעלם מאחורי מיקום B. לאחר גיל שנה, ילדים מפתחים יכולת לעכב את הנטייה התגובתית הדומיננטית-רפלקסיבית כלפי מיקום A המתורגל, ומושיטים את ידם אל מיקום B החדש (Diamond, 1991).

אך נראה שרק בהגיעם לגיל הגן נכנסים ילדים לשלב של ויסות-עצמי אמיתי והם רוכשים יכולת הולכת ומשתפרת להשתמש בכללים, אסטרטגיות חדשות להנחיית התנהגותם (Kopp, 1982, 1989). לדוגמא, אחד המנגנונים החשובים בהם ילדים מתחילים להיעזר הינו הדיבור הפרטי. הדיבור הפרטי הינו מנגנון חשוב המאפשר לילד שליטה בפעולות ובמחשבות (Berk & Winsler, 1995; Vygotsky, 1962). בגיל זה ילדים מתחילים להפגין שיפור ניכר ביכולת להימנע מתגובה או לבצע תגובה לא תואמת, כפי שהודגם במטלות ניסוייות שתוכננו בידי Luria (Beiswenger, 1970; Diamond & Taylor, 1996; Luria, 1966; Miller, Shelton, & Flavell, 1968). ככלל, נראה כי בין הגילאים 3-5 שנים מתחוללת קפיצה משמעותית ביכולתם של ילדים לתמך בין שני חוקים העומדים בסתירה זה לזה (Zelazo & Jacques, 1996). בין גיל 2-4 שנים חל גם שיפור בתפקוד במצבי קונפליקט אחרים שבהם נדרשו ילדים לבטל נטיית תגובתית דומיננטית-רפלקסיבית ולהחליפה בתגובה חלופית המעוררת קונפליקט (Gerardi-Caulton, 1984; Reed, Pien, & Rothbart, 2000). ואולם, התפתחות תהליך הוויסות-עצמי אינה נגמרת בשום פנים ואופן בגיל הרך; אדרבה, היא רק מתחילה. כישורי ויסות-עצמי ופונקציות ניהוליות המתחילים להופיע בשנים הראשונות לחיים, ממשיכים להתפתח לכל אורך שנות

הילדות וגיל ההתבגרות (Barkley, 1997; Bronson, 2000; Welsh, 2001). למעשה, את כל תהליך התפתחות הוויסות העצמי המתואר לעיל ניתן לראות כמעבר הדרגתי משליטה חיצונית לשליטה פנימית או עצמית (Bronson, 2000; Schore, 1994; Sroufe, 1995). לוח הזמנים של התהליך האונטוגני הזה מוכתב כפי הנראה על ידי קצב הופעתן של יכולות קוגניטיביות גבוהות, ובמיוחד, בשילת ההיבטים ניהוליים של קשב (Posner & Rothbart, 1998; 2000).

2. כיצד ניתן לחקור יכולות ויסות

לאור המתואר בפרק הקודם בנוגע ההשלכות החשובות שיש ליכולת ויסות-עצמי על תפקוד הילד בהמשך הילדות, הן מבחינה אקדמית והן מבחינה חברתית, חשוב שמערכות העוסקות בחינוך יתוודו לידע הנאסף בתחום המחקר הענף אשר עוסק בחקר יכולת זו, הן מבחינת התהליך הנורמטיבי של התפתחותה, הן מבחינת מדידת ההבדלים הבין-אישיים ביכולת זו והן מבחינת חקר המשתנים השונים היכולים להשפיע על התפתחותה.

שאלה ראשונה שנשאלת הינה כיצד ניתן לחקור יכולת ויסות-עצמי באופן מדעי-שיטתי? מבחינת סוג המטלות המעבדתיות המשמשות את החוקרים לבחינת יכולת ויסות-עצמי, אלה בעיקר מטלות בהן צריך להתמקד במימד אחד של הגירוי ולהתעלם (לעשות אינהיביציה) למימדים לא רלוונטיים, ומטלות בהן צריך לעכב את התגובה בכלל. הצורך למיקוד הקשב, התעלמות ממסיחים, פתירה של קונפליקט בין תגובות ושל עיכוב תגובות, מהווים את התהליכים המרכזיים בהם נדרש קשב סלקטיבי וניהולי.

דוגמא לשתי פרדיגמות מאוד שכיחות בתחום זה הינם מטלת ה- *Stroop color naming* (MacLeod, 1991; Stroop, 1935) והמטלה מסוג *flanker* (Eriksen & Eriksen, 1974). במטלה של Stroop, שמות הצבעים מופיעים כשהם כתובים בצבעים שונים והנבדקים

מתבקשים לנקוב בשם צבע הדיו ולהתעלם מפשר המלה. צבע הדיו ופשר המלה עשויים להיות חופפים (למשל, המלה 'אדום' בדיו אדום), ניטראליים (למשל, xxx באדום) או סותרים (למשל, המלה 'כחול' בדיו אדום). כשלים בקשב מתגלים על פי רוב בשני אופנים: 1) ירידה ביעילות התגובה למטרה כאשר התכונות הלא-רלוונטיות של התצוגה מופיעות; ו-2) סימנים לעיבוד החומר הלא-רלוונטי (למשל, פשר של מילה) בייחוד כאשר הוא מפריע בעליל לעיבוד המטרה. במרוצת השנים נוצרו וריאציות רבות של מטלות אלו.

גרסה של אפקט Stroop תוכננה להתאים לפעוטות. במסגרתה מציגים תמונה פשוטה בצדו האחד של מסך מחשב, והילד מתבקש להגיב באמצעות לחיצה על כפתור התואם את הגירוי המוצג לו (Berger & Posner, 2000; Gerardi, 1997). הכפתור התואם עשוי להיות בצד של הגירוי (צעד תואם) או בצד הנגדי (צעד לא-תואם). הנטייה התגובתית הדומיננטית-רפלקסיבית היא ללחוץ על הכפתור בצד של המטרה, ללא קשר לזהותה. ואולם, המטלה דורשת מן הילד לעכב את הנטייה התגובתית הדומיננטית-רפלקסיבית ולהשתית את פעולותיו על זיהוי. היכולת לפתור את הקונפליקט הזה נמדדת על פי מידת הדיוק והמהירות של תגובות לחיצת המקש. הנתונים שנאספו עד כה מלמדים כי במהלך השנה השלישית לחיים מתחיל להתחולל שינוי בולט ברמת הקשב הניהולי. בביצועיהם של פעוטות צעירים יותר מראים שבמקום להתמודד עם הקונפליקט, הם בעיקר נוטים לחזור על תגובות קודמות שהם כבר ביצעו (Gerardi, 1997). נטייה לחזור על תגובות (perseveration) מקושרת עם שיבוש תפקודי פרונטאלי וממצא זה עולה בקנה אחד עם הרעיון כי קשב ניהולי נמצא עדיין בחיתוליו אצל ילדים בני 24 חודשים.

סוג קשה אף יותר של קונפליקט מציבה מטלה הדורשת ביצוע הוראות המתקבלות ממקור אחד ובו-זמנית עיכוב של הדחף לבצע הוראות ממקור אחר (Posner & Rothbart, 1998). משימת קונפליקט זו הינה הבסיס למשחק "המלך אומר". ממספר מחקרים אשר עשו שימוש בגרסת

בובות של המשחק עולה כי היכולת לבצע את המטלה הזו מופיעה בגיל ארבע (Carlson, 1997; Jones, Rothbart, & Posner, 2003; Reed et al., 1984). השינוי ההתפתחותי המרשים בשליטת קשב בגיל זה נתמך בידי מחקרים נוספים שכללו מטלות שביצוען כרוך בקונפליקט (Gerstadt, Hong, & Diamond, 1994; Jerger, Martin, & Pirozzolo, 1988; Zelazo, Reznick, & Pinon, 1995). במסגרת משחק "המלך אומר", ילדים בני מתחת לגיל 38 חודשים מפגינים קושי גדול לעכב את תגובותיהם (Jones, Rothbart, & Posner, 2003).

משחק "המלך אומר" מהווה למעשה גרסה לא ממוחשבת המתאימה לילדים קטנים, של מטלה מעבדתית נפוצה לחקר עיכוב תגובה הנקראת Go/No-go. הרעיון הכללי של המטלה הוא להציג לנבדק סדרה ארוכה של שני סוגים של גירויים, בסדר מעורב ומקרי. לסוג אחד של גירויים הוא כן צריך להגיב ואילו לסוג השני הוא צריך לא להגיב. לדוגמא, במבחנים הממוחשבים בשם המשמשים כיום יותר ויותר לאבחון של ילדים עם הפרעת קשב והיפראקטיביות, מציגים על גבי המסך אות. אם האות היא למשל O (גירוי ה-Go), אזי הילד צריך להגיב אליה כמה שיותר מהר ע"י הקשה על מקש הרווח. לעומת זאת, אם האות המוצגת על גבי המסך הינה האות X (גירוי ה-No-go), הילד צריך לעכב את התגובה המוטורית ולהימנע מהקשה על המקש.

מטלה אף יותר מאתגרת הינה מטלה שבה צריך לעצור תגובה שכבר יצאה לדרכה. זו מטלה הידועה בשם Stop Signal (Logan & Cowan, 1984). במטלה זו הנבדק להגיב בכל צעד (בדרך כלל במסגרת מטלה אבחנה בין שני סוגים של גירויים (גירוי ה-Go), לדוגמא, אם זו האות P הקש על מקש ימין ואם זו האות Q הקש על מקש שמאל), אלא אם נשמע צליל שפירושו "עצור". ככל שמרווח הזמן בין הופעת גירוי ה-Go לבין צליל ה-Stop גדול יותר, כך קשה יותר לנבדק לעצור את התגובה שלמעשה כבר "יצאה לדרכה". מציאת אותה נקודה בזמן שבה האדם

אינו יכול כבר לעצור את תגובתו מהווה מדד עדין ליכולת העיכוב שלו. כך למשל (Williams, Ponesse, Schachar, Logan, & Tannock, 1999) אשר בחנו את התפתחות יכולת העכבה בעזרת הביצועים במשימת ה-Stop Signal בטווח הגילאים 6-81 שנים מצאו כי יכולת העכבה משתפרת במהלך הילדות וההתבגרות (גילאי 6-17) אך נצפית נסיגה איטית והדרגתית במהלך הבגרות (גילאי 18-81).

3. מהם המנגנונים המוחיים הקשורים לויסות-עצמי

הידע השאלה מהם המנגנונים המוחיים הקשורים לויסות-עצמי מתבסס על שילובם של מקורות מידע מגוונים ביותר. מקורות אלה כוללים מחקרים על חולים עם פגיעות מוחיות ממוקדות, מחקרים על נבדקים בגילאים שונים עם שיטות שונות של הדמיה מוחית, מחקרים על בעלי חיים עם רישומים מתאים בודדים, מחקרים עם בעלי חיים אשר מבצעים בהם פגיעה מוחית ממוקדת, מחקרים על ילדים הסובלים מתסמונות ייחודיות ובדיקת השפעת תרופות שונות על התנהגותם, ועוד.

למשל, במחקר של Adele Diamond, אשר תואר לעיל, בכדי להבין את ההתפתחות המוחית המתרחשת אצל תינוקות אדם ומאפשרת את ההתפתחות ההתנהגותי הנצפית במטלת תיבת הפרספקס השקוף ומטלת A-not-B, חוקרת זו אספה ראיות מקופים (גורים ובוגרים) עם פגיעות מוח ממוקדות. כך, לגבי מטלת תיבת הפרספקס השקוף, היא מצאה שהתפתחות השליטה המוטורית המאפשרת ביצוע הושטת יד (reaching) רצונית ועיכוב של סגירת היד בטרם עת הרפלקסיבית, הינו ככל הנראה תוצאה מבשילה של אזור בקליפת המוח הפרונטאלית הנקרא "האזור המוטורי המשני" (SMA) (Diamond, 1991). לעומת זאת, מטלת A-not-B, דורשת עיכוב של תגובה שכבר חוזקה ו"זיכרון עבודה" בו ניתן לשמור ולעדכן מידע לגבי מיקום הימצאותו של החפץ שאותו הילד מחפש. מחקרה עם קופים מציעים שההתפתחות הנדרשת

המקרה זה מושתת על בישלתו של אזור אחר בקליפת המוח הפרונטאלית הצידיית הנקרא dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) (Diamond, 1991). כך, פגיעה ב-DLPFC אצל קופים בוגרים גורמת לטעות במטלת A-not-B, בעוד שקופים בוגרים רגילים בדרך כלל מצליחים במטלה זו.

בסדרת מחקרים נוספת עם ילדים בעלי תסמונת ייחודית, Adele Diamond חיזקה מסקנה זו לגבי הקשר בין יכולת עיכוב וזיכרון עבודה הנדרשים במטלת A-not-B ואזור המוח ה-DLPC וקישרה בין פעילות מוחית זו לבין החומר העצבי (ניירו-טרנסמיטור) הנקרא דופמין. התסמונת בה החוקרת התמקדה נקראת Phenylketonuria (PKU). זאת תסמונת מטבולית שגוררת הצטברות של חומר הנקרא Phe ובעקבותיו מחסור בדופמין. בהיעדר טיפול, ילדים עם PKU מפתחים פיגור קשה. טיפול הולם מתחילת החיים מונע פגיעה קשה זו ומאפשר התפתחות פחות או יותר תקינה, אך גם במקרים אלה ישנן רמות מעל הנורמה של Phe ומחסור מסוים בדופמין, יחסית לילדים בריאים. מאחר ובקליפת המוח הפרונטאלית הצידיית הניורונים הדופמינרגיים רגישים במיוחד למחסור בדופמין, Diamond שיערה שפונקציות שקשורות לדופמין ומתווכות ע"י אזור מוחי זה עשוי להיפגע במידה מסוימת אפילו אצל ילדים עם PKU הנמצאים בטיפול. הפונקציות שהיא שיערה שייפגעו במיוחד: עיכוב וזיכרון עבודה. לכן שיערה שבמטלה כגון A-not-B יהיו שונים מקבוצות השוואה. היא מצאה שקבוצת הילדים עם רמות גבוהות יחסית של Phe היו פחות טובים במטלה זו (Diamond, Trevor, Calendar, & Drain, 1997). במחקר המשך היא בדקה שוב את אותם הילדים בגילאים מאוחרים יותר והראתה שהם נמוכים יותר מקבוצת השוואה בעזרת מטלות קונפליקט נוספות, כגון מטלה הנקראת ה-day-night Stroop. באופן כללי החוקרת מצאה שהילדים עם רמות גבוהות יחסית של Phe פיתחו IQ בטווח הנורמה אך נמוך מהנורמאליים בכ- 7 נקודות.

באופן כללי, אם נקדים את המאוחר, המסקנה מהמחקרים הרבים שיפורטו בהמשך הפרק, היא שהמבנים העיקריים בקליפת המוח שקשורים בקשב ניהולי – בייחוד מצבי קונפליקט ועיכוב- הם אותו אזור בקליפת המוח הפרונטאלית הצידיית שהופיע המחקרים של Diamond, דהיינו ה-DLPFC, ומבנה הנקרא ACC) anterior cingulate cortex). במחקרים מסוימים נמצאה מעורבות גם של ה-insula ושל ה-inferior frontal cortex. כמו כן, מעורבים בסוג כזה של תהליכים גם מבנים תת-קורטיקאליים, כגון גרעיני הבסיס (במיוחד ראש ה-caudate). מבחינת החומרים הפעילים במערכת מוחית זו, נראה שבהתאמה עם מחקריה של Diamond, אכן נמצאו עדויות תומכות רבות לכך שהחומר הפעיל הוא הניורטרנסמיטר דופמין.

מחקרי הדמיה מוחית על מצבים הדורשים בקרה מוגברת כגון התמודדות עם קונפליקט וסינון

של מידע לא רלוונטי

מחקרים הדמיה רבים אשר השתמשו בוריאציות שונות של מטלת ה-Stroop במתודולוגית ה-fMRI מראים פעילות של ה-ACC ושל ה-DLPFC (Kerns et al., 2000; Bush, Luu, & Posner, 2000; MacDonald, Cohen, Stenger, & Carter, 2000; Zysset, Muller, Lohmann, & von Cramon, 2001). מחקרים אלה מראים שבמצבי קונפליקט יש זרימה מוגברת של דם מחומצן אל אזורי מוח אלה. עליה זו נחשבת עדות לעליה בפעילות באותם מבנים מוחיים. ממצאים דומים נמצאו במטלת ה-flakers. במטלה זו מוצאים פעילות מוגברת בשני מבנים מוחיים אלה בצעדים בהם המסיחים הם incongruent (דהיינו סותרים את התגובה שהנבדק צריך להפיק), לעומת צעדים בהם המסיחים congruent (דהיינו תואמים לתגובה שהנבדק צריך להפיק) (Botvinick, Cohen, & Carter, 2004).

ממצאים דומים מתקבלים בעזרת מתודולוגיה המבוססת על מדידת הפעילות החשמלית המוחית במקום הפעילות ההמו-דינמית שה-fMRI מודד. זאת מתודולוגית ה-EEG/ERP. במחקרים מסוג זה מקבלים פעילות בעלת מתח חשמלי שלישי שמקורה ב-ACC כאשר הנבדק מבצע

טעות (Error) ERN מכונה (Falkenstein et al., 2000; Gehring et al., 1993). גל זה מכונה (Error) ERN (Related Negativity). ניתן לקבל פעילות דומה ב-ACC גם כאשר צופים במידע שגוי המפר את ציפיותיו של הנבדק (Tzur & Berger, 2007).

בסיכום של van Veen & Carter (2006) אשר הופיע בירחון Current Directions in Psychological Science, מוצג מודל לפיו ה-ACC מאתר מצבי קונפליקט ומאותת על כך ל-DLPFC. על פי מודל זה, ה-DLPFC אחראי על שמירת כללי המטלה הנוכחית (זיכרון עבודה) והתאמת ההתנהגות בהתאם למשוב המתקבל מה-ACC. כך, במידה והנבדק מבצע טעות, ה-ACC מתאר זאת ופעילותו מאותתת על כך וה-DLPFC אחראי על הטיית ההתנהגות בהתאם, לדוגמא, ע"י האטה של התגובה בצעד הניסויי הבא. על פי המודל של van Veen & Carter (2006) ושל (Botvinick et al., 2004), עיקר הפעילות של ה-ACC קשורה לבקרה על פעולות של הנבדק עצמו והשוואתן למה שמצופה או לדרישות המטלה. יחד עם זאת, הממצאים של Tzur & Berger אשר צוטטו לעיל מעלים את האפשרות שה-ACC מגיב לחוסר התאמה בזרם המידע, כאשר המקור אינו חייב כלל להיות משוב על פעולה שהנבדק מבצע בעצמו. ה"קונפליקט", "חוסר ההתאמה" או "הפרת הצפייה" עשוי להתעורר בתוך זרם המידע, גם ללא שום קשר לפעילותו ל הנבדק.

בנוסף למבנים המוחיים אשר צוינו עד כה בפרק זה, (Bunge, Dudukovic, Thomason, Vaidya, & Gabrieli, 2002) מצאו שאצל מבוגרים, הפעילות ב- insula הימנית נמצאה בקורלציה חיובית גבוהה עם הצלחה בסינון מידע לא רלוונטי; דהיינו בהתעלמות נכונה ממסיחים לא תואמים (incongruent) במטלת ה-flankers.

מחקרי הדמיה מוחית במצבי עיכוב כגון מטלת ה-Go/No-go

לגבי המבנים המוחיים המעורבים במטלות עיכוב, מחקרי הדמיה מראים שהמבנים החשובים הינם האזורים הפרונטו-לטרליים. נדמה שהשאלה האם האזור הקריטי ביותר לצורך עיכוב הינו

זה בצד ימין של המוח, או שנדרשת פעילות דו-צדדית. כך למשל, בסקירה של מספר גדול של מחקרי הדמיה אשר השתמשו במטלות הדורשות עיכוב, נמצא שקליפת המוח הפרה-פרונטאלית, **בעיקר הימנית**, מעורבת בתהליך זה (Aron & Poldrack, 2005). לעומת זאת, במחקרים אחרים הפעילות היא דו-צדדית (Durstion et al., 2002; Rubia et al., 2000). ואילו אצל (Bunge et al., 2002) נמצאה פעילות דו צדדית, אך כאשר הם חישוב את האזורים הפעילים ביותר במשותף במטלת עיכוב (go/no-go) ובמטלת סינון (flankers) כאחד, אזי נמצא שפעילות באזור ה-DLPFC הימני הינה משמעותית יותר. מבנים מוחיים נוספים המגויסים אצל מבוגרים במצבי עיכוב הינם ראש ה-caudate (Durstion & Casey, 2006), וגם ה-ACC (וגם אזורים יותר אחוריים של ה-cingulate, אזורים באונה הקודקודית ועוד (Bunge et al., 2002)). על פי (Durstion et al., 2002), אצל מבוגרים, ככל שהפעילות ב-left ACC, left caudate, ו-bilateral inferior frontal gyrus מוגברת יותר, כך הביצועים טובים יותר. במילים אחרות, ככל שהם מצליחים לגייס את האזורים אלה בזמן ביצוע המטלה, כך הם מצליחים יותר בעיכוב התגובה בצעדי no-go.

ישנן עדויות לכך שה-ACC וה-DLPFC מעורבים לא רק בעיכוב של פעולות מוטוריות כמו עיכוב תגובה במטלת Go/No-go, אלא גם כאשר הויסות הוא "פנימי", קשבי. למשל, כאשר הנבדק מתבקש "**לא לחשוב על דוב לבן**" (Mitchell et al., 2007). כמו כן, מעניין לציין שמוצאים פעילות גבוהה יותר ב-ACC בזמן ויסות קוגניטיבי על אמוציות. לדוגמא, במחקר הוצגו תמונות המעוררות אמוציות שליליות. הנבדקים התבקשו לחשוב עליהן אחרת, כך שהתמונות יראו בעיניהן כפחות שליליות. נמצא קשר חיובי בין פעילות מוגברת ב-ACC למידת ההצלחה של הנבדקים "לווסת" את דרגת האמוציונאליות של התמונות. במילים אחרות, ככל הפעילות ב-ACC הייתה גדולה יותר, כך הנבדקים העריכו את התמונות בסופו של דבר כפחות שליליות (Ochsner & Gross, 2005).

הבדלים בין ילדים למבוגרים בגיוס מבנים מוחיים במצבי ויסות-עצמי

תהליכי הבשילה המוחיים נמשכים לאורך כל הילדות ואף ההתבגרות. מחקרים ניסויים בבעלי חיים ובילדים מראים כי היווצרות סינפסות וצמצומן הם שלבי התפתחות שניתן להשפיע עליהם באמצעות התנסות חושית ומוטורית. נראה כי בקרב בני אדם, מתרחשים התהליכים הללו במועד מאוחר יותר בקליפת המוח הפרונטאלית, בהשוואה לאזורים חושיים ראשוניים. בנוסף נמצא שהיווצרות המיאלין, המייעלת את ההולכה העצבית במוח, נמשכת במגמת עלייה עד שלהי גיל ההתבגרות וראשית הבגרות (Sowell, Giedd et al., 1999; Paus et al., 1999; Thompson, Holmes, Jernigan, & Toga, 1999). זאת בניגוד לדפוס התפתחות החומר האפור, המגיעה לשיאה במהלך גיל ההתבגרות (גיל 12 אצל בנים ו-11 אצל בנות) והחל מגיל זה נמצאת במגמת ירידה (Sowell et al., 1999; Giedd et al., 1999).

מחקרי הדמיה המשווים מבוגרים וילדים באותה מטלה הדורשת ויסות-עצמי, מצביעים על כך שהיכולת המשופרת של המבוגרים לדכא הפרעה מגירוי מסיח ולעכב תגובות, בהשוואה לילדים (8-12), מיוחסת לשינוי באזורים המוחיים המגויסים בזמן המטלה. לדוגמא, מעבר מהפעלת אזור פרונטאלי שמאלי והאינסולה אצל ילדים, אל הרשת העצבית המקשרת בין האונה הקדמית, האונה הקודקודית והגרעינים הבסיסיים בצד ימין אצל מבוגרים (Bunge et al., 2002). ההפעלה המופחתת של אזורים מצחים שמאליים עם העלייה בגיל יכולה להיות מוסברת ע"י שינוי באסטרטגיה, קרי, צורך מופחת בדיבור פנימי.

הקשר בין הצלחה בעיכוב במטלת ה-Go/No-go לבין מעבר מהילדות לבגרות בגיוס ממוקד יותר של ה-DLPFC הימני נמצא גם במחקרים נוספים (Durstun & Casey, 2006).

4. הדגמת החשיבות של הפעילות התקינה של מבנים מוחיים פרונטאליים ושל פעילות תקינה של המערכת הדופמינרגית, לויסות-עצמי, בעזרת הפרעת הקשב וההיפראקטיביות .ADHD

פתולוגיות התפתחותיות אחדות עשויות להופיע בצורת לקויות בוויסות-עצמי. על מנת לתאר את ההשלכות של ויסות-עצמי לקוי בחרנו להתמקד בהפרעת קשב והיפראקטיביות (ADHD). הפרעת קשב זו היא מההפרעות הילדות הנפוצות ביותר, השכיחות שלה נעה בין 3 ל-5 אחוזים (American Psychiatric Association, 1994).

מזה למעלה מ-20 שנים, נתפסת ADHD כמורכבת משלושה תסמינים עיקריים והם, קשב-ממושך ירוד, אימפולסיביות, והיפראקטיביות (American Psychiatric Association, 1994). לקויות התנהגותיות אלו מופיעות בשלב מוקדם של הילדות, על פי רוב לפני גיל 7, ומתמידות לאורך כל שלבי ההתפתחות (Barkley, 1990; Hinshaw, 1994; Weiss & Hechtman, 1993). באחרונה, צומצמו שלוש הלקויות העיקריות לשתיים, כאשר היפראקטיביות ואימפולסיביות צורפו כלקות אחת. כתוצאה מכך, הוצעו שלושה תת-טיפוסים של הפרעה במהדורה הרביעית של Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders DSM-IV (1994) (בעיקר) חסר-קשב; (בעיקר) היפראקטיבי-אימפולסיבי; ושילוב של שתי הלקויות.

ההפרעה שכיחה יותר בקרב בנים מאשר בקרב בנות (American Psychiatric Association, 1994; Breton et al., 1999). הראיות מצביעות על כך שלהפרעה יש יסודות או גורמים גנטיים וסביבתיים גם יחד. לקרובים מדרגה-ראשונה של ילדים עם הפרעת-קשב סיכוי גבוה פי 7.6 ללקות בהפרעה מאשר לקרובים של ילדים ללא ההפרעה (Biederman et al., 1992). יתר על כן, 60% מן הילדים שאחד מהוריהם לוקה בהפרעה הינם בעלי סיכוי גבוה ללקות בה (Biederman et al., 1995). אומדני התורשתיות הגבוהים (75% עד 90%) להפרעת קשב במחקרי תאומים תומכים בקיומה של תרומה גנטית חזקה (Goodman & Stevenson, 1989; Larsson, Larsson, & Lichtenstein, 2004; Levy, Hay, McStephen, Wood, & Waldman, 1997; Rietveld, Hudziak, Bartels, van Beijsterveldt, & Boomsma, 2004), וכן ישנן ראיות רבות מתחום הגנטיקה המולקולארית מאשרות הן קיומם של גורמים

גנטיים להפרעה (Faraone & Biederman, 1998; LaHoste et al., 1996; Smalley et al., 1998). ואולם, נראה שגם גורמים סביבתיים תורמים לתסמונת: למשל, יחסים משפחתיים, יחסי הורה-ילד, ומצוקה משפחתית קשורים להתפתחות והחמרה של ההפרעה (Biederman et al., 1995; Cunningham & Barkley, 1979; Jacobvitz & Sroufe, 1987). ילדים עם הפרעות קשב מהווים נטל כבד על שירותי החינוך, הבריאות והרווחה (Loeber, 1990). במרוצת ההתפתחות, מקושרת הפרעת קשב זו עם קשיים כמעט בכל תחומי החיים; החל בהישגים נמוכים בלימודים, תפקוד ירוד בבית הספר, השעיות מלימודים ואף סילוק מבית הספר; ביחסים גרועים עם קבוצת השווים ועם בני המשפחה, חרדה ודיכאון, תוקפנות, בעיות התנהגות ועבריינות, המשך בהתנסות מוקדמת בשימוש בסמים, מעורבות בתאונות דרכים ונהיגה במהירות מופרזת, וכלה בקשיים בגיל מבוגר ביחסים חברתיים, בנישואים ובתעסוקה (Barkley, 1997; Barkley, Fischer, Edelbrock, & Smallish, 1990; Barkley, Guevremont, Anastopoulos, DuPaul, & Shelton, 1993; Barkley, Murphy, & Kwasnik, 1996; Biederman et al., 1992; Murphy & Barkley, 1996; Nadeau, 1995; Weiss & Hechtman, 1993). סיכונים להתפתחותיים עשויים להיות מוחרפים במקרים בהם יש קומורבידיות, דהיינו, קיום בו זמנית, של בעיות התנהגות נוספות כגון הפרעת התנהגות ותוקפנות (Conduct Disorder) (Barkley et al., 1990; Barkley et al., 1993; Hinshaw, 1994, 1992, 1987). הטיפול בהפרעת קשב והיפראקטיביות כולל על פי רוב ייעוץ להורים, למורים ולמשפחה על טיבה ומאפייניה של ההפרעה; הכשרת הורים ומורים בטכניקות ניהול התנהגות; משאבי חינוך מיוחדים; ותרופות פסיכו-אקטיביות (Barkley, 1997).

בניסויים קוגניטיביים שנערכו עם סוג המטלות שפורטו בפרק הקודם, מפגינים ילדים הלוקים בהפרעת קשב והיפראקטיביות יכולת ירודה במיוחד בשליטה מעכבת, בין אם מוטורית [no-go/stop signal], ומטלת סקדה לכיוון הנגדי (anti-saccade tasks) [ובין אם קוגניטיבית

(מטלות סטרופ ו-flanker). כמו כן, הם מפגינים יכולת ירודה במטלות הדורשות קשב ממושך (Chae, 2001; Weyandt, 2002). קיימות ראיות גם ללקות בביצוע מטלות הדורשות תגובה לעונשים ולפרסים, ברמות פיזיולוגיות והתנהגותיות (ראה סקירה מרחבת אצל (1997; see review in Nigg, 2001).

ראיות לאבנורמליות באזורי מוח קדמיים בהפרעת קשב והיפראקטיביות – פתולוגיות של אזורים קדמיים במוח המקושרים עם קשב ניהולי ויכולת עיכוב (וכן דריכות קשבית) נמצאו בשכיחות גבוהה אצל לוקים בהפרעת קשב והיפראקטיביות (Berger & Posner, 2000). נמצאו הבדלים בין ילדים הלוקים בתסמונת לבין ילדי קבוצות השוואה בנפח אזורים מוחיים המעורבים בשליטה מעכבת על תגובות מוטוריות, כגון ה-DLPFC וחלק מגרעיני הבסיס (ה-caudate nucleus) (Aylward et al., 1996; Filipek et al., 1997). אכן, אחת הסברות לגבי מהות ההפרעה טוענת שהיא קשורה לעיכוב בבשילה של אזורי קליפת המוח הקדמיים ובעיקר של התייעלות ההולכה העצבית ע"י מיילין באזורים אלה (Shaw et al., 2007). אצל ילדים המפגינים קשיים בוויסות-עצמי, נמצאו פחות חומר לבן ואפור באונה הפרונטאלית בהשוואה לקבוצות ביקורת של ילדים בני אותו גיל (Mostofsky, Cooper, Kates, Denckla, & Kaufmann, 2002).

לאחרונה התפרסמו מספר מחקרי מטה-אנליזה אשר מסכמים את העדויות להבדלים מבניים בין ילדים עם ADHD לילדי השוואה. על פי פרסומים אלה, ההבדלים השיטתיים ביותר שנמצאו מבחינת גודל פיזי של מבנים מוחיים הינם בגודל ה-DLPFC, ה-caudate, חלקים מסוימים בצרבלום, ואזורים מסוימים של ה-corpus callosum (Seidman, Valera, & Makris, 2005; Valera, Faraone, Murray, & Seidman, 2007).

בנוגע לאבנורמליות תפקודית, בעת ביצוע מטלות מסוג Go/No-go ו- Stop-Signal, נתגלו חריגויות לעומת ילדי ביקורת הן במחקרי fMRI (Casey et al., 1997; Bush et al., 1999; Durston et al., 2003; Rubia et al., 1999) והן במחקרי EEG/ERP (Dimoska, Johnstone, Barry, & Clarke, 2003; Overtoom et al., 2003; Pliszka,) (Borcherding, Spratley, Leon, & Irick, 1997; Pliszka, Liotti, & Woldorff, 2000) לדוגמא, במחקר שם Durston et al (2003), נמצאו הבדלים בפעילות ב-caudate בזמן מטלת go/no-go (אצל ילדי ביקורת נמצאה יותר פעילות בתנאי No-go מאשר ב-No, אך הבדל זה לא נמצא אצל הילדים עם ADHD). כמו כן, הם מצאו הבדלים, אם כי פחות חזקים, גם בהפעלת ה-ACC ואזורים פרה-פרונטאליים.

לקויות במערכת הדופמין ב-ADHD

מבחינה פיזיולוגית, ההשערה הרווחת ביותר מדברת על לקות במערכת הדופמנרגית בהפרעת קשב והיפראקטיביות. קשר זה התבסס תחילה על הצלחתן של תרופות מסוג methylphenidate כגון Ritalin בטיפול בהפרעה. מחקרי הדמיה אכן מראים שאחרי נטילת התרופה, הפעילות המוחית בזמן מטלות הדורשות ויסות-עצמי, כגון מטלת ה-Go/No-go, יותר תקינה ודומה לזו של קבוצות ביקורת, כך למשל במחקר של Vaidya & Gabrieli (1999).

מחקרים גנטיים מוצאים כיום קשר בין הפרעת ADHD לבין גנים המקודדים מרכיבים שונים של המערכת הדופמינרגית. כך נמצא במחקרים רבים קשר בין ADHD לבין הגן הנקרא DRD4 המקודד את הרצפטור מסוג 4 של דופמין (Diamond, 2007; Durston et al., 2005; Faraone et al., 1999; Faraone et al., 2005; Grady et al., 2003; Li, Sham, Owen, & He, 2006; Maher, Marazita, Ferrell, & Vanyukov, 2002; Rowe et al., 2001; Swanson et al., 2000).

כך גם נמצאו קשרים בין ההפרעה לבין הגנים המקודדים רצפטורים נוספים של דופמין, כגון DRD5 (Li et al., 2006; Lowe et al., 2004; Maher et al., 2002), וגן גנים המקודדים את האנזים COMT האחראי לניקוי הדופמין העודף במרחב תאי (Diamond, Briand, Fossella, & Curran, 2004). וכן הגן המקודד את ה-dopamine transporter שנקרא DAT1 (Gehlbach, 2004). (et al., 2001; Kirley et al., 2002; Maher et al., 2002; Yang et al., 2007).

5. סיכום

המונח וויסות עצמי מתייחס באופן כללי ליכולת להיענות להוראה או לבקשה; ליזום התנהגות או לחדול ממנה על פי דרישות הנסיבות. הגדרה זו אינה מתייחסת להליך אחד ויחיד, כי אם לקבוצה של מנגנוני ויסות העומדים ביסוד היכולת לבצע ויסות-עצמי. נראה שישנם גורמים משותפים המצויים ביסודן של כל צורות הוויסות העצמי. גורמים אלו הם בעיקר יכולת עיכוב, ניהול קשב, זיכרון עבודה.

מחקרים המבוססים על בעלי חיים, חולים עם פגיעות מוחיות ממוקדות, הדמיות מוחיות, והפרעות כגון הפרעת קשב והיפראקטיביות (ADHD), מצביעים על מעורבות של רשת של מבנים מוחיים, הכוללת בעיקר את ה-ACC, את ה-DLPFC, ואת גרעיני הבסיס, בעיקר את ה-caudate. היכולת לגייס מבנים אלה במצבים הדורשים ויסות עצמי, גדלה עם הגיל במהלך הילדות כפונקציה של בשילה מוחית והתייעלות הקשרים בין מרכיבי הרשת. החומר הפעיל במערכת זו הוא כנראה הניורטרנסמיטר דופמין (DA).

- American Psychiatric Association. (1994). Diagnostic and statistical manual of mental disorders DSM-IV (4th edition ed.). Washington, DC: American Psychiatric Press.
- Aron, A. R., & Poldrack, R. A. (2005). The cognitive neuroscience of response inhibition: Relevance for genetic research in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Biological Psychiatry*, 57, 1285-1292.
- Aylward, E. H., Reiss, A. L., Reader, M. J., Singer, H. S., Brown, J. E., & Denckla, M. B. (1996). Basal ganglia volumes in children with attention-deficit hyperactivity disorder. *Journal of Child Neurology*, 11(2), 112-115.
- Barkley, R. A. (1990). A critique of current diagnostic criteria for attention deficit hyperactivity disorder: clinical and research implications. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*, 11(6), 343-352.
- Barkley, R. A. (1997). Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: constructing a unifying theory of ADHD. *Psychological Bulletin*, 121(1), 65-94.
- Barkley, R. A., Fischer, M., Edelbrock, C. S., & Smallish, L. (1990). The adolescent outcome of hyperactive children diagnosed by research criteria: I. An 8-year prospective follow-up study. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 29(4), 546-557.
- Barkley, R. A., Guevremont, D. C., Anastopoulos, A. D., DuPaul, G. J., & Shelton, T. L. (1993). Driving-related risks and outcomes of attention

- deficit hyperactivity disorder in adolescents and young adults: a 3- to 5-year follow-up survey. *Pediatrics*, 92(2), 212-218.
- Barkley, R. A., Murphy, K. R., & Kwasnik, D. (1996). Motor vehicle driving competencies and risks in teens and young adults with attention deficit hyperactivity disorder. *Pediatrics*, 98(6 Pt 1), 1089-1095.
- Beiswenger, H. (1968). Luria's model of the verbal control of behavior. *Merrill-Palmer-Quarterly*, 14(4), 267-284.
- Berger, A., Kofman, O., Livneh, U., & Henik, A. (2007). Multidisciplinary Perspectives on Attention and the Development of Self-Regulation. *Progress in Neurobiology*, 82, 256–286.
- Berger, A., & Posner, M. I. (2000). Pathologies of brain attentional networks. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 24(1), 3-5.
- Berk, L. E., & Winsler, A. (1995). *Scaffolding children's learning: Vygotsky and early childhood education*. Washington, DC: National Association for the Education of Young Children.
- Biederman, J., Faraone, S. V., Keenan, K., Benjamin, J., Krifcher, B., Moore, C., et al. (1992). Further evidence for family-genetic risk factors in attention deficit hyperactivity disorder. Patterns of comorbidity in probands and relatives psychiatrically and pediatrically referred samples. *Archives of General Psychiatry*, 49(9), 728-738.
- Biederman, J., Faraone, S. V., Mick, E., Spencer, T., Wilens, T., Kiely, K., et al. (1995). High risk for attention deficit hyperactivity disorder among children

- of parents with childhood onset of the disorder: a pilot study. *American Journal of Psychiatry*, 152(3), 431-435.
- Blair, C., & Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child Development*, 78(2), 647-663.
- Botvinick, M. M., Cohen, J. D., & Carter, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 539-546.
- Breton, J. J., Bergeron, L., Valla, J. P., Berthiaume, C., Gaudet, N., Lambert, J., et al. (1999). Quebec child mental health survey: prevalence of DSM-III-R mental health disorders. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 40(3), 375-384.
- Bronson, M. B. (2000). *Self-regulation in early childhood: nature and nurture*. New York: Guilford Press.
- Bull, R., & Scerif, G. (2001). Executive functioning as a predictor of children's mathematics ability: inhibition, switching, and working memory. *Developmental Neuropsychology*, 19(3), 273-293.
- Bunge, S. A., Dudukovic, N. M., Thomason, M. E., Vaidya, C. J., & Gabrieli, J. D. (2002). Immature frontal lobe contributions to cognitive control in children: evidence from fMRI. *Neuron*, 33(2), 301-311.
- Bush, G., Frazier, J. A., Rauch, S. L., Seidman, L. J., Whalen, P. J., Jenike, M. A., et al. (1999). Anterior cingulate cortex dysfunction in attention-

- deficit/hyperactivity disorder revealed by fMRI and the Counting Stroop. *Biological Psychiatry*, 45(12), 1542-1552.
- Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(6), 215-222.
- Carlson, S. M. (1997). Individual differences in inhibitory control and children's theory of mind. Unpublished Doctor of Philosophy, University of Oregon, Eugene.
- Casey, B. J., Trainor, R., Giedd, J., Vauss, Y., Vaituzis, C. K., Hamburger, S., et al. (1997). The role of the anterior cingulate in automatic and controlled processes: a developmental neuroanatomical study. *Developmental Psychobiology*, 30(1), 61-69.
- Chae, P. K., Jung, H. O., & Noh, K. S. (2001). Attention deficit hyperactivity disorder in Korean juvenile delinquents. *Adolescence*, 36(144), 707-725.
- Cunningham, C. E., & Barkley, R. A. (1979). The interactions of normal and hyperactive children with their mothers in free play and structured tasks. *Child Development*, 50(1), 217-224.
- Curran, S., Mill, J., Tahir, E., Kent, L., Richards, S., Gould, A., et al. (2001). Association study of a dopamine transporter polymorphism and attention deficit hyperactivity disorder in UK and Turkish samples. *Molecular Psychiatry*, 6(4), 425-428.
- Diamond, A. (1991). Neuropsychological insights into the meaning of object concept development. In S. Carey & R. Gelman (Eds.), *The epigenesis of*

- mind: Essays on biology and cognition (pp. 67-110). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Diamond, A. (2007). Consequences of variations in genes that affect dopamine in prefrontal cortex. *Cerebral Cortex*, 17, i161-i170.
- Diamond, A., Briand, L., Fossella, J., & Gehlbach, L. (2004). Genetic and neurochemical modulation of prefrontal cognitive functions in children. *American Journal of Psychiatry*, 161(1), 125-132.
- Diamond, A., Prevor, M. B., Callender, G., & Druin, D. P. (1997). Prefrontal cortex cognitive deficits in children treated early and continuously for PKU. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 62(4), 1-208.
- Diamond, A., & Taylor, C. (1996). Development of an aspect of executive control: development of the abilities to remember what I said and to "do as I say, not as I do". *Developmental Psychobiology*, 29(4), 315-334.
- Dimoska, A., Johnstone, S. J., Barry, R. J., & Clarke, A. R. (2003). Inhibitory motor control in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: event-related potentials in the stop-signal paradigm. *Biological Psychiatry*, 54(12), 1345-1354.
- Durston, S., & Casey, B. J. (2006). What have we learned about cognitive development from neuroimaging? *Neuropsychologia*, 44(11), 2149-2157.
- Durston, S., Fossella, J. A., Casey, B. J., Hulshoff Pol, H. E., Galvan, A., Schnack, H. G., et al. (2005). Differential effects of DRD4 and DAT1 genotype on fronto-striatal gray matter volumes in a sample of subjects

- with attention deficit hyperactivity disorder, their unaffected siblings, and controls. *Molecular Psychiatry*, 10(7), 678-685.
- Durston, S., Thomas, K. M., Yang, Y., Ulug, A. M., Zimmerman, R. D., & Casey, B. J. (2002). A neural basis for the development of inhibitory control. *Developmental Science*, 5(4), 9-16.
- Durston, S., Tottenham, N. T., Thomas, K. M., Davidson, M. C., Eigsti, I. M., Yang, Y., et al. (2003). Differential patterns of striatal activation in young children with and without ADHD. *Biological Psychiatry*, 53(10), 871-878.
- Eisenberg, N., Smith, C. L., Sadovsky, A., & Spinrad, T. L. (2004). Effortful control: Relations with emotion regulation, adjustment, and socialization in childhood. In K. D. Vohs & R. F. Baumeister (Eds.), *Handbook of self-regulation: Research, theory, and applications* (pp. 259-282). New York, NY: Guilford Press.
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effect of noise letters upon the identification of a target letter in a non-search task. *Perception & Psychophysics*, 16, 143-149.
- Fabes, R. A., Martin, C. L., Hanish, L. D., Anders, M. C., & Madden-Derdich, D. A. (2003). Early school competence: the roles of sex-segregated play and effortful control. *Developmental Psychology*, 39(5), 848-858.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., & Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biological Psychology*, 51, 87-107.

- Faraone, S. V., & Biederman, J. (1998). Neurobiology of attention-deficit hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry*, 44(10), 951-958.
- Faraone, S. V., Biederman, J., Weiffenbach, B., Keith, T., Chu, M. P., Weaver, A., et al. (1999). Dopamine D4 gene 7-repeat allele and attention deficit hyperactivity disorder. *American Journal of Psychiatry*, 156(5), 768-770.
- Faraone, S. V., Perlis, R. H., Doyle, A. E., Smoller, J. W., Goralnick, J. J., Holmgren, M. A., et al. (2005). Molecular genetics of attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry*, 57(11), 1313-1323.
- Filipek, P. A., Semrud-Clikeman, M., Steingard, R. J., Renshaw, P. F., Kennedy, D. N., & Biederman, J. (1997). Volumetric MRI analysis comparing subjects having attention-deficit hyperactivity disorder with normal controls. *Neurology*, 48(3), 589-601.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4(6), 385-390.
- Gerardi, G. (1997). Development of executive attention and self-regulation in the third year of life. Unpublished Doctor of Philosophy, University of Oregon, Eugene.
- Gerardi-Caulton, G. (2000). Sensitivity to spatial conflict and the development of self-regulation in children 24-36 months of age. *Developmental Science*, 3(4), 397-404.

- Gerstadt, C. L., Hong, Y. J., & Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action: performance of children 3 1/2-7 years old on a Stroop-like day-night test. *Cognition*, 53(2), 129-153.
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., et al. (1999). Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, 2(10), 861-863.
- Goodman, R., & Stevenson, J. (1989). A twin study of hyperactivity: II. The aetiological role of genes, family relationships and perinatal adversity. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 30(5), 691-709.
- Grady, D. L., Chi, H. C., Ding, Y. C., Smith, M., Wang, E., Schuck, S., et al. (2003). High prevalence of rare dopamine receptor D4 alleles in children diagnosed with attention-deficit hyperactivity disorder. *Molecular Psychiatry*, 8(5), 536-545.
- Hinshaw, S. P. (1987). On the distinction between attentional deficits/hyperactivity and conduct problems/aggression in child psychopathology. *Psychological Bulletin*, 101(3), 443-463.
- Hinshaw, S. P. (1992). Academic underachievement, attention deficits, and aggression: Comorbidity and implications for intervention. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 60(6), 893-903.
- Hinshaw, S. P. (1994). Attention deficits and hyperactivity in children (Vol. vol. 29). Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Inc.

- Iaboni, F., Douglas, V. I., & Ditto, B. (1997). Psychophysiological response of ADHD children to reward and extinction. *Psychophysiology*, 34(1), 116-123.
- Jacobvitz, D., & Sroufe, L. A. (1987). The early caregiver-child relationship and attention-deficit disorder with hyperactivity in kindergarten: a prospective study. *Child Development*, 58(6), 1496-1504.
- Jerger, S., Martin, R. C., & Pirozzolo, F. J. (1988). A developmental study of the auditory Stroop effect. *Brain and Language*, 35(1), 86-104.
- Jones, L. B., Rothbart, M. K., & Posner, M. I. (2003). Development of executive attention in preschool children. *Developmental Science*, 6(5), 498-504.
- Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald III, A. W., Cho, R. Y., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, 303, 1023-1026.
- Kirley, A., Hawi, Z., Daly, G., McCarron, M., Mullins, C., Millar, N., et al. (2002). Dopaminergic system genes in ADHD: toward a biological hypothesis. *Neuropsychopharmacology*, 27(4), 607-619.
- Kopp, C. B. (1982). Antecedents of self-regulation: A developmental perspective. *Developmental Psychology*, 18(2), 199-214.
- Kopp, C. B. (1989). Regulation of distress and negative emotions: A developmental view. *Developmental Psychology*, 25(3), 343-354.
- LaHoste, G. J., Swanson, J. M., Wigal, S. B., Glabe, C., Wigal, T., King, N., et al. (1996). Dopamine D4 receptor gene polymorphism is associated with

- attention deficit hyperactivity disorder. *Molecular Psychiatry*, 1(2), 121-124.
- Larsson, J. O., Larsson, H., & Lichtenstein, P. (2004). Genetic and environmental contributions to stability and change of ADHD symptoms between 8 and 13 years of age: a longitudinal twin study. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 43(10), 1267-1275.
- Levy, F., Hay, D. A., McStephen, M., Wood, C., & Waldman, I. (1997). Attention-deficit hyperactivity disorder: a category or a continuum? Genetic analysis of a large-scale twin study. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 36(6), 737-744.
- Li, D., Sham, P. C., Owen, M. J., & He, L. (2006). Meta-analysis shows significant association between dopamine system genes and attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Human Molecular Genetics*, 15(14), 2276-2284.
- Loeber, R. (1990). Disruptive and antisocial behavior in childhood and adolescence: Development and risk factors. In F. Losel & K. Hurrelmann (Eds.), *Health hazards in adolescence* (Vol. 8, pp. 233-257). Oxford, England: Walter De Gruyter.
- Logan, G. D., & Cowan, W. B. (1984). On the ability to inhibit thought and action: A theory of an act of control. *Psychological Review*, 91, 295-327.
- Lowe, N., Kirley, A., Hawi, Z., Sham, P., Wickham, H., Kratochvil, C. J., et al. (2004). Joint analysis of the DRD5 marker concludes association with attention-deficit/hyperactivity disorder confined to the predominantly

- inattentive and combined subtypes. *American Journal of Human Genetics*, 74(2), 348-356.
- Luria, A. R. (1966). *Higher cortical functions in man*. Oxford, England: Basic Books.
- MacDonald, A. W., Cohen, J. D., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, 288, 1835-1838.
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review. *Psychological Bulletin*, 109(2), 163-203.
- Maher, B. S., Marazita, M. L., Ferrell, R. E., & Vanyukov, M. M. (2002). Dopamine system genes and attention deficit hyperactivity disorder: a meta-analysis. *Psychiatric Genetics*, 12(4), 207-215.
- Miller, S. A., Shelton, J., & Flavell, J. H. (1970). A test of Luria's hypotheses concerning the development of verbal self-regulation. *Child Development*, 41, 651-665.
- Mischel, W., Shoda, Y., & Rodriguez, M. L. (1989). Delay of gratification in children. *Science*, 244, 933-938.
- Mirchell, J. P., Heartherton, T. F., Kelley, W. M., Wyland, C. L., Wegner, D. M., & Maerae, C. N. (2007). Separating sustained from transient aspects of cognitive control during thought suppression. *Psychological Science*, 18(4), 292-297.

- Mostofsky, S. H., Cooper, K. L., Kates, W. R., Denckla, M. B., & Kaufmann, W. E. (2002). Smaller prefrontal and premotor volumes in boys with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry*, 52(8), 785-794.
- Murphy, K., & Barkley, R. A. (1996). Attention deficit hyperactivity disorder adults: comorbidities and adaptive impairments. *Comprehensive Psychiatry*, 37(6), 393-401.
- Nadeau, K. G. (1995). Life management skills for the adult with ADD. In K. G. Nadeau (Ed.), *A comprehensive guide to attention deficit disorder in adults: Research, diagnosis, and treatment* (pp. 191-217). Philadelphia, PA: Brunner/Mazel, Inc.
- NICHHD Early Child Care Research Network. (2003). Do children's attention processes mediate the link between family predictors and school readiness? *Developmental Psychology*, 39(3), 581-593.
- Nigg, J. T. (2001). Is ADHD a disinhibitory disorder? *Psychological Bulletin*, 127(5), 571-598.
- Ochsner, K. N., & Gross, J. J. (2005). The cognitive control of emotion. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(5), 242-249.
- Overtoom, C. C., Verbaten, M. N., Kemner, C., Kenemans, J. L., van Engeland, H., Buitelaar, J. K., et al. (2003). Effects of methylphenidate, desipramine, and L-dopa on attention and inhibition in children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *Behavioural Brain Research*, 145(1-2), 7-15.

- Paus, T., Zijdenbos, A., Worsley, K., Collins, D. L., Blumenthal, J., Giedd, J. N., et al. (1999). Structural maturation of neural pathways in children and adolescents: in vivo study. *Science*, 283(5409), 1908-1911.
- Pliszka, S. R., Borcharding, S. H., Spratley, K., Leon, S., & Irick, S. (1997). Measuring inhibitory control in children. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*, 18(4), 254-259.
- Pliszka, S. R., Liotti, M., & Woldorff, M. G. (2000). Inhibitory control in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: event-related potentials identify the processing component and timing of an impaired right-frontal response-inhibition mechanism. *Biological Psychiatry*, 48(3), 238-246.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (1998). Attention, self-regulation and consciousness. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 353, 1915-1927.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2000). Developing mechanisms of self-regulation. *Development and Psychopathology*, 12, 427-441.
- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (2005). Influencing brain networks: implications for education. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(3), 99-103.
- Reed, M., Pien, D., & Rothbart, M. K. (1984). Inhibitory self-control in preschool children. *Merrill-Palmer Quarterly*, 30, 131-148.
- Rietveld, M. J., Hudziak, J. J., Bartels, M., van Beijsterveldt, C. E., & Boomsma, D. I. (2004). Heritability of attention problems in children: longitudinal results from a study of twins, age 3 to 12. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45(3), 577-588.

- Rowe, D. C., Stever, C., Chase, D., Sherman, S., Abramowitz, A., & Waldman, I. D. (2001). Two dopamine genes related to reports of childhood retrospective inattention and conduct disorder symptoms. *Molecular Psychiatry*, 6(4), 429-433.
- Rubia, K., Overmeyer, S., Taylor, E., Brammer, M., Williams, S. C., Simmons, A., et al. (2000). Functional frontalisation with age: mapping neurodevelopmental trajectories with fMRI. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 24(1), 13-19.
- Rubia, K., Overmeyer, S., Taylor, E., Brammer, M., Williams, S. C., Simmons, A., et al. (1999). Hypofrontality in attention deficit hyperactivity disorder during higher-order motor control: a study with functional MRI. *American Journal of Psychiatry*, 156(6), 891-896.
- Ruff, H. A., & Rothbart, M. K. (1996). *Attention in early development: Themes and variations*. New York: Oxford University Press.
- Schore, A. N. (Ed.). (1994). *Affect regulation and the origin of the self: The neurobiology of emotional development*. Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Seidman, L. J., Valera, E. M., & Makris, N. (2005). Structural brain imaging of adult ADHD. *Biological Psychiatry*, 57, 1263-1272.
- Shaw, P., Eckstrand, K., Sharp, W., Blumenthal, J., Lerch, J. P., Greenstein, D., et al. (2007). Attention-deficit/hyperactivity disorder is characterized by a delay in cortical maturation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(49), 19649-19654.

- Smalley, S. L., Bailey, J. N., Palmer, C. G., Cantwell, D. P., McGough, J. J., Del'Homme, M. A., et al. (1998). Evidence that the dopamine D4 receptor is a susceptibility gene in attention deficit hyperactivity disorder. *Molecular Psychiatry*, 3(5), 427-430.
- Sowell, E. R., Thompson, P. M., Holmes, C. J., Jernigan, T. L., & Toga, A. W. (1999). In vivo evidence for post-adolescent brain maturation in frontal and striatal regions. *Nature Neuroscience*, 2(10), 859-861.
- Sroufe, L. A. (1995). *Emotional development: The organization of emotional life in the early years*. New York: Cambridge University Press.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Swanson, J. M., Flodman, P., Kennedy, J., Spence, M. A., Moyzis, R., Schuck, S., et al. (2000). Dopamine genes and ADHD. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 24(1), 21-25.
- Thompson, R. A. (1994). Emotion regulation: a theme in search of definition. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 59(2-3), 25-52.
- Tzur, G. & Berger, A. (2007). When Things Look Wrong: Theta Activity in Rule Violation. *Neuropsychologia*, 45, 3122-3126.
- Valera, E. M., Faraone, S. V., Murray, K. E., & Seidman, L. J. (2007). Meta-analysis of structural imaging findings in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Biological Psychiatry*, 61, 1361-1369.

- Valiente, C., Lemery-Chalfant, K., Swanson, J., & Reiser, M. (2008). Prediction of children's academic competence from their effortful control, relationships, and classroom participation. *Journal of Educational Psychology, 100*(1), 67-77.
- van Veen, V., & Carter, C. S. (2006). Conflict and cognitive control in the brain. *Current Directions in Psychological Science, 15*(5), 237-240.
- Vygotsky, L. S. (1962). *Thought and language*. Oxford, England: Wiley.
- Weiss, G., & Hechtman, L. T. (1993). *Hyperactive children grown up: ADHD in children, adolescents, and adults* (2nd ed.). New York: Guilford Press.
- Welsh, M. C. (2001). The prefrontal cortex and the development of executive function in childhood. In A. F. Kalverboer & A. Gramsbergen (Eds.), *Handbook of brain and behaviour in human development* (pp. 767-790). Great Britain: Kluwer Academic Publishers.
- Weyandt, L. L., Mitzlaff, L., & Thomas, L. (2002). The relationship between intelligence and performance on the test of variables of attention (TOVA). *Journal of Learning Disabilities, 35*(2), 114-120.
- Williams, B. R., Ponesse, J. S., Schachar, R. J., Logan, G. D., & Tannock, R. (1999). Development of inhibitory control across the life span. *Developmental Psychology, 35*(1), 205-213.
- Yang, B., Chan, R. C., Jing, J., Li, T., Sham, P., & Chen, R. Y. (2007). A meta-analysis of association studies between the 10-repeat allele of a VNTR polymorphism in the 3'-UTR of dopamine transporter gene and attention

deficit hyperactivity disorder. *American Journal of Medical Genetics. Part B, Neuropsychiatric Genetics*, 144(4), 541-550.

Zelazo, P. D., & Jacques, S. (1996). Children's rule use: Representation, reflection and cognitive control. In R. Vasta (Ed.), *Annals of child development: A research annual* (Vol. 12, pp. 119-176). Philadelphia, PA: Jessica Kingsley Publishers, Ltd.

Zelazo, P. D., Reznick, J. S., & Pinon, D. E. (1995). Response control and the execution of verbal rules. *Developmental Psychology*, 31(3), 508-517.

Zysset, S., Muller, K., Lohmann, G., & von Cramon, D. Y. (2001). Color-word matching Stroop task: Separating interference and response conflict. *NeuroImage*, 13, 29-36.

תרגול קוגניטיבי: מ-"ושיננתם לבניך" ועד לתוכנות אימון ממוחשבות

רות שלו

היחידה לנורולוגיה של הילד, מרכז רפואי שערי צדק, ירושלים

מבוא

לקויות למידה והפרעת קשב וריכוז (ADHD) הינם מצבים מגבילים (disabling) העלולים להשפיע על תחומים שונים וחיוניים בחיים כגון לימוד, מקצוע וחברה. הטיפול השגרתי בילדים עם בעיות אלו משתייך בד"כ לאחת מהאפשרויות הבאות: א) תמיכה הקשרית-קונטקסטואלית (כגון הקלטה קולית של ספרי קריאה לאלו הסובלים מדיסקסיה); ב) התערבויות טיפוליות שמטרתן לפצות על קושי ביכולת הביצועית (כגון שימוש בפנקס, שעון מעורר, אסטרטגיות לפתירת בעיות, כישורים לשליטה עצמית וכיו"ב); ג) תרופות פסיכו-סטימולנטיות.

לאחרונה פותחו שיטות שמטרתן לשפר באופן ישיר את ההפרעה הנורו-פסיכולוגית העומדת בבסיס הלקויות הקוגניטיביות דהיינו, תוכנות ממוחשבות לאימון ותרגול קוגניטיבי. תיאורטית, טכנולוגיה מתוחכמת להוראה ממוחשבת עשויה לסייע בלימוד ורכישת מיומנויות באופן שאינו נופל, אם לא עולה, על יכולתו של מורה, במיוחד בכיתה של 30-40 תלמידים. השימוש בתוכנות אימון למטרות חינוכיות בילדים עם או בלי לקויות למידה, מעורר עניין רב גם בשל השפעתו האפשרית על התשתית העצבית במח. בעוד שהוראה פרטנית ונמרצת בילדים עם קשיי קריאה - יעילה, ההוכחות ליעילותו של אימון ממוחשב במצב זה אינן, עדיין, חד-משמעיות (Torgesen et al, 2001).

מהו הרציונל לשימוש בתוכנות התרגול הממוחשבות?

1. במח ישנם אמנם אזורים ייעודיים לתפקודים מסוימים אך חלוקה "אזורית" זו ניתנת לשינוי, יכולת המכונה פלסטיות (plasticity). ואכן, מערכות עצביות יכולות לעבור

תמורות באמצעות תרגול ואימון. לדוגמא, ע"י הקשה חוזרת ונשנית באצבע אנו משנים את התשתית הנירולוגית במח האחראית על פעולה זו (Wang et al, 1995).

2. למרות שהמח מתפקד כחטיבה אחת, תפקודים מסוימים מרוכזים באזורים מוגדרים (לוקליזציה) כך שלקריאה, שמיעה, מוזיקה ותגובה רגשית ישנן תשתיות אנטומיות השונות זו מזו והמופעלות רק או בעיקר בעת ביצוע אותו תפקוד. לדוגמא, אזור באונה טמפורו-פריאטלית משמאל מופעל בזמן קריאה. יתר-על-כן, המח משתנה בעקבות תרגולים ארוכים ומאתגרים כפי שנמצא במוזיקאים: האזור האחראי על המוטוריקה של אצבעות יד שמאל רחב יותר בכנרים מאשר באלו שאינם מנגנים בכינור (Elbert et al, 1995). בקרב אנשים המתמידים במדיטציה קיימת תופעה דומה: התעבות קליפת המוח הפרה-פרונטאלי, אזור הקשור לקשב, זיכרון עבודה והסקת מסקנות (Lazar et al, 2005). האם אימון קוגניטיבי נמרץ בילדים עם דיסלקסיה וחסר במיומנויות פונולוגיות, ישפר רהיטות ודיוק בקריאה? מחקר אשר בדק את השפעתה של תוכנה המבוססת על אימון פונולוגי הראה שהאימון אכן הביא להפעלה נרחבת יותר באזורים במח הקשורים לפונולוגיה בבד עם שיפור קליני ברהיטות הקריאה (Shaywitz et al, 2004).

בפרק זה נסקור תוכנות אימון לשיפור היכולת לקריאה ולקשב שנחקרו בשיטות מדעיות מקובלות תוך התייחסות לשאלות הבאות:

1. האם די בכך שנתרגל מיומנות כגון פונולוגיה כדי לשפר את יכולת הקריאה?
2. האם תרגול של קשב או זיכרון-עבודה יעזור לילד להיות מרוכז יותר במסגרת כיתתית ולסבול פחות מאימפולסיביות והיפראקטיביות וכך להיות תלמיד טוב יותר?
3. למי מתאימות תוכנות האימון? האם לכל ילד או שמא לילדים משכבה סוציו-אקונומית נמוכה והישגים לימודיים ירודים? או שמא הן מוגבלות לילדים עם לקויות למידה?

קריאה ודיסלקסיה

דיסלקסיה מתאפיינת בקושי מתמשך ברכישת השפה הכתובה והיא נובעת, בעיקר, מפגם במערכת העיבוד הפונולוגי (Grigorenko, 2001; Beitchman & Young 1997). מספר תיאוריות מנסות להסביר את התפתחות הדיסלקסיה ומהוות בסיס לפיתוחן של תוכנות אימון:

1. פגם בעיבוד שמיעתי-טמפורלי: לפי תיאוריה זו, הבעיה המרכזית בדיסלקסיה הינה פגם בעיבוד השמיעתי-טמפורלי הגורם לקשיים בקריאה עקב שיבוש במערכת הפונולוגית (Reed, 1989; Tallal et al, 1998).

2. שיבוש בעיבוד הפונולוגי: לפי תיאוריה זו קשיים בקריאה מיוחסים בעיקר, אם כי לא בלעדית, לפגיעה בעיבוד הפונולוגי (הבחנה, חלוקה למקטעים וחיבור צלילים בודדים למילה). רבות מתוכנות האימון מבוססות על תיאוריה זו.

3. ליקוי באוטומטיזציה: ההנחה היא שהחסר הניירו-פסיכולוגי בבסיס הדיסלקסיה הינו אוטומטיזציה פגומה הגורמת, בין היתר, לשיבושים במערכת הפונולוגית. מקובל לחשוב כי המקור הניירו-ביולוגי להפרעה באוטומטיזציה הינו במוח הקטן (המוחון, cerebellum) והוא פוגם ביכולתו של הילד הסובל מדיסלקסיה לבצע שתי פעולות במקביל (Nicolson & Fawcett, 1990). למרות שהמחקר התומך בתיאוריה זו מצומצם, טכניקות לחיזוק האוטומטיזציה המבוססות על חזרתיות (repetition), עשויות להשפיע לטובה על הקריאה.

תוכנות אימון לשיפור מיומנויות הקשורות לקריאה

1. תוכנות המבוססות על תהליך העיבוד השמיעתי-טמפורלי

א. www.capaim.com FAST FORWARD

הנחות היסוד בבסיס תוכנה זו תואמות לתיאוריות לפיהן: (1) דיסלקסיה הינה פגם בתהליך העיבוד השמיעתי-טמפורלי; (2) קליפת המוח פלסטית וברת-שינוי; (3) מערכת השמיעה

בילדים עם דיסלקסיה יכולה לעבור עיצוב מחדש בעקבות תרגול. תוכנת אימון זו מתמקדת בעיבוד שמיעתי ותרגול השפה המדוברת. בתוכנה נעשה שימוש בשינויים אקוסטיים לא-לשוניים (non-linguistic) כגון האטה והדגשה של מעברי תדירויות מהירים כדיבור המדגישים היבטים שונים בשפה המדוברת והכוללים: קשב, הבחנה, זיכרון, עיבוד פונולוגי והבנת הנשמע.

הדו"ח "תוכנות שעובדות" (Schacter, 2001, "Programs that Work") מציין כי תוכנת Fast ForWord משפרת את העיבוד הפונולוגי בילדים. יחד עם זאת, המידע לגבי השפעת השיפור הפונולוגי על קריאה, אינו חד משמעי. שתי עבודות שפורסמו לאחרונה חקרו את ההשפעה של תוכנת האימון על השפה. במחקר אחד השתתפו 216 ילדים בגילאי שש עד תשע עם ליקוי שפתי. הילדים שובצו לאחת מארבע קבוצות: (1) התערבות שפתית ע"י Fast ForWord, (2) תוכנית העשרה אקדמית, (3) התערבות שפתית ממוחשבת, או (4) התערבות שפתית המותאמת אישית ע"י קלינאית/תקשורת. כל הילדים טופלו למשך 100 דקות, 5 ימים בשבוע, ל-6 שבועות. מדדים לעיבוד שפתי ושמיעתי נלקחו לפני ומיד לאחר הטיפול, ובנוסף, 3 ו-6 חודשים לאחריו, לצורך מעקב. התוצאות הדגימו שיפור קליני בעיבוד השפה והשמיעה בכל הילדים שהשתתפו במחקר, ללא קשר לסוג ההתערבות הטיפולית (Gillam et al, 2008). מסקנה דומה התקבלה גם ממחקר אחר בו השתמשו ב-Fast ForWord ב-26 ילדים בגילאי 6-7 שנים עם לקות שפתית (Cohen et al, 2005). לאחר 6 שבועות של התערבות נמצא שיפור בכישורי השפה והמודעות הפונולוגית אך לא ביכולת הקריאה. גם שישה חודשים לאחר ההתערבות עדיין לא הייתה השפעה חיובית על יכולת הקריאה (Valentine et al, 2006).

בכדי לבדוק את השפעת התוכנה Fast ForWord על פעילות המח, השתמשו החוקרים ב-MRI- תפקודי (fMRI) בקבוצה של 20 ילדים עם דיסלקסיה בגילאי 8-12 שנים ובקבוצת ביקורת של 12 ילדים ללא דיסלקסיה. כל תרגול בתוכנה נמשך 100 דקות, 5 ימים בשבוע, למשך 8 שבועות. קבוצת הביקורת לא עברה כל התערבות שהיא. בכל הנבדקים בוצעה fMRI

לפני, ובתום המחקר. במהלך בדיקת ה-fMRI ביצעו הנבדקים מטלות פונולוגיות ושאינן פונולוגיות ומשימות לא שפתיות. תוצאות המחקר הראו שיפור בזיהוי מילים, במודעות פונולוגית ובהבנת הנקרא. במקביל, השתפרו ציוני הערכת הקריאה והתקרבו לטווח הנורמאלי (>85). ממצאי ה-fMRI בילדים עם דיסלקסיה שעברו את האימון בתוכנה Fast ForWord הראו פעילות מוגברת באזורים טמפרו-פריטאליים ופרונטאליים משמאל, שהם אזורים המופעלים בילדים עם יכולת קריאה נורמאלית. כמו-כן, נמצאה פעילות באזורים שבד"כ אינם "נדלקים" בעת מטלות קריאה, ולדעת החוקרים ממצא זה משקף פיצוי מוחי בילדם עם דיסקלסיה (Temple et al, 2003). יש לציין שהתוצאות היו עשויות להיות משכנעות יותר אלמלא מגבלת המחקר העיקרית דהיינו, העדר כל התערבות בקבוצת הביקורת. אי-לכך לא ניתן להבדיל בין שינויים הקשורים לעצם ההתערבות לבין השפעה סגולית אותה ניתן ליחס לאימון ב-Fast ForWord.

ב. השפעת אימון נמרץ על עיבוד שמיעתי ומיומנויות קריאה. (Agnew, 2004)

בכדי לבחון את התיאוריה כי שיפור במשך שיפוט שמיעתי (auditory duration judgment) מחזק את מיומנות הקריאה, השתמשו החוקרים בתוכנת ממוחשבת לתרגול ההבחנה והזיהוי של מרכיבים לשוניים המשתנים במהירות. התרגול נמשך 100 דקות ביום, 5 ימים בשבוע למשך 4-6 שבועות. המחקר, בו השתתפו 7 ילדים בגיל ממוצע של 8 שנים, הראה כי לאחר התרגול ביצעו הילדים היו מדויקים יותר והשתפרו משמעותית במשימות הללו. מסקנות המחברים היו כי תרגול אינטנסיבי אומנם משפר את יכולת ההבחנה השמיעתית-טמפורלית אך ללא השלכה משמעותית על מיומנות הקריאה.

2. תוכנות המבוססות על עיבוד פונולוגי

א. "יש לי סוד"

<http://telerom.co.il/matchsale> I HAVE A SECRET

התוכנה הממוחשבת "יש לי סוד" מתמקדת בזיהוי אותיות, תפיסה שמיעתית והבחנה חזותית. היא הופעלה במחקר בו השתתפו 46 ילדים, בגילאי 5-6 שנים, מגני ילדים של מערכת החינוך המיוחד וחולקו ל-3 קבוצות. קבוצה אחת טופלה ב"יש לי סוד", השנייה בחומר מודפס (לא ממוחשב) והשלישית בתוכניות חינוך שגרתיות, ללא תרגול קריאה ייעודי. המחקר הראה כי בהשוואה לילדים בשתי הקבוצות האחרונות, ילדים שהשתתפו בתרגול הממוחשב "יש לי סוד" השתפרו מבחינת מודעות פונולוגית, זיהוי מילים ויכולת שיום אותיות, דהיינו, במיומנויות המהוות בסיס ללימוד קריאה (Mioduser et al, 2000).

ב. www.greatwave.com/html/daisys.html DAISYQUEST

התוכנה הממוחשבת DaisyQuest, מותאמת לילדי הגיל הרך לתרגול מיומנויות פונולוגיות החשובות לרכישת הקריאה (rhyming, beginning sounds, middle sounds, ending sounds blending phonemes and segmenting). האימון שזור במעשיה אודות חיפוש אחר הדרקון הידידותי "דייזי" ובו מתרגלים הילדים מרכיבים פונולוגיים שונים. יעילות התוכנה הוכחה בארבעה מתוך שבעה מבחנים פונולוגיים שנבדקו בילדים שהשתמשו בה כ- 5 שעות, לעומת ילדים בקבוצת הביקורת שהמשיכו בפעילותם השגרתית בגן (Foster et al, 1994).

במחקר אחר השתתפו 54 ילדים עם דיסלקסיה בכיתה א' אשר חולקו לשלוש קבוצות: קבוצת תרגול בת 8 שעות בתוכנה DaisyQuest, ושתי קבוצות ביקורת שלמדו מקצועות אחרים. המחקר, אשר הראה הטבה בקבוצת התרגול במרבית המבחנים הפונולוגיים, כולל מבדקים לזיהוי מילים, הדגים את יעילותה של התוכנה בשיפור המודעות הפונולוגית וביכולת

להשתמש בכישורים פונולוגיים לקריאת מילים אמיתיות (Torgesen & Baker, 1995). יש להאיר, יחד עם זאת, את קיומן של שתי הסתייגויות בנוגע לתוכנה: שני המחקרים הנ"ל נערכו ע"י מפתחיה ועדיין לא ברור אם השימוש בה אכן מסייע בשיפור רמת הקריאה (US Dept of Education, Sept 28 2006).

ג . *IBM Writing to Read* www.ibm.com/IBM/IBMGives

תוכנה זו נועדה ללמד קרוא וכתוב לילדים בגיל הגן וכיתה א'. במסגרתה, עוברים התלמידים 5 תחנות לתרגול פונטי, כתיבת סיפורים והאזנה לספרים מוקלטים. שתיים מתוך חמש התחנות - ממוחשבות. סקירת 29 מחקרים שנערכו ב- 22 בתי ספר ממחוזות שונים בארה"ב, הראתה שלשימוש בתוכנה לא הייתה השלכה ממשית על הישגי הקריאה של הילדים בכיתה א'. על ילדי הגן, לעומת זאת, הייתה השפעה חיובית מתונה על כישוריהם הקדם-קריאתיים (Schacter, 2001).

ד . *Waterford Early Reading Program* www.waterford.org

בתוכנה זו, המיועדת לילדי הגן וכיתה א', מתאמנים הילדים בזיהוי אוטומטי של אותיות, מודעות פונולוגית, עקרונות הדפוס והבנת הנקרא והנשמע. עבור קוראים מתחילים, מושם דגש על הברות, זיהוי מילים, כתיבה, איות והבנה. התלמידים המתקדמים מתרגלים קריאה, זיהוי מילים, אוצר מילים, הבנה, הנחיות פונולוגיות מורחבות ופעילויות כתיבה. ילדי הגן משתמשים במחשב 15 דקות ביום ואילו ילדי כיתה א' למשך 30 דקות ליום, בתוספת שיעורי בית. תוצאות מחקר זה בו השתתפו 265 ילדי גן (8 כיתות תרגול ו- 7 כיתות ביקורת), הראו כי לתלמידים שעברו תרגול ממוחשב היו ביצועים טובים יותר במדדי ההערכה של Waterford Early Reading Program ו- Test of Early Reading Ability-2. ברם, מחקרים אחרים, אם כי

באיכות מדעית לא צרופה, לא היו חד-משמעיים כך שהמידע הקיים אינו מספיק בכדי להמליץ עליה ללא הסתייגות (Schacter, 2001).

***ה.אימון פונולוגי ואורתוגרפי (Gustafson et al, 2007)*

הנחת היסוד של מחקר זה היא שהוראות קריאה המבוססות על מיומנויות פונולוגיות הן יעילות, במיוחד כאשר צלילי ההברות והמילים קשורים במפורש לשפה הכתובה (אותיות, צורנים [morphemes], מילים) מאשר המימד הפונולוגי בלבד. ידע בשפה כתובה (אורתוגרפיה) חיוני ללימוד הקריאה וככל שהיא מתפתחת נדרשת אינטגרציה בין פונולוגיה לאורתוגרפיה. אי-לכך, כישורים פונולוגיים אמנם נחוצים, אך אין בהם די בכדי להכשיר קריאה מיומנת. תוכנת התרגול הפונולוגי והאורתוגרפי נבדקה ב- 134 ילדי כיתות ב' ו-ג' כאשר בקבוצה אחת (n=41) התרגול היה פונולוגי ובשנייה (n=39) אורתוגרפי (קריאת מילים, קריאת טקסט, חלקי מילה והרכבת מילים). כמו-כן, כלל המחקר שתי קבוצות ביקורת: האחת (n=30) קיבלה הנחיות מיוחדות לקריאה והשנייה (n=34) כללה ילדים ללא קשיים בקריאה. המדדים -- יכולת קריאת טקסט, קידוד מילים, קידוד מילים פונולוגי ואורתוגרפי, איות וחשבון-- נבדקו לפני ואחרי ההתערבות. מחברי המחקר (הקשורים בפיתוח ושיווק התוכנה) מצאו בכל הקבוצות, ללא הבדל בין סוגי התרגול השונים, שיפור מובהק בקידוד מילים (word decoding), שיפור צנוע באיות והעדר כל השפעה על כישורי חשבון. יחד עם זאת, האימון הפונולוגי הממוחשב היה יעיל יותר מהאחרים בילדים עם בעיות פונולוגיות. המסקנה המתבקשת מהמחקר היא שתרגול אינטנסיבי פונולוגי, בין שהוא ממוחשב ובין עם לאו, יעיל וספציפי לקריאה.

3. תוכנות לאוטומטיזציה

א. יעילות התערבות לשיפור שטף הקריאה בילדים עם דיסלקסיה התפתחותית (Tressoldi et al, 2007).

התוכנה הממוחשבת Sub-syllabic מיועדת לחיזוק האוטומטיזציה בזיהוי הברות בתוך מילים ועי"כ לשפר את רהיטות הקריאה. התוכנה נבדקה ב-63 ילדים עם דיסלקסיה בכיתות ב'-ח' על ידי הצגה חוזרת של הברות ולאחריה מילים המורכבות מאותן הברות. במחקר השתתפו 3 קבוצות: קבוצת ביקורת אשר קיבלה טיפול פונולוגי ועזרה בקריאה ושתי קבוצות שטופלו בתוכנה Sub-syllabic: באחת נקבע קצב ההתקדמות באופן פרטני (self-paced) ובשנייה באופן אוטומטי. התרגול ארך כ- 10-15 דקות ביום, למשך 3-5 שבועות. כל הילדים נבחנו לפני תחילת המחקר לרמת רהיטות ודיוק הקריאה. אף כי בכל הקבוצות נמצא שיפור לאחר ההתערבות, חותמו היה מרשים במיוחד בקבוצה שהתאמנה בתוכנת ה- Sub-syllabic "האוטומטית". בעקבות חלקו השני של המחקר בו המשיכו הילדים להתאמן, נמצא קשר ישיר בין מידת השיפור בשטף הקריאה לבין משך התרגול.

מסקנת החוקרים, שהם גם מפתחי התוכנה, היא שתרגול ב- Sub-syllabic כמו

בשיטות לימוד מקובלות מיטיב עם רהיטות הקריאה אך ככל שהזמן המושקע בתרגול

ה- automatic Sub-syllabic רב יותר, השיפור גדל.

ב. טיפול ממוחשב בדיסלקסיה: התועלת המושגת מטיפול בקשיים לקסיקו-פונולוגיים.

(Tijms & Hoeks, 2005)

התוכנה LEXY מתמקדת בזיהוי מבנים פונולוגיים ומורפולוגיים במילים בשפה ההולנדית במטרה לשפר את הקריאה בילדים עם דיסלקסיה. החידוש בתוכנה - מקלדת המכילה פונמות במקום אותיות - מאפשר למתאמנים להמיר פונמות לאותיות. התוכנה נבדקה ב- 267 ילדים הולנדים בגילאי 10-14 במפגש אישי של 45 דקות ובעוד 3 תרגולים עצמיים למשך 15 דקות כל שבוע. תקופת האימון נמשכה בממוצע 45-48 שבועות עד להשגת שליטה ב-80% מהחומר הנדרש. המחקר בדק האם בעקבות התרגול בתוכנת LEXY ילדים הסובלים מדיסלקסיה יכולים להגיע לרמות תקינות של קריאה ואיות. המדדים שנבחנו היו קצב קריאת

מילים, דיוק בקריאת טקסט, מהירות קריאת טקסט ואיות. תוצאות המחקר הראו שיפור בכל רמות הקריאה והאיות, והצביעו על כך שלא ימון בתוכנה השפעה חיובית: מספר הטעויות בקריאת טקסט פחת ב-50% ובאיות ב-80%. במקביל, נמצאה עליה של 25% בקצב הקריאה. השיפור בלט בילדים בוגרים ובאלה עם לקות קריאה קשה. מגבלת המחקר, מעבר לעובדה שהחוקרים היו שותפים לפיתוח התוכנה, היא שלא ברור טיב הטיפול אותו קיבלה קבוצת הביקורת.

4. תוכניות המתרגלות קריאה

Academy of Reading by AutoSkill www.autoskill.com

התוכנה AutoSkill הינה שיטה ממוחשבת לפיתוח מיומנות הקריאה תוך אימון במודעות פונמית, קריאה בקול והבנת הנקרא. התוכנה מעריכה את יכולתו של המתרגל לקרוא ומתאימה לו תרגול על פי רמתו. מחקרים, שנערכו ע"י מפתחי התוכנה, מדגימים יתרון של תוכנה זו על פני התערבויות ממוחשבות אחרות הן בילדים עם יכולת קריאה תקינה והן באלו עם דיסלקסיה. החוקרים הסיקו כי חיזוק אוטומטיזצית הקריאה, ובעקבות כך, שיפור ברהיטותה, עזר לתלמיד להתמודד בצורה מוצלחת עם חומר מורכב, כולל ספרות, גיאוגרפיה ומתמטיקה. מגבלת המחקר הינה שהזמן שהוקדש לשימוש בתוכנות הביקורת היה רק כמחצית מזה שהוקדש ל-AutoSkill (Loh, 2005).

Accelerated Reader .ב

<http://www.advlearn.com/acceleratedreader/aroverture.htm>

התוכנה Accelerated Reader נועדה לעידוד הקריאה בתלמידי בתי-ספר בגילאי 8-18. באמצעות התוכנה קוראים התלמידים ספרים נבחרים המותאמים לרמת קריאתם ובתום הקריאה הם עוברים מבחן ממוחשב להבנת הנקרא. הספרים ב-Accelerated Reader

מדורגים לפי רמת הקושי ומספר המילים. מחקר אורכי עקב אחר התקדמותם של 50 תלמידי כיתה ט' שהשתמשו בתוכנה זו החל מכיתה ג', והשווה את הישגיהם לאלו של קבוצת בקורת (Peak & Dewait, 1994). התוצאות הראו כי ציוני הקריאה של תלמידים שהשתמשו ב-Accelerated Reader השתפרו בכל שנה בה השתתפו במחקר. יחד עם זאת, ספק אם ניתן ליחס את השיפור בקריאה לתוכנה באופן בלעדי, או שמא לעצם התרגול או לשניהם ביחד (Schacter, 2001).

<http://www.cs.cmu.edu/~listen/listen-summary.html> Listen Project ג.

התוכנה Listen, אשר טרם שווקה, מתבססת על "מדריך" קריאה ממוחשב המציג לילד סיפור על גבי מסך, "מאזין" לו בעודו קורא בקול ומתערב כשהוא מבקש עזרה, טועה או לא מתקדם בקריאה. התוכנה מאפשרת לתרגל קריאה באמצעות סיפורים עם אוצר מילים מגוון. היא מספקת תמיכה מדוברת וכתובה, תצוגה מקדימה של מילים חדשות, מקריאה בקול מילים מורכבות, מציעה רמזים כמו חרוזים ומשמיעה הסבר למילים חדשות תוך כדי מתן משוב חיובי מעודד. התוכנה נבדקה בצורה נרחבת, במיוחד בילדים מבתים שאינם דוברי אנגלית. במחקר שנערך לאחרונה, ודווח ע"י חוקרים בלתי תלויים (Poulsen et al, 2007), נמצא שיפור ברהיטות הקריאה כבר בעקבות תרגול בה במשך חודש אחד בלבד. ממצא זה תואם את המוסכמה לגבי הבנת הנקרא (Meyer & Felton, 1999) לפיה על מנת לשפר את רהיטות הקריאה, יש לקרוא בקול טקסט המותאם לרמת המתרגל בין 10 ל-20 דקות מדי יום לאורך זמן וזאת בנוכחות גורם מתקן (Young et al, 1996).

תוכנות אימון לשיפור קשב

פוסנר ורוטבארט (Posner & Rothbart, 2005) חקרו את התפתחות הקשב הניהולי וזיכרון-עבודה בילדים ומצאו כי היא מתרחשת בגיל 2-7 שנים. הם הניחו שתוכנות אימון

המדגישות קשב, זיכרון-עבודה ופתרון בעיות יכולות לעודד את התשתית הניירו-ביולוגית בהתהוותה בילדים בכלל ובאלו עם ADHD, בפרט. במחקרים ראשוניים (Klingberg et al, 2003; Shalev et al, 2002) אשר נערכו בילדים בגיל הגן נמצא כי תרגול בתוכנות קשב משפיעה לטובה על קשב ניהולי (executive attention) תוך שינוי הפעילות המוחית ב- anterior cingulate, בדומה לפעילות הנצפית במבוגרים (van Veen & Carter, 2002). ממצא זה מעניין מכיוון של- cingulate תפקיד בויסות רגשות, ולכן תרגול קשב עשוי, בעקיפין, לשפר שליטה עצמית ובקרה רגשית.

תוכנות אימון לשיפור קשב מבוססות על תרגול תפקודי קשב או על שליטה עצמית באמצעות Biofeedback.

1. קשב וזיכרון-עבודה

MindFit® .א

תוכנה זו מיועדת לתרגול חלוקת קשב, אינהיביציה, שיום, תכנון, תפיסה מרחבית, מהירות עיבוד זמן תגובה, הערכת זמן, תפיסה חזותית, סריקה חזותית, תאום יד- עין, זיכרון חזותי לטווח קצר וזיכרון-עבודה. התוכנה מורכבת ממספר מחזורי תרגול, כאשר בכל מחזור 24 מפגשים ובכל מפגש 3 מטלות, שהזמן הנדרש להשלמתן הינו כ- 20-30 דקות. בסוף כל מטלה ניתן למתרגל משוב מילולי, גראפי ומספרי. מחזורי התרגול מותאמים אישית על פי תוצאות הערכה קוגניטיבית בתחילת ובסיום כל מחזור, וזאת כדי להבטיח התאמת התרגול למתאמן. במחקר בו השתתפו אנשים בשנות ה-60 לחייהם, שהתאמנו 2-3 פעמים בשבוע למשך 3 חודשים (בהשוואה לקבוצת בקורת בה התאמנו הנבדקים במשחקי מחשב מאתגרים), נמצא שיפור בשתי קבוצות המתאמנים. ממצא זה אשרר את המוסכמה כי גירוי שכלי קבוע ותרגול שיטתי מאתגר, משפרים את היכולות הקוגניטיביות (Willis et al, 2006). השפעת האימון בתוכנה (*MindFit®*) הייתה טובה יותר בתחומי קשב וריכוז, למידה חזותית- מרחבית וזיכרון

מרחבי לטווח קצר (Peretz et al, personal communication). תודות לנתונים מעודדים אלה, נבדקת עתה התוכנה גם בילדים.

ב. *Training of Working Memory in Children with ADHD*

(Klingberg et al, 2002, 2005) <http://www.cogmed.com>

הרציונל ביסוד תוכנה זו הינו שמטלות אימון ממוחשבות, המגדילות את קיבולת זיכרון-עבודה, עשויות להקל על הסימפטומים של ADHD. תוכנת האימון מתאימה את עצמה לרמת המתרגל והאימון בה נמשך 25 דקות ביום, 4-6 פעמים בשבוע, למשך 5 שבועות לפחות. שני מחקרים בדקו את יעילות התוכנה. בראשון השתתפו 14 ילדים עם ADHD שהתאמנו במטלות זיכרון-עבודה חזותי-מרחבי, זיכרון-עבודה מרחבי-מילולי ומטלות go/no-go. קבוצת הביקורת התאמנה בתוכנת מחשב דומה, אך ללא התאמה לרמתו האישית של המתרגל. התוצאות הצביעו על שיפור במרבית המשימות בילדים עם ADHD, שיפור שהתבטא בעליה בכמות המידע שנשמרה בזיכרון-עבודה ובזמן תגובה. במחקר השני, שהיה מקיף יותר, נבדקו 53 ילדים עם ADHD בגילאי 7-12 אשר התאמנו 40 דקות ליום, במשך 25 יום לפחות. גם בקבוצה זו נמצא שיפור בכל המשימות, כולל במבחן Raven's Colored Progressive Matrices (Raven CPM, Raven 1995) הבודקת חשיבה לא-מילולית. הערכת השפעת האימון באמצעות שאלון ADHD הראתה הטבה לפי דיווחי ההורים אך לא לפי המורים. החוקרים הסיקו, עם הזהירות המתבקשת, שאימון זיכרון-עבודה יכול להשליך גם על משימות ניהוליות (executive functions) אחרות שלא תורגלו, כפי שהתבטא בציונים של מבחן Raven CPM.

ג. תוכנה ממוחשבת לאימון קשב ממושך

(Shalev et al, 2007) **Computerized Progressive Attentional Training (CPAT)**

תוכנה זו מיועדת לאימון קשב ממושך, קשב בורר (selective attention), הפניית קשב (orienting of attention) וקשב ניהולי (executive attention). היא נבדקה בעשרים ילדים עם ADHD בגילאי 6-13 שנים ובקבוצת ביקורת של 16 ילדים. כל הנבדקים התאמנו בתוכנה במשך 8 שבועות, לשני מפגשים שבועיים של שעה. תוצאות המחקר הראו כי אימון בתוכנה משפר את היכולות האקדמיות במתמטיקה, בהעתקה ובהבנת הנקרא. בשלב זה יש להמתין לאשרור התוצאות בקבוצות גדולות יותר ולבחון את הישרדותן בטווח הארוך.

ד. תוכנית אימון תהליך הקשב

Attention Process Training program (APT)

תוכנה זו המתרגלות מרכיבים שונים של קשב (כגון קשב ממושך, זיכרון-עבודה, קשב בורר, הפניית קשב וחלוקת קשב) נמצאת בשימוש קליני נרחב במטופלים עם נזק מוחי והיא נבדקת עתה בילדים עם ADHD. תוצאות ראשוניות מראות שלאחר 36 מפגשי תרגול בני שעה במשך 18 שבועות, ילדים עם ADHD היו יותר קשובים ומוריהם ציינו שיפור בהשלמת מטלות בכיתה. כמו-כן נמצאה עליה בציוניהם במבחני visual cancellation וקשב (Semrud-) (Clikeman et al, 1999).

2. Biofeedback - משוב ביולוגי

משוב ביולוגי נועד לפתח את היכולת ל"משול" על תפקודים גופניים בלתי רצוניים, כגון קצב הלב והפעילות החשמלית של המוח, על ידי ניטורם בזמן אמת. הנחת היסוד של מחקרים אשר בדקו את השפעת הביופידבק על הפעילות החשמלית של המוח היא שניתן לעודד פעילות חשמלית של ערנות ועל ידי כך לשפר את תפקוד הקשב. חשוב לציין בהקשר זה, כי עד עתה לא הניב השימוש בביופידבק עם ניטור EEG תוצאות חד משמעיות ב-ADHD.

א. מטרת תוכנת משוב זו (Play Attention) היא להגביר את פעילות גלי ביתא (beta) במח המופיעים בערנות ובמקביל, להפחית את פעילות גלי תיטא (theta), הנרשמים בנמוך ומנוחה. כדי לשמור על ילדים עם ADHD ערים וערניים, מפעילה תוכנת ביופידיבק זו משחקי מחשב כמו מרוץ מכוניות. נמצא שהיחס בין גלי ביתא לתיטא במוחו של הילד משפיע על מהלך המשחק: כאשר הוא גבוה- מצב המשקף ערנות- ביצועי המכונות (מהירותה והיגוי) טובים יותר, ולהיפך. דהיינו הילד המתאמן בתוכנה זו לומד לשלוט במשחק באמצעות מוחו בלבד. החברה שפיתחה תוכנה זו דיווחה על תוצאות מחקר בו השתתפו 22 ילדים בגילאים 9-13 אשר עברו 40 מפגשים של ביופידיבק קונבנציונאלי או באמצעות התוכנה: בכל הילדים חל שיפור הן ביחס בין גלי המוח הנ"ל והן במבחנים לקשב, אימפולסיביות והיפראקטיביות. גם ההורים (אך לא המורים) של הילדים בשתי הקבוצות דיווחו על שיפור בתפקודם. מחקר זה טרם פורסם בספרות המדעית.

ב. מחקר בביופידיבק קונבנציונאלי (Beauregard & Levesque, 2006) אמד את השפעתו על קשב בורר (selective attention) בילדים עם ADHD באמצעות fMRI. במחקר השתתפו 20 ילדים כאשר 15 התאמנו בביופידיבק וחמשת הנותרים אשר לא התאמנו היוו את קבוצת הביקורת. ארבעים מפגשי התרגול היו בני שעה כל אחד, לתקופה של 13.5 שבועות. רמת הקשב הוערכה ע"י number Stroop test ומטלות go/no-go. נמצא כי ביצועי הילדים בקבוצת האימון היו טובים יותר מאשר אלו בקבוצת הביקורת. ב-fMRI הודגמה פעילות באזורים עתירי הדופאמין: right anterior cingulate cortex, left caudate nucleus ו-left substantia nigra. המחברים הסיקו כי ב-ADHD ביופידיבק יכול להשפיע על פעילות המערכת הדופמינרגית, החשובה לתפקודי קשב וריכוז. נקודת התורפה של מחקר זה הינה העובדה שקבוצת הביקורת לא התנסתה בכל התערבות, אף לא מדומה.

תוצאות מההתנסות היום-יומית בתוכנות אימון ממוחשבות בבתי-הספר

משרד החינוך בארצות הברית בדק את השפעת תוכנות אימון ממוחשבות על הישגיהם האקדמיים של תלמידים בבתי-ספר בהם שולבו תוכנות אלה (Dynarski et al, 2007). החברות שפיתחו את התוכנות היו אחראיות על התקנתן במחשבי בתי-הספר ועל הכשרת המורים לשימוש בהן. השתתפות המורים הייתה בהתנדבות והם שובצו אקראית לקבוצת התרגול או הביקורת. משרד החינוך האמריקאי לא היה מעורב באופן ישיר בבחירת התוכנות או ביישומן אך היה אחראי על ניטור הערכות התלמידים בקריאה וחשבון לפני הפעלת התוכנות ושנה לאחר מכן. לעיבוד התוצאות, אוגדו ההערכות התלמידים מכל התוכנות לחטיבת נתונים אחת, כך שלא ניתן היה לבדוק ההשפעה של תוכנה בודדת כזאת או אחרת. המסר העיקרי מעבודה מקיפה זו הוא שלא נמצא כל הבדל בהישגיהם של תלמידים שהשתמשו בתוכנות לעומת אלו מקבוצת הביקורת.

לסיכום, בתחילת הפרק הועלו מספר שאלות מנחות באשר ליעילותן של תוכנות לתרגול ואימון קוגניטיבי ממוחשב. המידע שנפרש לפנינו בפרק זה מאפשר לנו להסיק, לגבי קריאה וקשב, את המסקנות הבאות:

1. לתרגול קוגניטיבי ממוחשב, בין אם בפונולוגיה, באוטומטיזציה או ב- temporal order judgment and repetition tasks, השפעה מובהקת על תפקודים קדם-קריאתיים (pre-reading skills). השפעת תרגול זה על עצם הקריאה בילדים בכלל, ובאלה עם דיסלקסיה בפרט, אינו חד משמעי.

2. תוכנות שפותחו לשיפור קשב אמנם מיטיבות עם מדדי קשב שלא תורגלו אך אין עדיין הוכחות שלתרגול בהן השפעה חיובית על למידה ודפוסי התנהגות.

3. טרם הובהר אילו אוכלוסיות עשויות להנות מהתוכנות מכיוון שמרבית המחקרים כללו ילדים מקבוצות גיל שונות עם לקויות למידה מגוונות. ברם, הרושם הוא שילדים עם קשיים לימודיים, דיסלקסיה ואוכלוסיות חלשות נהנות מהאימון.

החיפוש אחר תוכנה ממוחשבת לאימון קוגניטיבי, שתהיה הן מבוססת מבחינה מדעית והן יעילה ותשפר את מיומנויות הלמידה, נמשך. התשתית והמנגנונים הניירו-פסיכולוגיים העומדים בבסיס לימוד באמצעות אימון ותרגול נמרצים, בין אם באופן ממוחשב ובין אם לאו, אינם ידועים לאשורם ומהווים אתגר מחקרי רב-תחומי. ברם, המידע הקיים מצביע על כך כי תרגול אינטנסיבי—מוטורי וקוגניטיבי—משנה את, ומשפיע, כנראה לטובה, על הפעילות המוחית באזורים שהם ייחודיים לכל תפקוד ותפקוד. ההשערה הרווחת כדי להסביר השפעות אלה היא כי עצם התרגול מעורר תהליכים ביוכימיים אשר מקודדים "זיכרון לטווח ארוך" באותם תאי עצב המשתתפים במיומנות המתורגלת (Karni & Sagi, 1993). השערה זו תואמת את התצפית לפיה המח מכיל קבצים של תאי עצב המיועדים לפעילויותיו השונות וגורלם של קבצים אלה הוא תלוי התנסות (experience dependent) המתגבשת עם תרגול ואימון (Dowker, 2006). בכל מקרה, אם מחליטים "ללכת על תוכנה" רצוי שהשימוש בה יהיה מושכל והציפיות ממנה מציאותיות, במיוחד לאור העובדה כי המשאבים הכרוכים בכך – הקדשת זמן, משמעת וכמובן ממון - יקרים.

Agnew JA, Dorn C, Eden GF. Effect of intensive training on auditory processing and reading skills. *Brain Language* 88:21-25, 2004

Beauregard M, Levesque J. Functional magnetic resonance imaging investigation of the effects of neurofeedback training on the neural bases of selective attention and response inhibition in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Applied Psychophysiology and Biofeedback* 31:3-20, 2006

Beitchman JH, Young AR. Learning disorders with a special emphasis on reading disorders: a review of the past 10 years. *Journal American Academy Child Adolescent Psychiatry* 36:1020—1032, 1997.

Cohen W, Hodson A, O'Hara A, Boyle J, Durrani T, McCarney E, Matthey M, Naftalin L, Waton J. Effects of computer based intervention through acoustically modified speech (Fast ForWord) in severe mixed receptive-expressive language impairment: outcome from a randomized controlled trial. *J Speech Lang Hear Res* 48:715-729, 2005

Dowker, A. What can functional brain imaging studies tell us about typical and atypical cognitive development in children? *Journal Physiology Paris* 99 (4-6):331-341, 2006.

Dynarski M, Agodini R, Heaviside S, Novak T, Carey N, Campuzano L, Means B, Murphy R, Penuel W, Javitz H, Emery D Sussex W. Effectiveness of reading and mathematics software products: findings from the first student

- cohort. Washington DC: US Department of Education, Institute of Education Sciences, 2007.
- Elbert T, Pantev C, Wienbruch C, Rockstroh B, Taub E. Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science* 270 (5234):305-307, 1995
- Foster KC, Erickson GC, Foster DF, Brinkman D, Torgesen JK. Computer administered instruction in phonological awareness: evaluation of the DaisyQuest Program. *Journal Research Development in Education* 27:126-137, 1994
- Gillam RB, Loeb DF, Hoffman LM, Bohman T, Champlin CA, Thibodeau L, Widen J, Brandel J, Friel-Patti S. The efficacy of Fast ForWord Language intervention in school-age children with language impairment: a randomized controlled trial. *Journal Speech Language Hearing Research* 51:97-119, 2008
- Grigorenko EL. Developmental dyslexia: An update on genes, brains and environments. *Journal Child Psychology Psychiatry* 42, 91-125, 2001.
- Gustafson S, Ferreira J, Ronnberg J. Phonological or orthographic training for children with phonological or orthographic decoding deficits. *Dyslexia* 13:211-229, 2007, doi:[10.1002/dys.339](https://doi.org/10.1002/dys.339)
- Karni A, Sagi D. The time course of learning a visual skill. *Nature* 365(6443):250-252, 1993.

- Lazar SW, Kerr CE, Wasserman RH, Gray JR, Greve DN, Treadway MT, McGarvey M, Quinn BT, Dusek JA, Benson H, Rauch SL, Moore CI, Fischl B. *Neuroreport* 17:1893-1897, 2005
- Loh E. Building reading proficiency in high school students Examining the effectiveness for striving readers. AutoSkill International Inc,®of the Academy of Reading 2005.
- Meyer MS, Felton RH. Repeated reading to enhance fluency: Old approaches and new directions. *Annals Dyslexia* 49, 283-306, 1999.
- Klingberg T, Forssberg H, Westerberg H. Training of working memory in children with ADHD. *J Clinical and Experimental Neuropsychology* 24;782-791, 2002
- Klingberg T, Fernell E, Olesen PJ, Johnson M, Gustafsson P, Dahlstron K, Gillberg CG, Forssberg H, Westerberg H. Computerized training of working memory in children with ADHD—A randomized controlled trial. *Journal American Academy Child Adolescent Psychiatry* 44:177-186, 2005.
- Mioduser D, Tur-Kaspa H, Leitner I. The learning value of computer-based instruction of early skills. *Journal of Computer Assisted Learning* 16:54-63, 2000.
- Nicolson RI, Fawcett AJ, Developmental dyslexia: the role of the cerebellum. *Dyslexia* 5:155-177, 1999

- Peak JP, Dewalt MW. Reading Achievement: Effects of computerized reading Management and Enrichment. ERS Spectrum 12(1);31-35, 1994.
- Peretz C, Korczyn AD, 3, Aharonson V, Birnboim S, Giladi N, Individualized computer-based cognitive training improves cognitive performance in elderly subjects: a randomized, prospective, double blind study with an active comparator (personal communication), 2008
- Posner MI, Rothbart MK. Influencing brain networks: implications for education. Trends Cognitive Sciences 4 :99-103, 2005
- Poulsen R, Wiemer-Hastings P, Allbritton D. Tutoring bilingual students with an automated reading tutor that listens. Journal Educational Computing Research 36:191-221, 2007.
- Raven JC. *Coloured Progressive Matrices*. Oxford: Oxford Psychological Press, 1995.
- Reed MA, Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading disabled children. Journal Experimental Child Psychology, 48:270-92, 1989
- Schacter J. Reading programs that work: An evaluation of kindergarten-through-third-grade reading instructional programs. ERS Spectrum 19(4):12-25, 2001
- Semrud-Clikeman M, Nielsen KH, Clinton A, Sylvester L, Parle N, Connor RT. An intervention approach for children with teacher- and parent-identified attentional difficulties. Journal Learning Disabilities 32:581-590, 1999.

- Shalev L, Tsal Y, Mevorach C. Computerized Progressive Attentional Training (CPAT) Program: Effective direct intervention for children with ADHD. *Child Neuropsychology* 13:382-388, 2007
- Shaywitz BA, Shaywitz SE, Blachman BA, Pugh KR, Fulbright RK, Skudlarski P, Mencl WE, Constable RS, Holahan JM, Marchione KE, Fletcher JM, Lyong GR, Gore JC. Development of left occipitotemporal systems for skilled reading in children after a phonologically-based intervention. *Biological Psychiatry* 55, 926-933, 2004.
- Tallal P, Merzenich MM, Miller S, Jerkins W. Language learning impairments: integrating basic science, technology and remediation. *Experimental Brain Research* 123:210-219, 1998.
- Temple E, Deutsch GK, Poldrack RA, Miller SL, Tallal P, Merzenich MM, Gabrieli JDE. Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: evidence from functional MRI. *Proceedings National Academy Science* 100 (5);2860-2865, 2003.
- Tijms J, Hoeks J. A computerized treatment of dyslexia: benefits from treating lexico-phonological processing problems. *Dyslexia* 11:22-40, 2005.
- Torgesen JK, Alexander AW, Wagner RK, Rashotte CA, Voeller KKS, Conway t. Intensive remedial instruction for children with severe reading disabilities: Immediate and long-term outcomes from two instructional approaches. *J Learning Disabilities* 34:33-58, 78 2001.

Torgesen JK, Barker TA. Computers as aids in the prevention and remediation of reading disabilities. *Learning Disability Quarterly*, Quarterly 18:76-87, 1995.

Tressoldi PE, Vio C, Iozzino R. efficacy of an intervention to improve fluency in children with developmental dyslexia in a regular orthography. *Journal Learning Disabilities* 40:203-209, 2007.

U.S. Department of Education. WWC Intervention Report: DaisyQuest. Sept 28, 2006.

Valentine D, Hedrick MS, Swanson LA. Effect of an auditory training program on reading, phoneme awareness and language. *Perceptual Motor Skills* 103:183-196, 2006.

van Veen V and Carter CS (2002) The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex. *Journal Cognitive Neuroscience* 14: 593-602, 2002.

Wang X, Merzenich MM, Sameshima K, Jenkins WM. Remodeling of hand representation in adult cortex determined by timing of tactile stimulation. *Nature* 378: 71-75, 1995.

Willis SL, Tennstedt SL, Marsiske M, Ball K, Elias J, Koepke KM, Morris JN, Rebok GW, Unverzagt FW, Stoddard AM, Wright E. Long term effects of cognitive training on everyday functional outcomes in older adults. *Journal American Medical Association* 296, 23: 2805-2814, 2006.

Young AR, Bowers PG, MacKinnon GE. Effects of prosodic modeling and repeated reading on poor readers' fluency and comprehension. *Applied Psycholinguistics* 17:59-84, 1996.

הבסיס הקוגניטיבי והנאורנאלי של למידה

יוסף צלגוב, נשיא המכללה האקדמית אחווה באחריות אקדמית של אוניברסיטת בן-גוריון בנגב,

והמחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן גוריון בנגב

רועי כהן-קדוש, המרכז למדעי העצב הקוגניטיבי, והמחלקה לפסיכולוגיה יוניברסיטי קולג', לונדון

פעילות אנושית כוללת מרכיב רציני מאד של למידה. כאשר הפעילות הנלמדת מתבצעת בדיוק רב תוך השקעת מאמץ מינימאלי מדברים עליה כעל מיומנות (skill). מיומנות נרכשת בדרך על בסיס אימון רב. לכל מיומנות רכיבים תחושתיים – מוטוריים (קשורים בקליטת מידע מהעולם ובביצוע פעולות שרירים) ורכיבים קוגניטיביים (חשיבה). כך למשל הן משחק כדורגל והן פתרון תרגיל בחשבון כוללים רכיבים תחושתיים-מוטוריים וקוגניטיביים. בפתרון התרגיל, בקריאה ובמשחק שחמט המרכיב הקוגניטיבי הוא העיקרי ובהתאם לכך נקראות מיומנויות אלה מיומנויות קוגניטיביות ודומיהן (Adams, 1987). במקביל משחק כדורגל, נהיגה, משחק טניס או טיס מאופיינים על ידי הדומיננטיות של המרכיב התחושתי-מוטורי בהתאם לכל נקראות אלה מיומנויות תחושתיות – מוטוריות. בעוד שפסיכולוגים התמקדו בעיקר בשינויים בביצוע כפונקציה של למידה, חוקרים במדעי העצב התמקדו בבסיס הפיזיולוגי של למידה, ושינויים בתפקוד העצבי כתוצאה מרכישת מיומנויות במספר רמות החל מהרמה המולקולארית (גנים, רצפטורים) ועד לרמת המבנים המוחיים. בפרק זה נתמקד באספקטים של רכישת מיומנות הן ברמה הקוגניטיבית והן ברמת המבניים המוחיים.

השאלות שננסה לענות עליהן הן: מהן סוגי הלמידה השונים? איזה סוג למידה נראה כאופטימאלי לרכישה של מיומנות קוגניטיבית? כיצד רכישת מיומנות מתורגמת לפעילות מוחית?

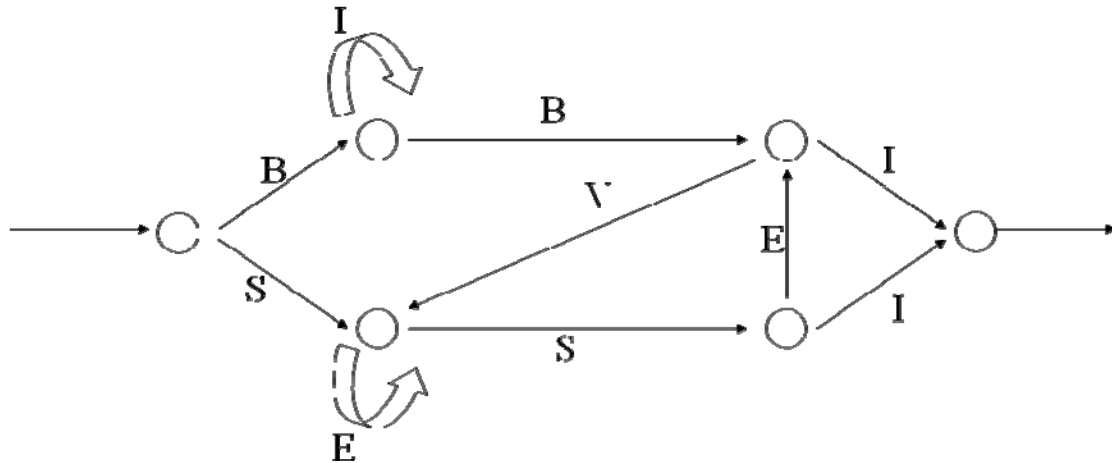
כיצד סוג החומר הנלמד, ואסטרטגיית הלימוד משפיעים על הפעילות המוחית?

הבחנה בין למידה גלויה ללמידה סמויה

החברה האנושיות הגדירה מוסדות מיוחדים בהן נרכשות מיומנויות ואלה קרויים בתי ספר. מה שמעניין מנקודת מבט של הניתוח הנוכחי הוא שבתי ספר מאופיינים על ידי כך שהנמצא בהם (כדי ללמוד) ברור לו כי הוא נמצא במצב למידה. ברור לו גם כי מצופה ממנו להקדיש את משאבים המנטאליים (את הקשב שלו) ללמידה. מצבים שבהם הלומד יודע שהוא נמצא במצב למידה כמו למשל המצב בו נמצא בשיעור בבית ספר נקראים מצבים של למידה גלויה (explicit learning). במילים אחרות הלמידה בבית הספר לרוב נתמכת על ידי למידה הנובעת מטעות (error-driven learning). למידה זו מושפעת על ידי צמצום טעויות, ומתקדמת כפונקציה של צמצום הפער בין המטרה אליה התלמיד שואף להגיע לבין הביצוע הנוכחי. מבחנים, עבודות, מענה על שאלות, הם דרכים לבחון את הפער בין השגת המטרה לביצוע בפועל, ולשיפור הביצוע עד להשגת המטרה. יש להדגיש כי קבלת משוב, ולעיתים צפייה בביצוע אחרים מסייעים לצמצום טעויות ולרכישת המיומנות. במקרה זה ללא ספק הביטוי "איזהו חכם- הלומד מכל אדם" (מסכת אבות, ד, א) מבטא למידה גלויה ומכוונת. בלמידה כזאת הלומד מנטר במכוון את תהליך הלמידה (Perlman & Tzelgov, 2006)

נראה עם זאת כי יש מצבים רוכשים בהם אנו לומדים מבלי שאנו כלל מודעים כי אנו נמצאים במצב למידה. כך למשל אנו רוכשים את השימוש ברוב רובם של כללי הדקדוק של שפת האם מבלי שאנו מודעים כלל לכך שאנו במצב למידה. למידה שבה הלומד אינו מודע לכך שהוא נמצא במצב למידה קרויה למידה סמויה (implicit learning). לפני כארבעים שנה חוקר בשם Reber (1968) פיתח פרדיגמה ניסויית שמנסה לחכות את התהליך של למידה סמויה של הדקדוק. בפרדיגמה זאת הקרויה למידה סמויה של דקדוק מלאכותי יוצרים תחילה גירויים על פי כללים מסוימים – למשל רצפים של אותיות בהם סדר הופעה של אותיות האותיות נקבע לפי חוקיות מסוימת. חוקיות כזאת מוצגת למשל בציר 1.

ציור 1 - דוגמא לדקדוק מלאכותי



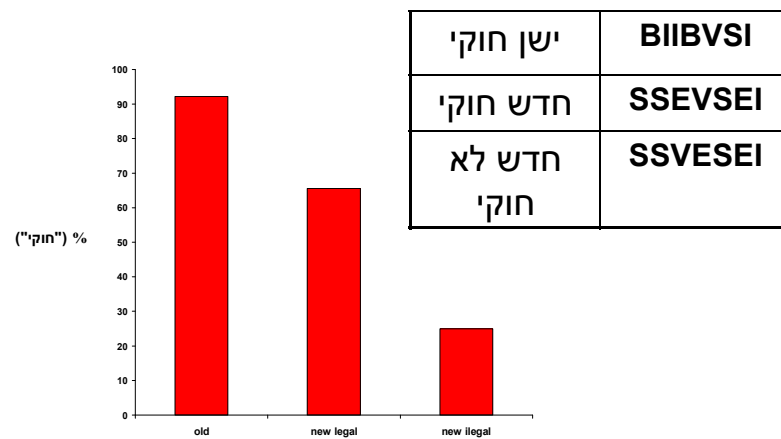
כפי שניתן לראות בציור 1 בדוגמא שלפנינו הרצפים בהם מדובר הן אותיות לועזיות. במקום כל עיגול ניתן להציב אות ואילו החיצים מורים מהו סדר האותיות המותר על פי הדקדוק המתואר בציור. כך למשל כל רצף חייב להתחיל באות B או S. אם הרצף החל בB אחריו חייבת להופיע האות I. יתר על כן החץ המעוגל החוזר אל ה-I מורה כי ה-I יכולה להופיע מספר פעמים. אחרי ה-I חייבת להופיע B ואחריה I אשר תסיים את הרצף או V אשר אחריה E. כל למשל הרצף BIIBSVI הוא רצף חוקי ואילו הרצף BIIBVSI אינו חוקי משום שבניגוד לכלל הדקדוק המוצג בציור 1 ה-V מקדים בו את ה-S

ניסוי טיפוסי העוסק בלמידה סמויה כולל שלב אימון ושלב מבחן. בשלב האימון מוצגת לנבדקים רשימה של רצפים שנבנתה על פי חוקיות נתונה (למשל זאת המוצגת בציור 1) אך לא נאמר כי הרצפים נבנו על חוק כלשהו ולא נאמר להם לנסות להגיע אל החוק וללמוד אותו. בשלב המבחן מוצגים לנבדקים **רצפים חדשים** מחציתם ומחציתם לא חוקיים ונאמר להם להחליט לגבי כל אחד האם הוא חוקי או לא חוקי. בניסויים רבים מאד התברר כי אנשים מצליחים בתפקיד זה הרבה מעבר למה שניתן לצפות באופן מקרי. ציור מס' 2 מציג תוצאות של ניסוי כזה שנערך

במעבדתנו. בציור מס מוצג % התשובות "חוקי" כאשר בשלב המבחן הנבדקים נשאלו האם רצף נתון הוא חוקי או לא חוקי. כאמור הוצגו רצפים חדשים מחציתם חוקיים ומחציתם לא חוקיים ו בנוסף הוצגו רצפים ישנים אותם ראו הנבדקים בשלב האימון

ציור 2- תוצאות שלב המבחן בניסוי שעסק בלמידה סמויה של דקדוק מלאכותי

שלב המבחן: החלטה אם הרצף חוקי



כפי שניתן לראות כ- 90% מהרצפים הישנים שהוצגו בשלב האימון סווגו כחוקיים. זה אינו מפתיע משום משהנבדקים יכלו במקרה זה להסתמך על זיכרוןם. מה שמפתיע יותר הוא שכ- 68% של הרצפים החדשים החוקיים שהנבדקים ראו בפעם הראשונה סווגו כחוקיים. זאת לעומת כ-25% בלבד מבין הרצפים הלא חוקיים. יוצא איפה שכ-70% של הרצפים מסווגים נכון לאחר למידה סמויה. ברור אפוא כי בני אדם מסוגלים לרכוש מיומנות קוגניטיבית מורכבת גם

מבלי שהם מתכוונים לעשות גם אם עדיין לא ברור עד הסוף מהו מנגנון הלמידה שעומד מאחרי תהליך זה. יש הטוענים (ראה למשל Reber, 1992) שלמידה סמויה היא תוצאה של מנגנון למידה קדמון שהוא חלק מ"לא-מודע קוגניטיבי". אחרים טוענים כי רמת הביצוע אליה מגיעים הנבדקים בלמידה סמויה של דקדוק מלאכתי מבטא ידע חלקי דוגמת ידיעת סדר הופעה מותר לגבי חלק מהאותיות (Perruchet & Pactau, 1990), שאנו מודעים לו (Dulany, Carlson & Dewey, 1984). אכן נמצא כי מודלים פשוטים המבוססים על ידע חלקי מסוגלים להגיע לרמת ביצוע השווה לביצוע נבדקים אנושיים בניסויי למידה סמויה (Redington & Chater, 1994).

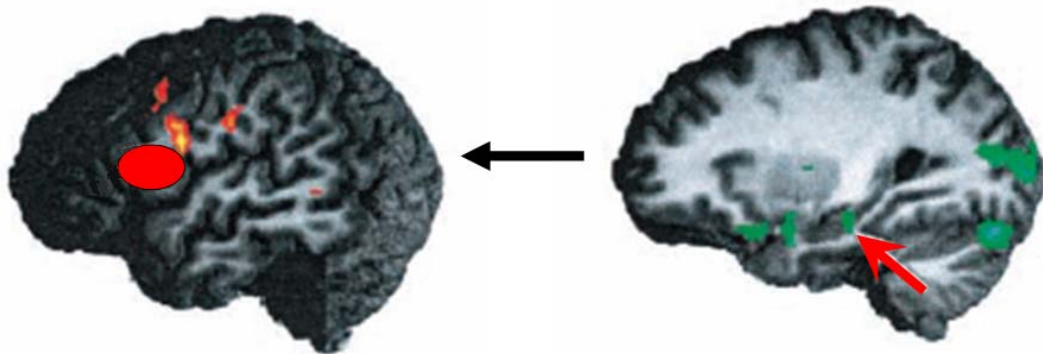
כיצד נעשה התהליך שתואר, ברמה נאורונאלית? אחת השיטות לבדיקת המעורבות של אזור מסוים בפעילות מנטאלית כלשהי נקראת הדמיה מוחית פונקציונאלית (functional magnetic resonance - fMRI). טכניקה זו הפכה בשנים האחרונות לנפוצה בבדיקת הפעילות המוחית. להלן עקרונות הטכניקה בקצרה. אוקסיהמוגלובין (המוגלובין בדם המכיל חמצן) הוא בעל רמת מגנטיות שונה מדהאוקסיהמוגלובין (המוגלובין בדם ש"תרם" כבר את החמצן שבו). אזור מוחי פעיל זקוק לחמצן על מנת לתפקד כראוי. לפיכך, אם אזור מסוים פעיל במטלה מסוימת הוא צורך כמות גדולה יותר של חמצן על מנת לתפקד, מאשר במצב מנוחה. כאשר הדם מגיע לאזור הזקוק לחמצן אותו אזור צורך את החמצן מהדם, והאוקסיהמוגלובין הופך לדהאוקסיהמוגלובין. על מנת לבדוק הבדלים אלו בצריכה מוכנס הנבדק למגנט חזק, בו השדה המגנטי הוא פי 30,000 מכוח המשיכה של כדור הארץ (יש לציין כי המכשיר אינו גורם נזק כלשהו לנבדק) ומתבקש לבצע מטלה מסוימת. המגנט מנצל את התכונות השונות ברמת המגנטיות בין האוקסיהמוגלובין והדהאוקסיהמוגלובין. ההבדל בין רמת הצריכה של האוקסיהמוגלובין והדהאוקסיהמוגלובין באותו אזור בעת פעילות מצביע על מעורבות האזור המוחי בעת הפעילות המנטלית.

Opitz and Friederici (2004) השתמשו בפרדיגמת הלמידה הסמויה של דקדוק מלאכתי על מנת לבדוק את האזורים המוחיים המעורבים ברכישה של ידע דקדוקי, כאשר למידה זו מבוססת

על יצירת כללים מופשטים או לחילופין על מידע אשר הוא ספציפי לכל פריט ומתבסס על מיקומו היחסי במבנה משפט, למשל, שם העצם *sloq* מופיע במיקום ספציפי (בתחילת המשפט). לאחר אימון על כללים דקדוקיים במטלה שהכילה שפה עם דקדוק מלאכותי, הנבדקים נתבקשו להחליט האם משפטים חדשים הם נכונים או לא נכונים מבחינה דקדוקית תוך כדי מדידת פעילותם המוחית ב fMRI. עבור מחצית מהנבדקים המשפטים החדשים הנכונים שהחלטה על נכונותם מבחינה דקדוקית התבססה על הדמיון למשפטים שנלמדו, כאשר מיקום מילה מסוימת במשפט שונה (למשל, שם העצם נע במיקומו מבלי להפר את חוקיות מבנה המשפט). בקבוצה זו נבדק המנגנון המעורב בלמידה המבוססת על דמיון למבנה בין המשפטים כאשר המיקום של פריט ספציפי שונה (קבוצת פריט ספציפי). המחצית השנייה של הנבדקים בסו את החלטתם על הכללים של המבנה הדקדוקי. בקבוצה זו נבדק המנגנון ללמידה המערב ידע דקדוקי התלוי בכללים מופשטים שנוצרו במהלך הלמידה, (למשל, המגדיר יכול היה להופיע לפני שם העצם (boeke gum) או לאחר שם העצם (gum boeke)). יישום ידע זה תלוי לא במיקום ספציפי של המילה, אלא בכלל התחבירי שנרכש באופן בלתי תלוי במיקום הפריטים במשפט (קבוצת כלל מופשט). הלמידה על סמך כלל מופשט הייתה קשה יותר לעומת למידה על סמך דמיון הפריטים במיקום המשפט, ובתחילה גרמה לחוסר דיוק רב לעומת קבוצת פריט ספציפי. עם זאת במהלך הלמידה קבוצת כלל מופשט הראתה שיפור מתמיד בדיוק עם הלמידה, לעומת קבוצת פריט ספציפי אשר לא הראתה שיפור, עד אשר לבסוף הביצוע מבחינת דיוק היה טוב יותר בקבוצה זו. בקבוצת פריט ספציפי נמצא פעילות בהיפוקמפוס קדמי (anterior hippocampus) השמאלי. אזור זה מעורב בפעילות של מידע יחסי, ועל כן הפעילות באזור זה הוסברה על ידי עלייה בעיבוד מידע יחסי בין מילים והקטגוריה התחבירית. בניגוד לכך, בקבוצת כלל מופשט נמצא עלייה בפעילות הקורטקס הפרה-מוטורי הבטני (ventral premotor cortex) השמאלי. אזור זה נמצא פעיל במחקרים קודמים ברכישה של כללים דקדוקיים, ואיתור של אי-חוקיות דקדוקית. על כן פעילות באזור זה הוסברה כתוצאה משינוי מאפיינים מקומיים של שינוי כלל. החוקרים הסיקו כי

בלמידה מחוץ למעבדה, תתכן כי למידה דקדוקית נרכשת בתחילה על ידי פעילות התחלתית של ההיפוקמפוס השמאלי, אשר מעורב בידע ספציפי, אך עוברת עם הזמן לפעילות באזור הפרה מוטורי השמאלי שמעורב ככל שהמיומנות השפתית גוברת (ציור 3).

ציור 3- אזורים המעורבים במהלך למידה דקדוקית. לאחר פעילות התחלתית של ההיפוקמפוס השמאלי, אשר מעורב בידע ספציפי (חץ אדום מצד ימין), הפעילות באזור הפרה מוטורי השמאלי (אליפסה אדומה), שמעורב ככל שהמיומנות השפתית, גוברת. התוצר הסופי של למידה דקדוקית תלויה בעיקר באזור הפרה מוטורי השמאלי.



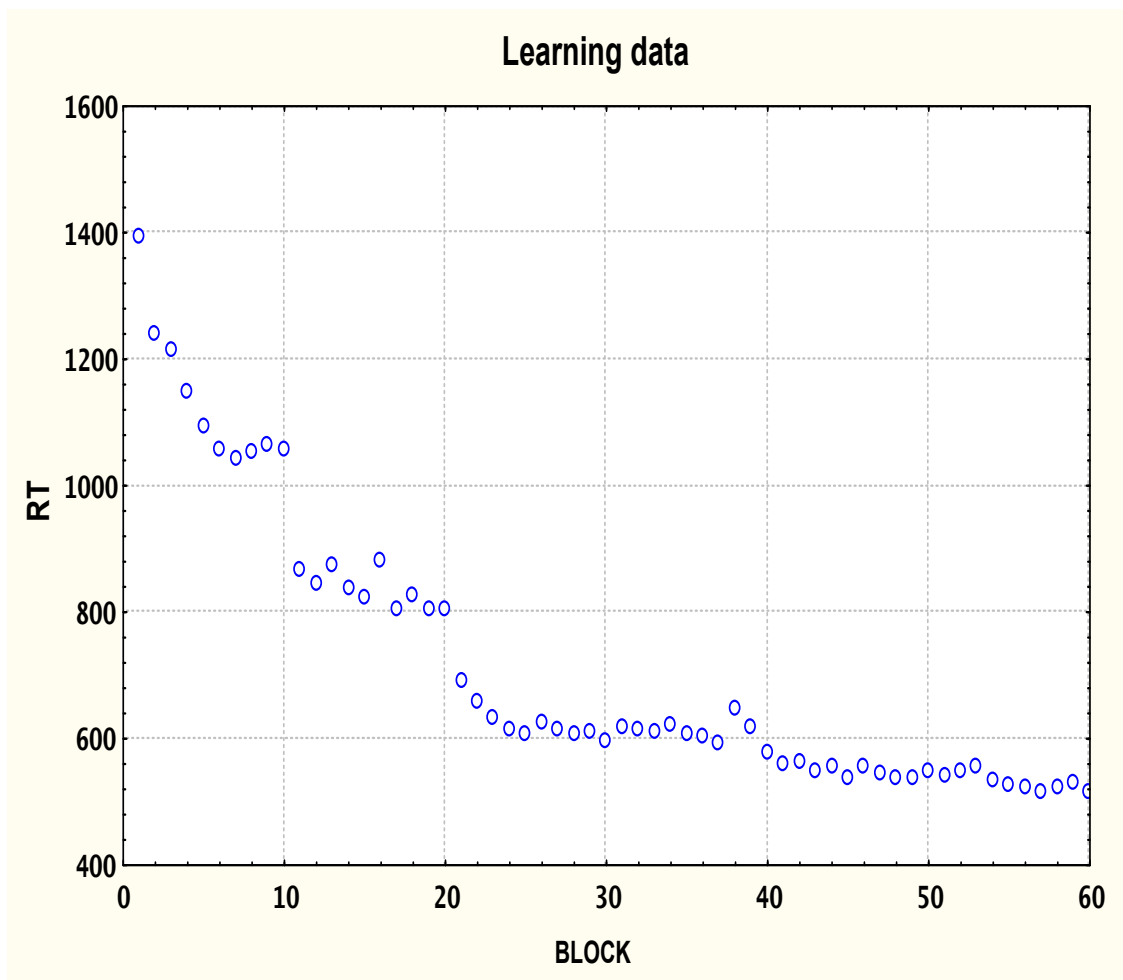
ניתן אם כך לסכם כי חלק מהידע שלנו על העולם "נלמד מעצמו". כלומר איננו חייבים להיות במצב של למידה גלויה ולהיות מודעים לכך שאנו במצב למידה על מנת שנלמד. עם זאת ברור שיש מצבים רבים שבהם יש צורך בכוונה ומאמץ מנטאלי מכוון על מנת ללמוד והם כפי הנראה מתייחסים לרוב המיומנויות הקוגניטיביות שאנו זקוקים להם בחברה המודרנית.

על צורתה של עקומת למידה ומשמעותה

כאשר אנו לומדים הביצוע שלנו משתפר. דרך נוחה לתאר את תהליך הלמידה היא באמצעות **עקומת למידה** הקושרת את רמת הביצוע עם כמות האימון. כך למשל ב ניסוי שנערך במעבדתנו

סטודנטים למדו את יחסי הגודל יחסי לסדרה של צורות חסרות פשר. הדבר נעשה על יד כך שבכל צעד בניסוי הוצגו להם צמדים של צורות והם נתבקשו להחליט מהר ככל האפשר איזה מהן מייצגת כמות גדולה יותר. ניתן משוב לאחר כל צעד. כמובן שבתחילה תגובות הנבדקים התבססו על ניחוש בלבד אך ככל שגבר האימון הביצוע הלך והשתפר עד כה נבדקים היו מסוגלים ליצור את הסדר המלא בין הצורות מבחינת הכמויות שהם מייצגים

ציור 4 – צורתה של עקומת למידה



ציור 4 מציג את עקומת הלמידה שהתקבלה. על ציר ה-X מופיע כמות האימון ב"בלוקים" (יחידות של 100 צעדי אימון) ואילו על ציר ה-Y זמן תגובה ממוצע. היטל לציר ה-X נותן את כמות צעדי האימון המתאים לאותו העיגול ואילו היטל לציר ה-Y ו את זמן התגובה הממוצע של התגובות הנכונות באותו בלוק. כפי שניתן לראות בציור זמן התגובה הממוצע יורד עם האימון מה שמעיד על למידה. הוא הדין ב% הטעיות. יתר על כן לשיפור בביצוע צורה מאד טיפוסית הוא הולך וקטן ככל שהאימון מתקדם עד להגיעו לרמה האסימפטוטית לציר ה-X. חוקרים רבים (Logan, 1988; Newell & Rosenbloom, 1988) טוענים כי עקומת הלמידה מתוארת היטב על ידי פונקציית חזקה ואף מדברים על "חוק החזקה של אימון". הקו השחור שבציור מס' 4 מתאים לחוק החזקה שניתן לרשום אותו כ:

$$RT = A + B(Block)^{-c}$$

כאשר A הוא זמן התגובה הממוצע בתחילת האימון B הוא זמן התגובה בסופו ו c הוא ביטוי לקצב הלמידה אילו

באופן הכללי ביותר אפשר לומר שלמידה ובפרט אותה למידה המתרחשת בבית ספר מתייחסת לשני דברים שניתן להבחין ביניהם כ"לדעת את" מה נקרא לעתים בשפה טכנית **ידע הצהרתי או דקלרטיבי** (declarative knowledge) ו"לדעת איך" מה שנקרא ה **ידע תהליכי או פרוצדוראלי** (procedural knowledge). כך למשל כאשר מדובר בלימוד הכפל הרי יש ללמוד מחד שכפל הוא למעשה "סכום של חיבורים" וגם עד כמה שניתן תוצאות של פעולות כפל מסוימות) – אותו לוח "הכפל" המפורסם שכולנו שיננו בילדותינו. זהו ידע הצהרתי. במקביל הידע שלנו לפתור תרגילים שפתרונם אינו שמור בזיכרון הוא מבחינת ידע תהליכי.

שאלה מתבקשת היא למה מתייחס תהליך הלמידה המתואר בציור 4. לשאלה זאת ניתן תשובות שונות. מחד נטען כי העקומה מתארת התפתחות בסיס נתונים שממנו אנו שולפים פתרונות מוכנים מראש לתרגילים ובעיות שפתרנו בעבר (Logan, 1988). על פי גישה זאת העקומה מתארת את התפתחות הידע ההצהרתי. מאידך (ראה Anderson, 1992) הוצע כי

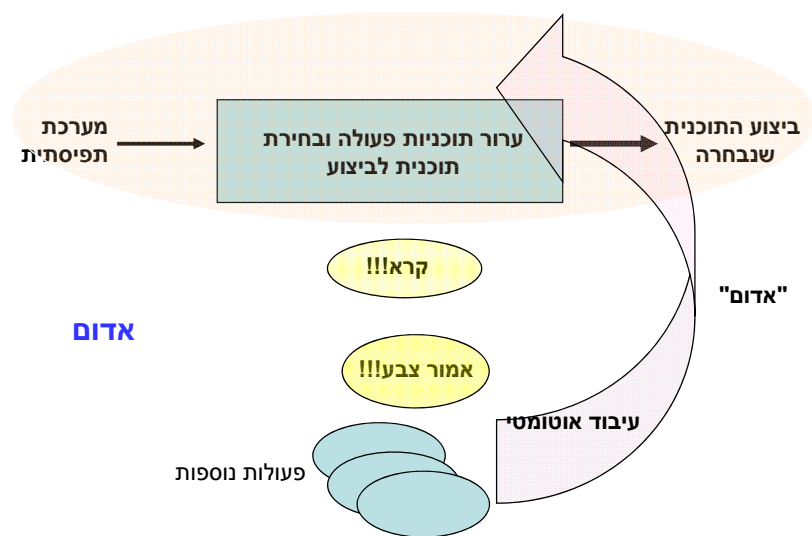
העקומה מתארת את שיפור הידע התהליכי כלומר שיפור העיבוד המנטאלי המאפשרים להגיע לפיתרון. הוצע גם מודל שקיימות למעשה שתי עקומות למידה שכל אחת מהן מתוארת באמצעות פונקצית חזקה (Rickard, 1997). על פי מודל זה העקומה המתאימה לשלבי הלמידה הראשונים מתארת רכישת ידע תהליכי ואילו העקומה המתארת את שלבי הלמידה המתקדמים מתאימה לרכישת ידע הצהרתי.

נראה כי למרות הויכוח הקיים הולכת ומתגבשת תמונה על פיה בשלבים מתקדמים של האימון היינו באותו שלב בו בציר 4 העקומה נראית אסימפטוטית, הביצוע הוא במידה רבה אוטומטי. כך לדוגמא כאשר שואלים אותנו כמה זה 6 כפול 5, רובינו עונים מייד וללא היסוס ותוך תחושה שאין לנו צורך לחשב. בין המאפיינים של עיבוד אוטומטי מונעים בין היתר שימוש מינימאלי במשאבים מנטאליים, העובדה כי עיבוד אוטומטי יכול להתחיל מבלי שנתכוונו וכי בעת שהוחל בו הוא מתנהל עד סופו ואכן מה שמשותף לכל התהליכים האוטומטיים הוא שאין לנו צורך בניטור מודע (Conscious monitoring) כלומר אין לנו צורך לתכנן ולבדוק כל שלב עד אשר אנו מגיעים לפתרון (Bargh, 1992).

הגישה הדומיננטית כיום תטען כי ביצוע אוטומטי דורש למעשה פעילות מנטאלית מינימאלית אם בכלל, והפתרון או תוכנית הפעולה המתאימה, "נשלפים" מבסיס הנתונים שהתפתח בתהליך הלמידה. מבין הפעולות הקוגניטיביות שלנו עיבוד אוטומטי בולט במיוחד בקריאה. קל להדגים זאת כאשר מבקשים מאנשים לקרוא בשם הצבע של מילת צבע. כך למשל נסו להגיד את צבע הדיו של המילה "אדום" (מצב זה קרוי מצב "לא תואם"). הדבר קשה ואכן זמן התגובה (ז"ת) כלומר הזמן עד אשר האדם מתחיל להגיב ארוך יותר מאשר במצב בו יש התאמה בין צבע הדיון ומילה הכתובה "אדום" (מצב זה קרוי מצב "תואם") או שהכתוב אינו מילה צבע, למשל "שש". תופעה זאת דווחה לראשונה על ידי Stroop (1935) וקרויה על שמו. היא וגדרת פורמאלית כפער זמן בין ז"ת במצב הלא-תואם לבין ז"ת במצב התואם.

Norman & Shallice (1986) הציעו מסגרת תיאורטית נוחה לניתוח עיבוד אוטומטי של מידע בכלל ואת תופעת האוטומטיות בקריאה כולל הסטרופ בפרט. נקודת המוצא של מסגרת זאת היא שעיבוד אוטומטי הוא תולדה של עירור תוכניות עיבוד מוכנות לראש עבור גירויים שהתנסו בהם בעבר. תוכניות אלה מעוררות מעצמן ברגע שהגירוי מופיע לפנינו. כך בעת שמופיעה מילה כתובה למשל המילה "אדום" כתובה בדיו כחול. אנו יכולים לקרוא אותה, לדווח את צבעה, לספור את האותיות שלה וכו'. (ראה ציור 5).

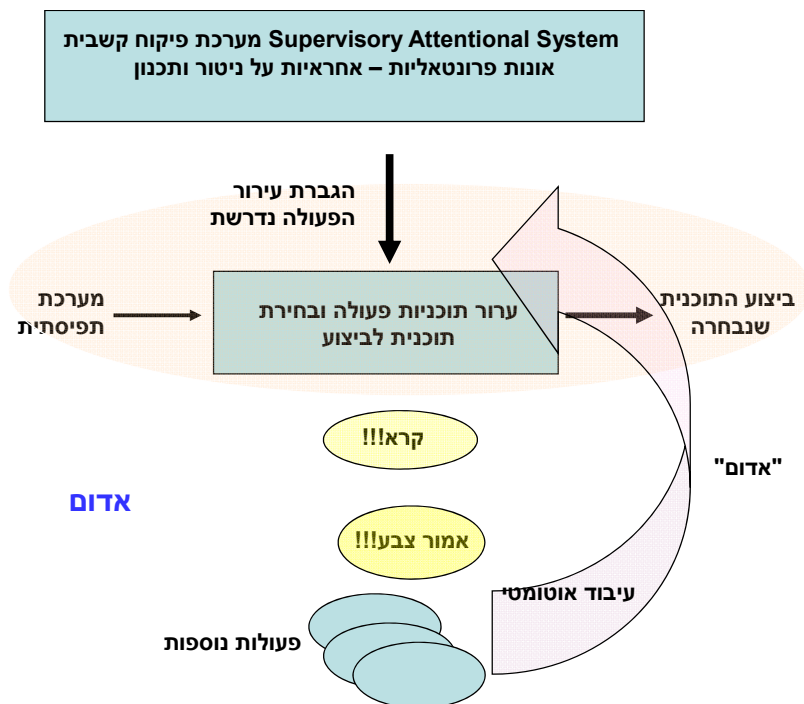
ציור 5 - ביצוע פעולה אוטומטית על פי המודל של Norman & Shallice : בהעדר הוראה ספציפית נקרא את המילה " אדום"



בהעדר הוראות ספציפיות אנו ברוב המקרים נקרא אותה. זאת משום שהתוכנית לקריאה היא כפי הנראה המעוררת ביותר מבין התוכניות המוכנות שאנו יכולים להפעיל על המילה כתובה שכן

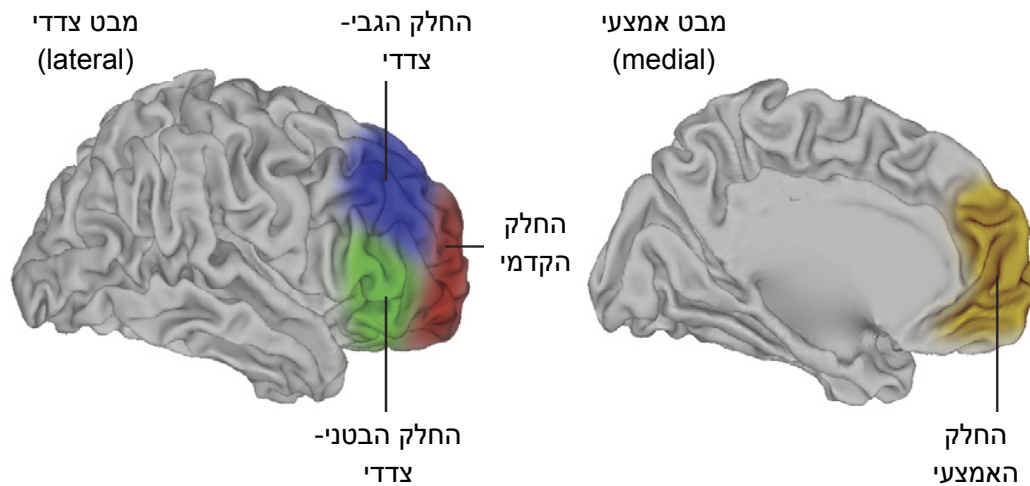
בדרך כלל כאשר אנו נתקלים ברצפי אותיות במהלך חיינו אנו קורים אותם. כלומר עיבוד אוטומטי הוא בעצם ברירת המחדל לעיבוד הגירוי המסוים. (Besner, Stoltz & Boutilier, 1997). כמובן שלעתים אנו מתכוונים לעשות דברים אחרים בהיתקלנו במילה כתובה, למשל לדווח את צבע. פעולה מכוונת כזאת מתאפשרת על פי המודל באמצעות מערכת פיקוח קשבית - Supervisory Attentional System (ראה ציור 6) .

ציור 6 - ביצוע פעולה מכוונת על פי המודל של Norman & Shallice תוך הפעלת מערכת בקרה קשבית : בהינתן הוראה לומר את צבע הדין יוגבר עירור התוכנית המתאימה ונאמר "כחול"



מערכת זאת פועלת באמצעות השפעה על מידת העירור של תוכניות הפעולה השונות ובמקרה של הדוגמא שלנו היא תגביר את העירור של התוכנית לדווח הצבע על מנת להפוך אותה לתוכנית בעלות העירור הגבוה ביותר ולגרום לה להתבצע. כדאי לשים לב שבמונחים של מטלת סטרופ מדובר בגירוי לא תואם. זמן התגובה המוארך של גירויים כאלה נגרם על פי המודל בגלל הצורך להתגבר על העירור המוגבר של התוכנית לפעולת הקריאה. . המבנים המוחיים אשר מעורבים במערכת הבקרה הקשבית הם האונות הפרה-מצחיות (prefrontal cortex, ציור 7). אזורים אלו פעילים במגוון פונקציות אשר המשותף להן הוא דרישה לעיבוד המטלה מעבר לביצוע מתורגל מיומן, ואוטומטי. על כן אזורים אלו פעילים במגוון פונקציות הקשורות ללמידה והטמעתה. למשל, בעיכוב תגובה לא תואמת את הסיטואציה, זכירה ומניפולציה של חומר לאחר תקופה של עיכוב, החלפה בין שניים או יותר אלטרנטיבות, יזימה כאשר אין רמז חיצוני שיעודד את ההתנהגות, או פיתוח אסטרטגיות. בנוסף, האזור הפרהפרונטלי לדעת כמה תיאורטיקנים הוא גמיש ודפוס הפעילות בו משתנה בהתאם לסוג המטלה (Duncan, 2001). עם זאת ישנו קונסנזוס כי האונות הפרה-מצחיות יכולות להטות את הפעילות באזורים אחרים במוח, ועל כן לסייע בהפניה של קשב לחומר למידה מסוים, לניטור של טעויות ולהתמחות של יכולות קוגניטיביות על ידי גיוס משאבים, ועיצוב מערכת אזורים אשר פעילים לפונקציות שונות.

ציור 7 – חלוקה של הקורטקס הפרה-מצחית (prefrontal cortex) (נלקח מאת Gilbert & Burgess, 2008).



הבסיס הנאורנאלי של למידה

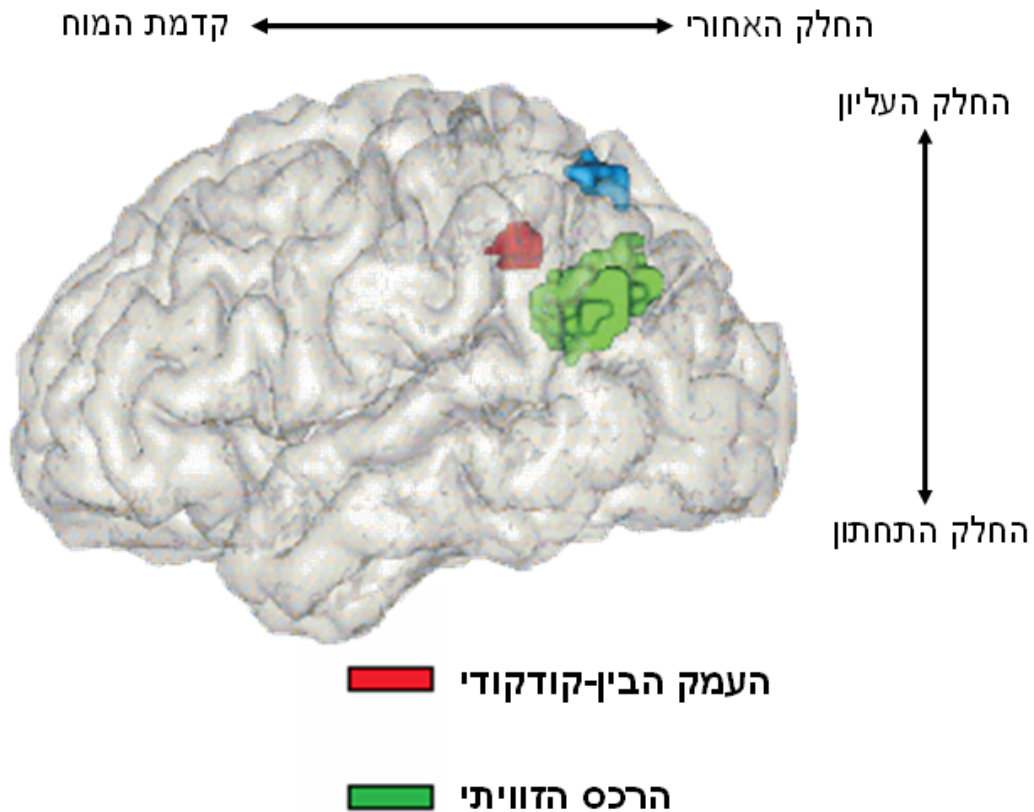
כפי שתואר מעלה פעילויות קוגניטיביות רבות דורשות ביצוע אוטומטי. אוטומטיות זו איננה שמורה לבודדים ובעלי סגולה. להיפך, עם האפשרות לרכישת השכלה, רוב הציבור הוא בעל יכולת קריאה אוטומטית, ופעילות חשבונית אוטומטית, ובעיות באוטומטיזציה מצביעה לעיתים על לקות למידה באותו תחום (Rubinsten & Henik, 2005, 2006). בתחום החשבון למשל, מספר מחקרים בדקו את האזורים הקשורים בלמידה של פעילות חשבונית, ובהשפעה של סוג הלמידה על ההטמעה של החומר הנלמד וההשפעה על מערכת האזורים המוחיים המעורבים באריתמטיקה.

האזורים הפעילים בפעילות מספרית כוללים בעיקר את אונה הקודקודית (parietal lobe) והאונה המצחית (frontal lobe). מחקרים רבים שנערכו בשנים האחרונות מצביעים כי אזור ספציפי באונה הקודקודית הנקרא העמק הבין-קודקודי (intraparietal sulcus, ציור 7) אחראי לעיבוד וייצוג מנטאלי של ספרות ופגיעה באזור זה יכולה לגרום לאקלקוליה (acalculia) –

פגיעה חריפה ביכולת לבצע פעולות חישוביות אצל מבוגרים (Ashkenazi, Henik, Ifergane,)
& Shelef, 2008; S. Dehaene & Cohen, 1997; Lemer, Dehaene, Spelke, & Cohen,
2003). לחילופין התפתחות לא תקינה של אזור זה מתקשרת עם דיסקלקוליה התפתחותית
(developmental dyscalculia) (Price,) (Isaacs, Edmonds, Lucas, & Gadian, 2001; Price,)
(Holloway, Rasanen, Vesterinen, & Ansari, 2007; Rotzer et al., 2008). אזור אחר
הנמצא בסמיכות לעמק הבין-קודקודי, נקרא הרכס הזוויתי (angular gyrus, ציור 8)
ובהמיספרה השמאלית נמצא נחוץ לשליפה ישירה של עובדות חשבוניות המתווכות בצורה
וורבלית (לדוגמא, 6 כפול 5 שווה 30) (S. Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003;)
(Van Harskamp & Cipolotti, 2001; van Harskamp, Rudge, & Cipolotti, 2002).

ציור מס 8

ציור 8 – אזורים מוחיים המעורבים בפעילות חשבנית בהמיספירה השמאלית. (עבר שינוי מ
(Dehaene et al., 2003). בצבע אדום מופיע העמק הבין-קודקודי, בצבע ירוק מופיע הרכס
הזוויתי. האזור הכחול לא נידון במאמר ועל כן לא יורחב עליו הדיון.



אמרנו כבר כי ביצוע אוטומטי מבוסס על שליפת הפיתרון הנדרש מהזיכרון בעוד ביצוע לא
אוטומטי דורש חישוב מנטאלי מפורט. מתברר כי שני סוגי פתרון אל ה נשענים כפי הנראה על
תשתית נאורונאלית שונה. Delazer ועמיתיה (Delazer et al., 2003) השוותה באמצעות
fMRI את ההבדל בפעילות המוחית כאשר נבדקים פותרים בעיות כפל שהם התאמנו עליהן
לעומת בעיות כפל אשר הם לא התאמנו עליהן. הם מצאו עלייה בפעילות הרכס הזוויתי השמאלי
במהלך פעילות כפל של בעיות שנכללו באימון אך לא במקרה של בעיות אשר הנבדקים לא

התאמנו עליהן. לעומת זאת העמק הבין-קודקודי השמאלי הראה את התמונה ההפוכה. אזור זה אשר ידוע כפעיל במניפולציה, עיבוד וחישוב של כמויות (Cohen Kadosh, Lammertyn, & S. Dehaene et al., 2003; Izard, 2008) היה פעיל יותר עבור בעיות כפל אשר הנבדקים לא התאמנו עליהן לעומת בעיות כפל אשר התאמנו עליהן. מחקר זה מציע כי כאשר התוצאה של בעיה חשבונית איננה יכולה להישלף ישירות מהזיכרון (שוב 5 כפול 6 שווה 30), יש צורך בפעילות באזור אשר אחראי לחישוב ומניפולציה של כמויות אשר על מנת להגיע לתוצאה הנכונה יפעיל אלגוריתם (למשל, 6 ועוד 6 ועוד 6 ועוד 6 ועוד 6 שווה 30).

מעניין לציין כי ילדים בעלי דיסקלקוליה התפתחותית חווים קושי לשלוף בעיות חשבוניות מהזיכרון ונסמכים על פרוצדורות שמאפיינות בעלי יכולות חשבוניות יותר נמוכות יחסית לגילם הכרונולוגי (Geary, 2004). מחקרים בעתיד יצטרכו למצוא האם חוסר יכולת זו היא כתוצאה מפעילות אי תקינה של העמק הבין-קודקודי (מניפולציה של כמויות) או הרכס הזוויתי (יכולת שליפה ישירה מהזיכרון). שני אזורים אלו אשר נמצאים מעורבים בבעיות התפתחותיות אשר משפיעות ישירות או בעקיפין על היכולת החשבונית כגון דיסקלקוליה התפתחותית אשר מערבת קושי ביכולות חשבוניות ונראית שקשורה בפעילות תקינה של העמק הבין-קודקודי, או תסמונת גרסטמן (Gerstmann Syndrome) התפתחותית, המתאפיינת במכלול קשיים הכוללים, קושי בזיהוי אצבעות ויכולת לכתוב, דיסקלקוליה, ובלבול בין ימין לשמאל, וקשורה לרכס הזוויתי השמאלי, הם מקור למחקר פעיל בנושא.

במחקר יותר מאוחר של Delazer ועמיתיה (Delazer et al., 2005) הנבדקים למדו לפתור חלק מבעיות החשבון על ידי שימוש בלמידה המבוססת על הפעלת אלגוריתם (למשל על ידי שימוש ברצף פעולות חשבון, $a * b = (b-a) + 1 + b$), או על ידי שימוש בשינון כך שתיווצר אסוציאציה ישירה בין תוצאה ספציפית לתרגיל חשבוני (למשל $3 \# 4 = 26$). ברמה ההתנהגותית נמצא כי הנבדקים ביצעו העברה הפעלת הידע שנרכש) לתרגילים חדשים כאשר הם התאמנו בהפעלת האלגוריתם. יתר על כן נמצא כי לטווח הארוך שימוש באלגוריתם הוא

יותר יעיל מאשר שינון. התוצאות מהדמיה מוחית הראו שוב שפתרון בעיות חדשות אשר הנבדקים לא למדו לפתור לפני כן מלווה בעליית פעילות בעמק הבין-קודקודי, בעוד שפתרון בעיות אשר הנבדקים למדו לפתור בזמן האימון הראו עלייה ברכס הזוויתי.

פתרון בעיות שנלמדו על ידי שינון התבטא בפעילות מוגברת במספר אזורים כולל הרכס הזוויתי כאשר נפתרו על ידי שינון. פעילות זו פורשה כתוצאה כמבטא פעילות ורבלית ושליפה ישירות מהזיכרון. למשל הנבדקים שננו ששלוש # ארבע שווה עשרים ושש ולכן הגיבו מבלי הצורך להפעיל את סדרת הפעולות הנדרשת על פי האלגוריתם. לעומת זאת למידת האלגוריתם הובילה לפעילות באזורים אשר מעורבים בדימוי מנטאלי של התרגיל והפרוצדורה אשר יש לבצע, ככל הנראה עקב הדרישה לבצע העברה של פעילות מסוימת לפעילות אחרת.

מחקרים אחרים גילו כי מיומנויות חשבוניות (למשל כפל לעומת חיסור) גורמות להפעלה של אזורים מוחיים שונים (S. Dehaene, Molko, Cohen, & Wilson, 2004), זאת מעקבות אסטרטגיות שונות ודרכי לימוד. למשל מכיוון שלימוד לוח הכפל נלמד על ידי שינון ושליפה ורבלית מהזיכרון, הוא מבוסס על פעילות של הרכס הזוויתי. לעומת זאת חיסור לא נלמד על ידי אימון של שליפה מהזיכרון אלא על ידי הפעלת האלגוריתם של חיסור, ועל כן הוא מלווה בפעילות של העמק הבין-קודקודי. נמצא גם כי למידה של לוח הכפל גורמת להעברה של הפעילות מהעמק הבין-קודקודי לרכס הזוויתי, בעוד שלמידה של פעילות חיסור לא גורמת לעברה של הפעילות לאזור מוחי אחר. למידה של שתי פעולות חשבון אלו גרמו עם זאת לירידה משותפת באזורים אחרים הקשורים לזיכרון עבודה ושליטה קוגניטיבית אשר מבוצעים באמצעות מערכת פיקוח קשבית ואשר נדרשים בעיקר בשלבים הראשונים של הלמידה (ראה/ראי מטה), לפני שהביצוע הופך מיומן ואוטומטי (Ischebeck et al., 2006). חשוב להדגיש שבעוד שמחקרים אלו התבססו על למידה מקיפה שארכה כשבוע ימים, מחקר אחר גילה כי השינויים בפעילות המוחית המתלווים ללמידה של פעילות חשבונית יכולים להיות מהירים ביותר,

ולהתרחש גם בפחות משעה, ועדיין להיות דומים לשינויים בפעילות המוחית שאובחנו לאחר שבוע של למידה (Ischebeck, Zamarian, Egger, Schocke, & Delazer, 2007).

Tzelgov ועמיתים (Tzelgov, Yehene, Kotler, & Alon, 2000) חקרו למידת סדר של ספרות מלאכותיות. במהלך הלמידה הנבדקים התאמנו על זוגות סמוכים (למשל זוג ספרות מלאכותיות אשר מקביל לזוג 2-3), כאשר לאחר מכן הם נבחנו על ההשוואה של זוגות לא סמוכים (למשל זוג ספרות מלאכותיות אשר מקביל לזוג 2-6). (Van Opstal ועמיתיו (Van Opstal, Verguts, Orban, & Fias, 2008) בדקו את השפעה של למידה מעין זו על הפעילות המוחית. הם מצאו כי הלמידה שלוותה בשיפור בביצוע ההתנהגותי, הראתה עליה בפעילות המוחית של הרכס הזוויתי השמאלי. העלייה הזו הייתה לא צפויה, שכן השוואה של כמויות וייצוגם מלווה לעיתים קרובות על ידי פעילות של העמק הבין-קודקודי. מכיוון שניגוד למחקרו של Tzelgov ועמיתים (2000), במחקר זה הנבדקים נחשפו למקבילה הספרתית של כל ספרה מלאכותית, העלייה בפעילות של הרכס זוויתי הוסברה כתוצאה מאסטרטגיה לייצוג ורבלי של הגירויים (למשל, הספרה המלאכותית של 1, תויגה כ 1), הסבר זה נתמך על ידי תשאול של הנבדקים על האסטרטגיה אשר נקטו בה במהלך הניסוי.

לסיכום, מחקרים אלו בתחום למידת החשבון ומספרים הראו כי האונה הקודקודית השמאלית, ובעיקר הרכס הזוויתי פעילים בעת לימוד פעולות חשבון הנשענות על שליפה ורבלית. בעוד ששימוש באלגוריתמים ומניפולציה של כמויות נשענות על פעילות של העמק הבין-קודקודי. עם זאת יש לציין כי והפעילות המוחית הנלווית נראים כתלויים בסוג החומר הנלמד ואופיו (למשל כפל מול חיסור).

התפתחות מוחית ולמידה

חשוב לציין שבעוד שהראנו מעורבות של אזורים מסוימים בלמידה, אין אנו טוענים כי אזור אחד וספציפי אחראי לרכישת מיומנות, בלשון אחר איננו טוענים כי יש מיקומים ספציפיים במוח

("מודולות") שהן הבסיסי העצבי של רכישת של מיומנות נתונה. Johnson and Munakata (2005), הציעו כי ההתמחות של אזורים מוחיים בפעילות נתונה אשר בתחילה לא הראו התמחות בפעילות זו, היא תוצאה של אינטראקציה עם אזורים אחרים במוח התומכים בביצוע הפעילות הזו. למשל, Cohen Kadosh and Walsh (Cohen Kadosh & Walsh, in press) הציעו כי האונה הקודקודית איננה בעלת יכולת חשבונית מלידה. יכולת זו מתפתחת כתוצאה מאינטראקציה עם אזורים המעורבים בעיבוד תפיסתי באונה הטמפורלית, ואזורים המעורבים בעיבוד שפתי באונה המצחית. אינטראקציה זו בין האזורים השונים מובילה להיווצרות היכולת לתפוס, להבין ולייצג מספרים בצורה סימבולית (למשל מילה שלוש, הספרה 3). על כן היכולת להבנה מספרית איננה תלויה אך ורק באונה הקודקודית, או בעמק הבין-קודקודי, אלא בפעילות תקינה של אזור זה יחד עם אינטראקציה תקינה עם אזורים אחרים במוח. הממצא שאחוז גבוה של תלמידים הסובלים מבעיות חשבוניות סובלים גם מבעיות קריאה, תומך ברעיון שאינטראקציה לא אופטימאלית בין אזורים הפעילים בשפה ואזורים הפעילים ביכולת חשבונית, יכולה לגרום לכשל רב-גורמי. דוגמא אחרת היא למידת שפה שנייה בבית הספר. בעוד שרכישת שפה ראשונה היא קלה, ונרכשת על ידי למידה סמויה, למידת שפה שנייה, המתרחשת לרוב בבית הספר, היא לעיתים רבות לא טריוויאלית. ההסבר לכך הוא בכך שהשינויים המוחיים בעקבות למידת שפה שנייה מתרחשים שנים לאחר למידת שפת האם, ומתרחשים לעיתים כאשר שפת האם פעילה במשך שאר שעות היממה (למשל מחוץ לשיעורי אנגלית). מכיוון ששפת האם כבר עיצבה את המערכת לשפה אחת, לשפה השנייה יש קושי לגרום לשינויים באותה מערכת "מבוצרת".

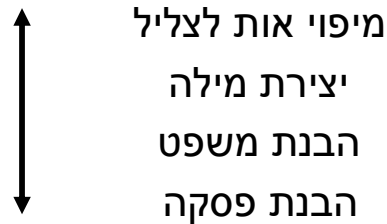
למידה, אוטומטיות ותהליכי בקרה

פעילות אוטומטיות באה ליד ביטוי באופן הברור ביותר כאשר היא מנוגדת למה שאנו רוצים לעשות ותופעת הסטרופ היא הביטוי לכך. אולם פעילות כזאת משתלבת היטב בפעולותינו

המכוונות ותורמת להן. זאת בגלל יכולתה להתבצע מבלי שנצטרך לחשוב עליה (או במונחים של המודל של Norman & Shallice מבלי שננטר את הפעלתן באמצעות מערכת הבקרה הקשבית). כך למשל כאשר אנו נדרשים לקרוא פסקה ולהבין אותה, אנו נדרשים גם (מבלי שהדבר נאמר במפורש) לקרוא את המילים הבודדות. העובדה שהקריאה של המילים הבודדות היא פעולה שיכולה להתבצע "באופן אוטומטי", לפחות בשפתינו הראשונה בה אנו מיומנים מספיק, יש בה יתרון רב.

כדי להדגים זאת, כדאי לחשוב על מצב שבו אנו מתבקשים לקרוא פסקה ולהתייחס לתוכנה – למשל אנו צריכים לקרוא פסקה שלקוחה מספר היסטוריה המתאר את עמדות היישוב בארץ ישראל במלחמת העולם השנייה להבין מתוכו עש כמה חששו תושבי הארץ מפלישה גרמית. מטלה כזאת מחייבת התייחסות לתוכן הפסקה. מקובל להניח כי בני אדם מייצגים מנטאלית את פעולותיהם בצורה הירכית מנטרים אותה, כלומר ממבקרים את ביצועה ברמה הגבוה ביותר האפשרית (Vallacher & Wegner, 1987), שעה שהתהליכים הנמוכים יותר בהיררכיה מתבצעים ללא ניטור כלומר באופן אוטומטי. אם נניח כי קריאת המילים בודדת (נוסף לקריאת האותיות) מסוגלת להתבצע אוטומטית, פירושו של דבר כי הקורא מסוגל להפנות את משאביו המנטאליים להפקת המשמעות של המשפטים והפסקה כולה על מנת לבצע את המטלה הנדרשת. כלומר העובדה שפעולות מנטאליות פשטות יחסית, המהוות שלב בהיררכיה המגדירה פעילות מורכבת, מסוגלות להתבצע באופן אוטומטי היא שמאפשרת ביצוע יעיל של הפעולה מורכבת. עם זאת נראה שלפחות מבחינת מוחית, מומחיות במטלה מסוימת לא תמיד מוליכה לירידה בפעילות באזורים אשר אחראיים לביצוע התהליכים הניהוליים באונות המצחיות (Bor & Owen, 2007).

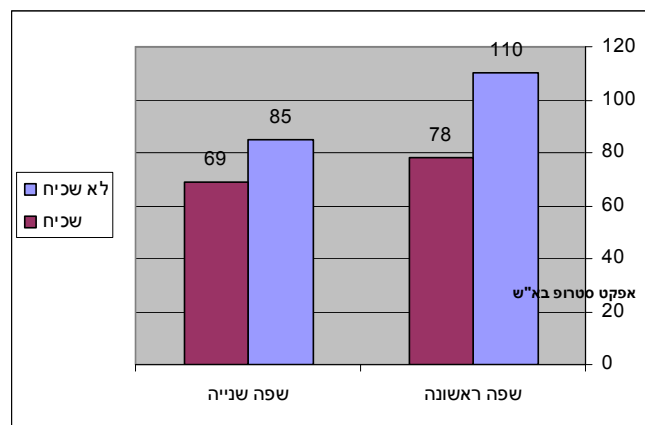
ארגון היררכי של קריאת פסקה לצורך הבנתה



העובדה שפעילות מורכבת היא ברירת המחדל לעיבוד גירויים מסוימים עלולה לעורר את השאלה האם אין בכך כדי להפריע כאשר אנו נדרשים לבצע פעולה אחרת לגבי גירויים אלה. זה עשוי היה להביא למצב שדווקא מי שמיומן יותר בפעילות נתונה עד כדי היכולת לבצע באופן אותה באופן אוטומטי עשוי להיפגע מבחינת יכולתו לבצע פעילות אחרת לגבי אותו הגירוי. אולם מתברר שאין הדבר כך – קימת סדרה של ממצאים המראה כי רמה גבוהה של מיומנות דווקא מגבירה ת היכולת למנוע לבצע פעילות בלתי רצויה (Logan, 1988), כמו גם את היכולת לצמצם פעילות אוטומטית בהתאם לנסיבות כפי שהראו Tzelgov, Henik & Leiser, (1991) במחקרם. חוקרים אלה ביקשו מנבדקים דו-לשוניים לבצע מטלת סטרופ. חלק הגירויים היו כתובים בשפתם הראשונה של הנבדקים בחלק מהם רוב הגירויים היו כתובים בשפתם השנייה. הגירויים אורגנו בבלוקים אשר במחציתם רוב הגירויים בשפתם הראשונה של הנבדקים, ובמחציתם רוב הגירויים בשפתם השנייה של הנבדקים. גודלו של אפקט הסטרופ

(ההפרש בין התנאי התואם לתנאי התואם) שימש כמדד למידת האוטומטיות של קריאת מילים בודדות. תוצאות המחקר מוצגות בציור 10 .

ציור 10 – השתנות של אפקט הסטרופ עם רמת המיומנות



מתוך Tzelgov, Henik & Leiser, 1990

כפי שניתן לראות בציור מס 10 אפקט הסטרופ כלומר מידת האוטומטיות גדולה יותר בשפתם הראשונה של הנבדקים בה מיומנותם גדולה יותר. אך כדאי גם להתייחס במקביל ליכולתם של הנבדקים להקטין את אפקט הסטרופ בבלוקים בהם רוב הגירויים בשפתם הראשונה לעומת שפתם השנייה, במצב בו רוב הגירויים בשפה נתונה לעומת מצב בו מיעוט הגירויים הם באותה שפה. כאשר רוב הגירויים הם שפה נתונה שאר הנבדק יודע כי רוב הגירויים הם באותה שפה. השאלה היא באיזו מידה הוא יכול להיערך לכך ולחסום הפרעה בשפה זאת דווקא. יכולת זאת מבטא את השפעתה של מערכת הבקרה הקשבית אותה הזכרנו כבר. מעיון בציור 10 מתברר כי בשתי השפות הנבדקים מסוגלים במידה מסוימת לצמצם את אפקט הסטרופ כאשר רוב

הגירויים הם באותה שפה. כלומר בשתי השפות אפקט הסטרופ קטן יותר כשאר רוב הגירויים הם באותה שפה. אך מה חשוב יותר הוא שבעוד בשפתם הראשונה של הנבדקים צמצום זה הוא 32 אלפיות שנייה הרי שבשפתם הראשונה הוא 16 אלפיות שנייה. כלומר מיומנות מביאה עמה לא את היכולת באופן אוטומטי על יתרונותיה אלא גם את יכולת לצמצם פעילות זאת כאשר היא לא רצויה.

כיצד אוטומטיות יכולה לעצב את הלמידה? בעוד שאנו משתדלים שתהליכים קוגניטיביים יהפכו ליותר אוטומטיים, קיים החשש כי האוטומטיות תוביל להטמעה של דפוסים שאינם מעוררים את הדפוס המצופה בעקבות למידה אופטימאלית. למשל כתוצאה מכשל בהטמעה של המטרה או פרוצדורה, או בשל היבטים נורולוגיים. למשל, ילדים עם בעיות חשבון מאמצים אסטרטגיות לפתרון בעיות חשבון, אשר אינן אופטימאליות. שינוי אסטרטגיות אלו בשלב מוקדם על ידי המורה, שימת דגש חזק עליהן תוך מתן עידוד, ובקרה עצמית, הוא חשוב על מנת לקדם את הלמידה, ולשפר את המיומנות. שינוי דפוס לא אדפטיבי אשר אומץ על ידי התלמיד מערב מספר פונקציות החל מניטור הפעילות אשר התלמיד מבצע על ידי מערכת הבקרה הקשבית, זיהוי האסטרטגיה המתבקשת תוך חיקוי והקטנת הפער בין האסטרטגיה הנוכחית לזו המתבקשת, הפעלה תקינה של האזור המעורב באסטרטגיה המתבקשת, ואינטראקציה תקינה של אזור זה עם מערכת הבקרה הקשבית באונה המצחית. דוגמא אחרת היא השימוש בפעלים יוצאים מהכלל בלימוד שפה שנייה (למשל cut). על מנת ללמוד כללים יוצאי דופן יש צורך בהפעלה של מערכת הבקרה הקשבית על מנת שלא תתבצע אוטומטיזציה לפחות בשלבים הראשונים של רכישת השפה ולביצוע מאלאדאפטיבי על ידי הכללה של כל הפעלים על ידי תוספת של ed על מנת לציין את הפועל בלשון עבר. יש צורך באיתור הטעות ותיקונה, עד אשר המטרה תושג, במקרה זה שלשון העבר הוא cut, ואוטומטיזציה תתרחש. עם זאת אי איתור הטעות ותיקונה, יגרום לאוטומטיזציה של דפוס שגוי, וקושי לתקן דפוס זה בעתיד. חשוב לציין כי הדוגמאות הללו מתייחסות ללמידה גלויה. בלמידה סמויה של שפה על ידי הפעוט, לאחר שלב של הכללת יתר

של פעלים לא-רגילים לפעלים רגילים, הפעוט לומד בצורה סמויה את הפעלים היוצאים מהכלל. דוגמאות אלו מדגישות כי יש צורך באיתור של הטעות ותיקונה, הן על ידי משוב חיצוני, במקרים בהם מערכת הבקרה הקשבית לא איתרה את הפער בביצוע בפועל לדפוס התקין. יוצא אפוא כי למידה גלויה וסמויה עיבוד אוטומטי, עיבוד אוטומטי וניטור באמצעות מערכת בקרה קשבית במערך הלמידה. מבנה המוח וארגונו מהווים את המנגנון המאפשר זאת.

- Adams, J. (1987). "Historical review and appraisal of research of learning retention and transfer of human skill." Psychological Bulletin 101: 41-75.
- Ashkenazi, S., Henik, A., Ifergane, G., & Shelef, I. (2008). Basic numerical processing in left intraparietal sulcus (IPS) acalculia. Cortex, 44, 439-448.
- Anderson, J. (1992). "Automaticity and the ACT* theory." American Journal of Psychology 105: 165-180.
- Besner, D., J. Stolz, et al. (1997). "The Stroop effect and the myth of automaticity." Psychonomic Bulletin & Review 4: 221-225.
- Bor, D., & Owen, A. M. (2007). Cognitive training: Neural correlates of expert skills. Current Biology, 17, R95-R97.
- Cohen Kadosh, R., Lammertyn, J., & Izard, V. (2008). Are numbers special? An overview of chronometric, neuroimaging, developmental and comparative studies of magnitude representation. Progress in Neurobiology, 84, 132-147.
- Cohen Kadosh, R & Walsh, V. (in press). From magnitude to natural numbers: A developmental neurocognitive perspective. Behavioral and Brain Sciences
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. Cortex, 33, 219-250
- Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., & Wilson, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. Current Opinion in Neurobiology, 14, 218-224.

- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. Cognitive Neuropsychology, 20, 487-506.
- Delazer, M., Domahs, F., Bartha, L., Brenneis, C., Lochy, A., Trieb, T., et al. (2003). Learning complex arithmetic—an fMRI study. Cognitive Brain Research, 18, 76-88.
- Delazer, M., Ischebeck, A., Domahs, F., Zamarian, L., Koppelstaetter, F., Siedentopf, C. M., et al. (2005). Learning by strategies and learning by drill—evidence from an fMRI study. NeuroImage, 25, 838-849.
- Dulany, D., R. Carlson, et al. (1984). "A case of syntactic learning and judgment: How conscious and how abstract?" Journal of Experimental Psychology: General 113: 541-555.
- Duncan, J. (2001). An adaptive coding model of neural function in prefrontal cortex. Nature Reviews Neuroscience, 2, 820-829.
- Geary, D. C. (2004). Mathematics and learning disabilities. Journal of Learning Disabilities, 37, 4-15.
- Gilbert, S. J., & Burgess, P. W. (2008). Executive function. Current Biology, 19, R110-R.114
- Isaacs, E. B., Edmonds, C. J., Lucas, A., & Gadian, D. G. (2001). Calculation difficulties in children of very low birthweight. A neural correlate. Brain, 124, 1701-1707.
- Ischebeck, A., Zamarian, L., Egger, K., Schocke, M., & Delazer, M. (2007). Imaging early practice effects in arithmetic. NeuroImage, 36, 993-1003.

- Ischebeck, A., Zamarian, L., Siedentopf, C., Koppelstaetter, F., Benke, T., Felber, S., et al. (2006). How specifically do we learn? Imaging the learning of multiplication and subtraction. NeuroImage, 30, 1365-1375.
- Johnson, M. H., & Munakata, Y. (2005). Processes of change in brain and cognitive development. Trends in Cognitive Sciences, 9, 152-158.
- Lemer, C., Dehaene, S., Spelke, E., & Cohen, L. (2003). Approximate quantities and exact number words: Dissociable systems. Neuropsychologia, 41, 1942-1958
- Logan, G. (1988). "Toward an instance theory of automatization." Psychological Review 91: 295-327.
- Logan, G. D. (1985). "Skill and automaticity: Relations, implications, and future directions." Canadian Journal of Psychology 39: 367-386.
- Newell, A. and P. Rosenbloom (1981). Mechanisms of skill acquisition and the law of practice. Cognitive skills and their acquisition. J. Anderson. Hillsdale, NJ, Erlbaum: 1-55.
- Norman, D. and T. Shallice (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behavior. In R. Davidson, G. Schwartz and R. Shapiro. (Ed.) Conscious and self regulation: Advances in research. New York, Plenum. 4: 1-18.
- Opitz, B., & Friederici, A. D. (2004). Brain correlates of language learning: The neuronal dissociation of rule-based versus similarity-based learning. The Journal of Neuroscience, 24, 8436-8440.

- Perlman, A. & Tzelgov, J. (2006) Interactions between encoding and retrieval in the domain of sequence-learning. (2006). "Interactions between encoding and retrieval in the domain of sequence-learning." Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition 32: 118-130.
- Perruchet, P. and C. Pacteau (1990). "Synthetic grammar learning: Implicit rule abstraction or explicit fragmentary knowledge." Journal of Experimental Psychology: General: 264-275.
- Price, G., Holloway, I., Rasanen, P., Vesterinen M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. Current Biology, 17, R1042-R1043.
- Reber, A. (1992). Implicit learning and tacit knowledge: An essay on the cognitive unconscious. New York, Oxford University Press.
- Redington, M. and N. Chater (1996). "Transfer in artificial grammar learning." Journal of Experimental Psychology: General 125: 123-138.
- Rickard, T. C. (1997). "Bending the power law: A CMPL theory of strategy shift and the automatization of cognitive skill." Journal of Experimental Psychology: General 126: 288-311.
- Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., von Aster, M., Klaver, P., & Loenneker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. NeuroImage, 39, 417-422.
- Rubinsten, O., & Henik, A. (2005). Automatic activation of internal magnitudes: A study of developmental dyscalculia. Neuropsychology, 19, 641-648.

- Rubinsten, O., & Henik, A. (2006). Double dissociation of functions in developmental dyslexia and dyscalculia. Journal of Educational Psychology, 98, 854-867.
- Stroop, J. (1935). "The basis for Ligon's theory." American Journal of Psychology 47: 499-504.
- Tzelgov, J. (1997). "Specifying the relations between automaticity and consciousness: A theoretical note." Consciousness and Cognition 6: 441-451.
- Tzelgov, J., A. Henik, et al. (1990). "Controlling Stroop interference: Evidence from a bilingual task." Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition 16: 760-771.
- Tzelgov, J., Yehene, V., Kotler, L., & Alon, A. (2000). Automatic comparisons of artificial digits never compared: Learning linear ordering relations. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 26, 103-120.
- Vallacher, R. R. and D. M. Wegner (1987). "What do people think they're doing? Action identification and human behavior." Psychological Review 94: 3-15.
- Van Harskamp, N. J., & Cipolotti, L. (2001). Selective impairment for addition, subtraction and multiplication. Implication for the organisation of arithmetical facts. Cortex, 37, 363-388
- Van Harskamp, N. J., Rudge, P., & Cipolotti, L. (2002). Are multiplication facts implemented by the left supramarginal and angular gyri? Neuropsychologia, 40, 1786-1793.

Van Opstal, F., Verguts, T., Orban, G. A., & Fias, W. (2008). (A hippocampal-parietal network for learning an ordered sequence. NeuroImage, 40, 333-441.

תעתועי האינטואיציה ופתרון בעיות במדע

רות סתוי וראובן בבאי

החוג להוראת המדעים, ביה"ס לחינוך ע"ש קונסטנטינר, אוניברסיטת תל-אביב

תוכן העניינים

- מבוא
- תיאורית הכללים האינטואיטיביים
- השפעת גורמים תלויי מטלה על מידת ההשפעה של הכלל "יותר מ- A, יותר מ- B"
- מחקרי זמן תגובה
- מחקר הדמיה מוחית
- השפעת התערבות חינוכית על מידת ההשפעה של הכלל "יותר מ- A, יותר מ- B"
- השפעת גורמים תלויי נבדק על מידת ההשפעה של הכלל "יותר מ- A, יותר מ- B"
- גיל הנבדק
- מדד הפרעה
- סיכום
- מקורות ספרות

מבוא

כולנו מודעים לקשיים שיש לתלמידים בלימודי המדע והמתמטיקה. כמו כן, מחקרים לאומיים ובינלאומיים כמו TIMSS ו-PISA וכן מספר רב של מקורות ספרות מראים באופן עקבי שתלמידים ומבוגרים רבים מתקשים בפתרון בעיות בתחומים אלה (Mullis, Duit, 2007; e.g., Martin, Gonzalez, & Chrostowski, 2004).

שנים רבות חוקרים ברחבי העולם את התפיסות ואת תהליכי החשיבה של תלמידים בתחומים אלה וכתוצאה, הצטבר ידע רב על תפיסת מושגים ועל מיומנויות חשיבה ופתרון בעיות של תלמידים במדע ובמתמטיקה. ההנחה העומדת ביסודם של מחקרים אלה היא שהבנתנו את דרכי החשיבה של תלמידים ואת קשייהם עשויה להביא לשיפור הוראתם. החוקרים בחנו את קשיי התלמידים מנקודות מבט שונות. אחת מהן שמה דגש על חשיבותן של סכמות חשיבה קוגניטיביות, לדוגמה, שימור, פרופורציה וכו'. מחקרים אלה גורסים כי תלמידים מתקשים בפתרון בעיות כאשר סכמות החשיבה הדרושות לפתרון הבעיה אינן זמינות להם, למשל כאשר סכמות אלו עדיין לא התפתחו או הבשילו (Lawson, 1995; Piaget, & Inhelder, 1969,). (Shayer, & Adey, 1981, 1974). גישה אחרת מסבירה את קשיי התלמידים בכך שיש להם תפיסות חלופיות שאינן עולות בקנה אחד עם התפיסות המדעיות המקובלות. התברר כי תפיסות אלה נרכשות לעיתים טרם הלמידה, הן יציבות מאוד וקשות לשינוי (Carey, 1985; Driver,). (Vosniadou, & 1994; Novak & Gowin, 1984; Osborne, & Freyberg, 1985; Ioannides, 1998). גישה נוספת להסבר קשיים בפתרון בעיות מבחינה בין שני סוגים של תהליכי חשיבה הנבדלים אחד מהשני: חשיבה פורמאלית/לוגית וחשיבה אינטואיטיבית (Evans, 1983; Tversky, & Kahneman, 1983; Sloman, 1996; Fischbein, 1987; Over, 1996). החשיבה האינטואיטיבית מבוססת בעיקר על התנסות יום יומית, ואילו החשיבה הפורמאלית/לוגית היא אנליטית ומבוססת על חוקים. תהליכי חשיבה אלה קיימים אצל כלנו בו זמנית וקיימת ביניהם השפעה הדדית אשר עשויה לעיתים להוביל למסקנות סותרות.

השפעתה של החשיבה האינטואיטיבית במדע ובמתמטיקה נחקרה בשנים האחרונות על ידי סטוי ותירוש אשר הציעו את "תיאורית הכללים האינטואיטיביים" (ראה לדוגמה, Stavy, & Tirosh, 1999a, 1999b, 2000; Tirosh, 1996). נתאר תחילה בקצרה תיאוריה זו.

תיאורית הכללים האינטואיטיביים

ניתוח תגובותיהם של תלמידים למגוון רחב של מטלות הראה כי תגובות שגויות רבות של תלמידים הן אינטואיטיביות. נמצא כי תגובות אלה נקבעות על פי מאפיינים חיצוניים של המטלה ולא דווקא על פי תחום התוכן שלה או מיומנויות וסכמות החשיבה הנדרשות לפתרונה.

מובאות להלן שתי דוגמאות למטלות שנחקרו במסגרת הכלל האינטואיטיבי "יותר מ- A, יותר מ- B".

דוגמה בפיזיקה

אדם מחזיק שתי קופסאות גפרורים בגובה של מטר מעל פני הקרקע. קופסה אחת מלאה בחול והאחרת ריקה. ברגע מסוים מרפה האדם משתי הקופסות. האם שתי הקופסאות תגענה לקרקע באותו הזמן? אם לא, איזו קופסה תגיע ראשונה?

על פי כללי הפיזיקה תגענה שתי הקופסאות לקרקע בו זמנית. עם זאת, מחקרים מראים שתלמידים רבים (לרבות סטודנטים לפיזיקה בשנתם הראשונה באוניברסיטה) סבורים כי הקופסה המלאה, הכבדה יותר, תגיע ראשונה לקרקע כי "יותר כבד- יותר מהר" (Champagne, Klopfer, & Anderson, 1980; Gunstone, & White, 1981).

דוגמה בביולוגיה

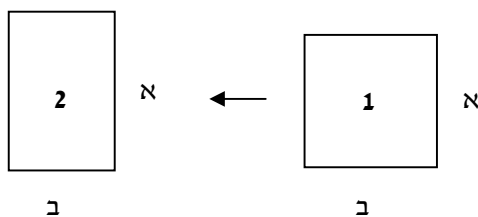
האם תא לבלב של עכבר גדול מ/שווה ל/ קטן מ/ תא לבלב של פיל? הסבר מדוע.

קוטר התא ביונקים הוא בדרך כלל קבוע. עם זאת, מהמחקר התברר כי תלמידים רבים טענו כי לפיל תאים גדולים יותר מאשר לעכבר כי "לבעל חיים גדול יותר - תאים גדולים יותר" (Tirosh, & Stavy, 1999a).

במטלות שתוארו מעלה נמצא כי תלמידים רבים בגילאים שונים עונים בהתאם לכלל "יותר מ-A, יותר מ-B". למטלות אלו הלקוחות מתחומי תוכן שונים, יש מאפיינים משותפים: בכל אחת מהן נתונים שני עצמים, שאחד מהם גדול מהאחר בתכונה בולטת A (כאשר A_1 גדול מ- A_2). התלמידים מתבקשים להשוות את העצמים לגבי תכונה אחרת B (כאשר B_1 אינו גדול מ- B_2). בשתי המטלות המוצגות לעיל ובעוד רבות שנבדקו תלמידים רבים השיבו כי "יותר מ-A (התכונה הבולטת השונה), יותר מ-B (התכונה שאותה התבקשו להשוות)". מטלות בעלות מאפיינים אלה מפעילות על פי תיאורית הכללים האינטואיטיביים את הכלל "יותר מ-A, יותר מ-B".

מובאות להלן שתי דוגמאות למטלות שנחקרו במסגרת הכלל האינטואיטיבי "A שווה, B שווה".

דוגמה בגיאומטריה



לפניכם ריבוע (צורה 1). בריבוע זה הגדילו את צלע א' ב- 20% והקטינו את צלע ב' ב- 20%. התקבל מלבן (צורה 2).

האם השטח של המלבן גדול מ/שווה ל/ קטן מ/ השטח של הריבוע?
הסבר מדוע.

על פי חישוב שטחים ניתן לראות כי שטח הריבוע גדול משטח המלבן. שטח הריבוע הוא $a \times a$ שהוא a^2 . שטח המלבן הוא $1.2a \times 0.8a$ שהוא $0.96a^2$. עם זאת, מהמחקר התברר כי תלמידים רבים טענו כי אחוז ההורדה וההוספה שווה, לכן לריבוע ולמלבן שטח שווה: "החסרה והוספה שווה, שטח שווה" (Tirosh, & Stavy, 1999a).

דוגמה בביולוגיה

לבני הזוג כרמל שני ילדים. לבני הזוג לוי ארבעה ילדים. האם הסיכוי שלמשפחת כרמל יש בן אחד ובת אחת קטן מ/ שווה ל/ גדול מ הסיכוי שלמשפחת לוי יש שני בנים ושתי בנות?

על פי חישוב הסתברותי ניתן לראות כי למשפחת כרמל סיכוי של 2:4 (50%) שיהיו להם בן ובת. למשפחת לוי לעומת זאת יש סיכוי של 6:16 (37.5%) שיהיו להם שני בנים ושתי בנות. מהמחקר התברר כי תלמידים רבים טענו כי מכיוון שהיחס בין מספר הבנים ומספר הבנות בשתי המשפחות שווה – הסיכוי למספר זה של בנים ובנות בשתי המשפחות, הוא שווה: "יש שווה", (Tirosh, & Stavy, 1999a).

במטלות אלה ובאחרות נתון שוויון בולט בתכונה אחת (כאשר A_1 שווה ל- A_2) והתלמידים מתבקשים להשוות את העצמים לגבי תכונה אחרת B (כאשר B_1 אינו שווה ל- B_2). בשתי המטלות המוצגות לעיל ובעוד רבות אחרות שנבדקו, תלמידים רבים השיבו כי " B_1 שווה ל- B_2 משום ש A_1 שווה ל- A_2 ". מטלות בעלות מאפיינים אלה מפעילות על פי תיאורית הכללים האינטואיטיביים את הכלל "A שווה, B שווה".

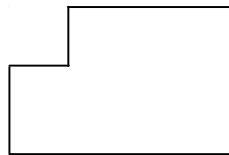
הטענה המרכזית של תיאורית הכללים האינטואיטיביים היא שתגובות תלמידים אינן נקבעות בהכרח על פי ידע ומיומנויות בתחום התוכן אלא נקבעות במידה רבה על-ידי מאפיינים חיצוניים בולטים של המטלה, אשר מפעילים מספר קטן של כללים אינטואיטיביים, ששניים מהם הודגמו מעלה. מכאן, שלכללים האינטואיטיביים יש כוח ניבוי. כלומר, כאשר מתארים מטלה מסוימת ניתן לנבא כיצד תלמידים יענו עליה על בסיס המאפיינים החיצוניים שלה ומספר קטן של כללים אינטואיטיביים. כמו כן, נמצא כי השפעת הכללים היא אוניברסאלית (Stavy, Babai, Tsamir, Tirosh, Lin, & McRobbie, 2006). חשוב לציין כי פעמים רבות תגובות תלמידים בהתאם לכללים האינטואיטיביים הן נכונות, ויתכן שזאת הסיבה לשכיחותם של הכללים. עם זאת, לעיתים תגובות אלה נוגדות את החשיבה המדעית המקובלת ומובילות לטעויות. תגובות אלה הוגדרו כאינטואיטיביות מכיוון שהן ניתנות באופן מיידי ובביטחון רב, והן נראות למשיב כברורות מאלהן ללא שום צורך בבדיקה או הוכחה. תכונות אלו תוארו כמאפיינות את החשיבה האינטואיטיבית על ידי פישביין (Fischbein, 1987).

כפי שניתן לראות, הכללים האינטואיטיביים משפיעים על תגובות תלמידים וגורמים להם לשגות בפתרון בעיות במדע ובמתמטיקה. לכן, מנקודת המבט החינוכית חשוב לברר האם ניתן להחליש את השפעת הכללים ובכך לסייע לתלמידים להתגבר עליהם? על מנת לענות על שאלה זו התמקדנו בכלל האינטואיטיבי "יותר מ-A, יותר מ-B" וחקרנו את מנגנוני החשיבה הקשורים בו. כמו כן, חקרנו את השפעתם של גורמים שונים על מידת השימוש בכלל אינטואיטיבי זה ועל היכולת להתגבר עליו, גורמים תלויי מטלה, גורמים תלויי נבדק והשפעתה של התערבות חינוכית. במחקרים אלה השתמשנו בשיטות מחקר המקובלות בפסיכולוגיה קוגניטיבית ובחקר המוח. בחרנו כמודל לבדיקת גורמים אלה במטלת השוואת היקפים מתחום הגיאומטריה, המושפעת מהכלל האינטואיטיבי "יותר מ-A, יותר מ-B".

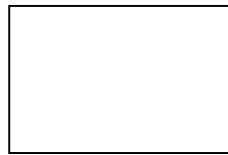
השפעת גורמים תלויי מטלה על מידת ההשפעה של הכלל "יותר מ-A, יותר מ-B"

מחקרי זמן תגובה

במחקר מקדים הוצגה בפני תלמידים מגיל הגן עד כיתה ט' המטלה הבאה:



ב



א

צורה א' היא מלבן. ממלבן זה הורד ריבוע קטן מחלקו השמאלי העליון ונוצרה צורה ב'.

האם לדעתך ההיקף של צורה ב' גדול מ/ שווה ל/ קטן מ/ ההיקף של צורה א'?

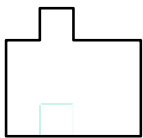
נמצא כי בכל אחת משכבות הגיל לפחות 70% מהתלמידים טענו באופן שגוי כי לצורה א' היקף גדול יותר משום שיש לה שטח גדול יותר. תגובות התלמידים תואמות את הכלל האינטואיטיבי "יותר מ-A (שטח), יותר מ-B (היקף)". אם כן, ניתן לשער כי שיעור ההצלחה יהיה גבוה כאשר תוצג מטלה התואמת את הכלל (לצורה בעלת השטח הגדול יותר יהיה גם היקף גדול יותר, ראה איור 1). השערה זו אוששה במספר רב של מחקרים בהם נמצא ששיעור ההצלחה במטלות התואמות את הכלל האינטואיטיבי הוא גבוה מאוד.

לבחינת מנגנוני החשיבה הקשורים בהתגברות על הכלל האינטואיטיבי השתמשנו במחקר זמן תגובה (reaction time). זמן תגובה הוא אחד מכלי המחקר הנפוצים ביותר בפסיכולוגיה קוגניטיבית ומוגדר כזמן הנמדד מרגע הופעת המטלה ועד למתן התגובה. זמן זה מהווה מדד למורכבות הפעילות המוחית. ככל שתהליך העיבוד מורכב יותר, כך זמן התגובה ארוך יותר.

באמצעות כלי זה ניתן לברר האם התגברות על ההפרעה הנגרמת על ידי הכלל האינטואיטיבי כרוכה בפעילות מוחית מורכבת יותר. כלומר, האם זמן התגובה למענה נכון תוך התגברות על הכלל האינטואיטיבי יהיה ארוך מזמן התגובה למענה נכון למטלות התואמות את הכלל.

לשם כך, הוצגו לנבדקים מטלות השוואת היקפים שחלקן תואם את הכלל האינטואיטיבי "יותר מ-A, יותר מ-B" וחלקן נוגד את הכלל. דוגמאות מייצגות למטלות שהוצגו לנבדקים מובאות באיור 1.

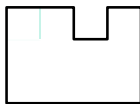
1. מטלה שבה התגובה הנכונה תואמת את הכלל האינטואיטיבי:



התאמה-

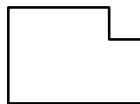
לצורה השמאלית שטח גדול יותר והיקף גדול יותר

2. מטלות שבהן התגובה הנכונה אינה תואמת את הכלל האינטואיטיבי:



א. חוסר התאמה של ניגוד-

לצורה השמאלית שטח גדול יותר והיקף קטן יותר



ב. חוסר התאמה של שוויון-

לצורה השמאלית שטח גדול יותר אך ההיקפים שווים

איור 1. דוגמאות למטלות השוואת היקפים הנמצאות בהתאמה או בחוסר התאמה לכלל

האינטואיטיבי "יותר מ-A, יותר מ-B"

ארבעים ושבעה תלמידי כיתה ח' התבקשו להשוות את ההיקפים של זוגות צורות שהוצגו על גבי צג מחשב (זילבר, 2004). לתלמידים הוצגו 48 מטלות, 16 מכל סוג (התאמה לכלל, חוסר התאמה של ניגוד וחוסר התאמה של שוויון). התלמידים השיבו על ידי לחיצה על מקשים, מקש מתאים לכל קביעה (היקף גדול יותר לצורה הימנית, היקף גדול יותר לצורה השמאלית, היקפי הצורות שווים). נתוני תגובות התלמידים מוצגים בטבלה 1.

טבלה 1. אחוז תשובות נכונות וזמן תגובה (בשניות) לתשובות נכונות, למטלות השוואת

היקפים		
סוג המטלה	אחוז תשובות נכונות	זמן תגובה בשניות
התאמה	93.2	1.6
חוסר התאמה של ניגוד	55.6	2.5
חוסר התאמה של שוויון	22.9	2.9

מהתוצאות עולה כי מידת ההצלחה גדולה יותר במטלות התואמות את הכלל לעומת מטלות שנוגדות את הכלל ($p < 0.05$). בנוסף, מתברר כי במטלות מסוג חוסר התאמה של שוויון אחוז ההצלחה הוא נמוך יותר מאשר מטלות חוסר התאמה של ניגוד ($p < 0.05$). כמו כן, זמני התגובה לתשובות נכונות במטלות התואמות את הכלל הם קצרים ביחס לתשובות נכונות במטלות הנוגדות את הכלל ($p < 0.05$) (זילבר, 2004).
 כאשר נתבקשו התלמידים להשוות את השטחים ולא את ההיקפים התברר כי אחוז ההצלחה היה גבוה ודומה בכל סוגי המטלות, 91.5% בממוצע. כמו כן, זמן התגובה הממוצע לתשובות נכונות בהשוואת שטחים היה קצר יחסית, 1.1 שניות, דומה גם הוא בכל סוגי המטלות.

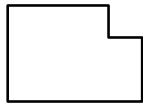
כיצד ניתן להסביר ממצאים אלה?

העובדה שזמן התגובה בהשוואת שטחים קצר יחסית לזמן התגובה בהשוואת היקפים מרמזת על כך שהשטח הוא אכן התכונה הבולטת אשר תהליך העיבוד שלה הוא, כנראה, מהיר ואוטומטי.

כאשר התלמיד מתבקש להשוות היקפים, עקב הבולטות של תכונת השטח, הוא אינו יכול להימנע מעיבוד מידע זה במקביל לעיבוד המידע הרלוונטי להשוואת ההיקפים. אם תוצאת השוואת השטחים מתאימה לתוצאת השוואת ההיקפים, כפי שמתקיים במטלות התואמות את הכלל האינטואיטיבי "יותר מ- A (שטח), יותר מ- B (היקף)", לא נוצרת סתירה והפותר משיב נכון ומהר. אם, לעומת זאת, תוצאת השוואת השטח אינה מתאימה לתוצאת השוואת ההיקפים, כפי שמתקיים במטלות שאינן תואמות את הכלל האינטואיטיבי, נוצרת סתירה. פתרון נכון תוך התגברות על הסתירה כרוך בהשקעת מאמץ מנטאלי המתבטא בהארכת זמן התגובה. במקרים בהם הפותר לא התגבר על הפרעה של השטח, הוא ישיב על מטלות אלה באופן שגוי בהתאם לכלל.

כאשר מגבירים את הבולטות של תכונת השטח, למשל על-ידי הצגת צורות מלאות במקום צורות ממוסגרות (איור 2) או על ידי הגדלת ההפרש בין השטחים של שתי הצורות (איור 3) גדלה ההפרעה של תכונת השטח במצב שאינו תואם את הכלל.

אחוז הצלחה של מבוגרים (18 נבדקים שגילם הממוצע היה 27) לגבי הצורות המלאות היה גבוה (67%) באופן מובהק ($p < 0.02$) מאשר לגבי הצורות הממוסגרות (62%) ללא הבדל ניכר בזמן התגובה הממוצע (Stavy, & Babai, 2008).



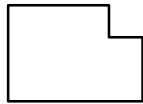
צורות ממוסגרות



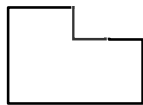
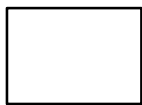
צורות מלאות

איור 2. דוגמא לאותה מטלה המוצגת באמצעות צורות מלאות או ממוסגרות

אחוז ההצלחה של אותה קבוצת נבדקים היה גבוה באופן מובהק ($p < 0.001$) כאשר הפרש בין שטחי הצורות היה קטן, מצב בו הפרעה של תכונת השטח היא נמוכה, לעומת מצב של הפרעה גדולה בו הפרש בין שטחי הצורות היה גדול (81% לעומת 54% בהתאמה). במקביל, כאשר הפרש בין שטחי הצורות היה קטן, זמן התגובה הממוצע היה 1.2 שניות לעומת 1.4 שניות כאשר הפרש היה גדול יותר (הפרש זה נמצא ברמת מובהקות של $p < 0.08$).



הפרש קטן בין שטחי הצורות

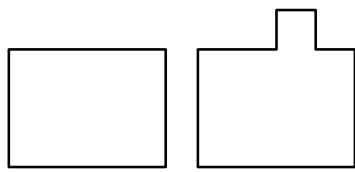


הפרש גדול בין שטחי הצורות

איור 3. דוגמאות למטלות עם הפרש קטן והפרש גדול בין שטחי הצורות

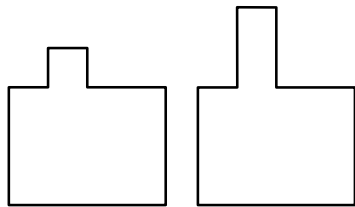
ראינו, אם כן שמידת ההתאמה של המטלה לכלל האינטואיטיבי משפיעה, באופן ניכר על פתרונה. כמו כן, הסתבר כי על הפתרון משפיעה מידת הבולטות של תכונת השטח שאינה רלוונטית כלל לפתרון. האם גורמים נוספים הקשורים במטלה ישפיעו על מידת ההצלחה בפתרונה ועל זמן התגובה? למשל, האם תהיה השפעה למידת המורכבות של הצורות המוצגות בה?

על מנת לבחון שאלה זו במסגרת השוואת ההיקפים, הוצגו למשתתפים מטלות פשוטות ומורכבות. מטלות פשוטות כללו מלבן אחד ומצולע שנגזר ממנו על ידי הוספה או הורדה של מלבן או ריבוע קטן. מטלות מורכבות כללו שני מצולעים הנגזרים האחד מהשני על ידי הוספה או הורדה של מלבן או ריבוע קטן. במחקר זה התמקדנו בשני סוגי מטלות: מטלות התואמות את הכלל ומטלות של חוסר התאמה של שוויון (Stavy, & Babai, 2008). דוגמאות של מטלות מובאות באיור 4.

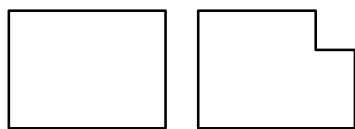


פשוטות

בהתאמה לכלל האינטואיטיבי

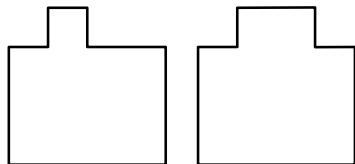


מורכבות



פשוטות

בחוסר התאמה לכלל האינטואיטיבי



מורכבות

איור 4. דוגמאות למטלות פשוטות ומורכבות הנמצאות בהתאמה או בחוסר התאמה של

שוויון לכלל האינטואיטיבי "יותר מ-A, יותר מ-B"

שמונה עשר נבדקים מבוגרים שגילם הממוצע היה 27 התבקשו להשוות את ההיקפים של זוגות צורות שהוצגו על גבי צג מחשב. לנבדקים הוצגו 64 מטלות, 16 מכל סוג ורמת מורכבות (התאמה לכלל פשוטות, התאמה לכלל מורכבות, חוסר התאמה של שוויון פשוטות וחוסר התאמה של שוויון מורכבות). הנבדקים השיבו על ידי לחיצה על מקשים, מקש מתאים לכל קביעה (היקף גדול יותר לצורה הימנית, היקף גדול יותר לצורה השמאלית, היקפי הצורות שווים). נתוני תגובות הנבדקים מוצגים בטבלה 2.

טבלה 2. אחוז תשובות נכונות וזמן תגובה (בשניות) לתשובות נכונות, למטלות השוואת

היקפים פשוטות ומורכבות

סוג המטלה	מורכבות המטלות	אחוז תשובות נכונות	זמן תגובה בשניות
התאמה	פשוטות	88.2	1.2
	מורכבות	87.9	1.1
חוסר התאמה של שוויון	פשוטות	81.3	1.2
	מורכבות	39.2	1.6

כפי שעולה מטבלה 2, למורכבות המטלות השפעה גדולה על מידת ההצלחה ועל זמן התגובה בעיקר עבור מטלות שאינן בהתאמה לכלל. נמצא כי במטלות מורכבות מסוג חוסר התאמה של שוויון השוואת ההיקפים דרשה מאמץ רב יותר שבא לידי ביטוי בהארכת זמן התגובה ($p < 0.05$) וגרמה להפרעה גדולה יותר שבאה לידי ביטוי בירידה משמעותית באחוז התשובות הנכונות ($p < 0.05$) מאשר במטלות פשוטות.

ראה כי ההבדל המרכזי בין מטלות פשוטות ומורכבות נעוץ בכמות המידע שיש לעבד בזמן השוואת ההיקפים או במילים אחרות, בעומס הקוגניטיבי. מטלה מורכבת כוללת שתי צורות שאינן שגרתיות ומכילה כמות רבה של מידע הקשור לפתרון. לעומתה, מטלה פשוטה כוללת שתי צורות, שגרתית (מלבן) ובלתי שגרתית, ומכילה כמות פחותה של מידע הקשור לפתרון. במהלך הפתרון על הפותר להחזיק את כל המידע הרלוונטי לפתרון בזיכרון העבודה שלו. ידוע כי קיבולת זיכרון העבודה היא מוגבלת ויכולה להיות שונה מפרט לפרט (התייחסות להיבט זה תבוא מאוחר יותר).

בהקשר החינוכי ממצאים אלה מצביעים על אפשרות לקבלת החלטות מושכלת בבחירת דוגמאות ומטלות בתהליך ההוראה. אפשר למשל, להתחשב ברמת הקושי של מטלה מסוימת על פי הגורמים תלויי המטלה שהוזכרו לעיל. לדוגמה, להשתמש במטלה שאינה תואמת את החשיבה האינטואיטיבית ולא במטלה התואמת אותה, לצורך הערכת יכולת התלמידים לפתור סוג מסוים של מטלות. זאת משום שניתן לענות נכון על מטלה התואמת את החשיבה האינטואיטיבית תוך התבססות על גורם בולט ובלתי רלוונטי. בנוסף, חשוב לציין ששתי מטלות הנראות מבחינה מדעית או מתמטית כשוות ערך זו לזו יכולות להיות שונות מאוד מבחינה פסיכולוגית. למשל, מטלת השוואת היקפים של צורות מורכבות (במצב של חוסר התאמה עם הכלל האינטואיטיבי) כרוכה במאמץ מנטאלי רב יותר מאשר מטלה מקבילה בה מושוות צורות פשוטות.

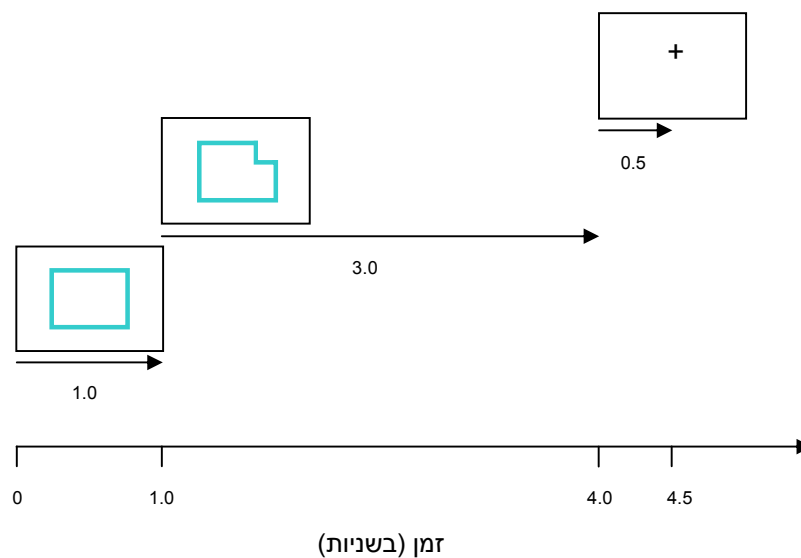
לאור ההשפעה הגדולה של מידת ההתאמה לכלל האינטואיטיבי על ההצלחה בפתרונה ועל זמן התגובה של מטלת השוואת ההיקפים, מתעוררת השאלה האם וכיצד נבדלת החשיבה הקשורה במענה נכון במצב התואם את הכלל מזו הקשורה במענה נכון במצב שאינו תואם לו? על שאלה זו ניסינו לענות באמצעות מחקר הדמייה מוחית.

מחקר הדמייה מוחית

מטרתנו במחקר זה הייתה לברר האם החשיבה הקשורה במענה נכון במצב התואם את הכלל תפעיל אזורי מוח אחרים מאשר החשיבה הקשורה במענה נכון במצב שאינו תואם לו. השתמשנו בהדמייה בתהודה מגנטית תפקודית (*fMRI; functional Magnetic Resonance Imaging*) המאפשרת לקבוע אילו אזורי מוח מופעלים בשעה שהנבדק מבצע סוגים שונים של פעילות מחשבתית. תאי העצב (הנוירונים) זקוקים לאנרגיה לפעולתם. חומרי הדלק שלהם הם גלוקוז וחמצן הנישאים עם זרם הדם. כאשר אזור מסוים במוח מופעל, חומרים אלה זורמים אליו

ורכוזם בסביבה המופעלת גדל. הדמיית ה- *fMRI* מראה את האזורים בהם ריכוז החמצן (או ליתר דיוק ריכוז ההמוגלובין נושא החמצן) גדל, כלומר, את האזורים המופעלים.

השתמשנו שוב במטלת השוואת ההיקפים שתוארה לעיל. הצגנו בפני 14 נבדקים (גיל ממוצע של 27) 48 מטלות התואמות את הכלל האינטואיטיבי "יותר מ-A, יותר מ-B" ו-80 מטלות של חוסר התאמה של שוויון (Stavy, Goel, Critchley, & Dolan, 2006). הצורות בכל זוג הוצגו אחת אחר השנייה. הצורה הראשונה הופיעה על המסך למשך שניה אחת והצורה השנייה הופיעה למשך 3.5 שניות במהלכן היה על הנבדק להחליט אם ההיקף של הצורה השנייה הוא גדול מ- /שווה ל- /קטן מ ההיקף של הצורה הראשונה וללחוץ על כפתור מתאים בתיבת תגובה מיוחדת (תיאור מערך המחקר מופיע באיור 5). נתוני שיעור ההצלחה, זמן התגובה והפעילות המוחית של כל נבדק נאספו.

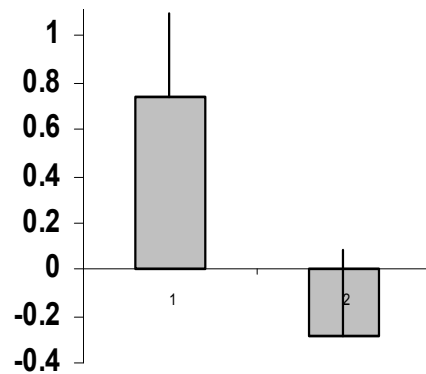
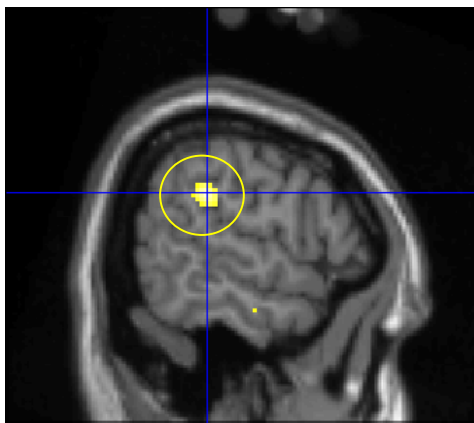


איור 5. מערך מחקר ההדמייה המוחית (הדוגמה המוצגת היא של מטלה שאינה תואמת את

הכלל)

התוצאות לגבי מידת ההצלחה וזמן התגובה היו דומות לאילו שהתקבלו במחקרים קודמים. אחוז ההצלחה במצב התואם את הכלל היה גדול באופן מובהק מזה של המצב שאינו תואם אותו (92% לעומת 65% בהתאמה, $p < 0.001$) זמן התגובה למענה נכון היה קצר באופן מובהק במצב התואם את הכלל לעומת זה שאינו תואם אותו (1.2 שניות לעומת 1.4 שניות בהתאמה, $p < 0.01$).

על מנת לקבוע אילו אזורי מוח מופעלים בהקשר לחשיבה התואמת את הכלל האינטואיטיבי השוויוני את פעילות המוח בעת מתן תשובות נכונות למטלות התואמות את הכלל לעומת פעילותו בעת מתן תשובות נכונות למטלות שאינן תואמות לו (תהליך זה מבצע מעין "החסרה" של הפעילות במצב שאינו תואם את הכלל מהפעילות במצב התואם את הכלל). נמצא שאזורים הנמצאים באונות הקדקודיות (פריאטליות- parietal) בשני צידי המוח הראו פעילות מוגברת הקשורה בחשיבה התואמת את הכלל האינטואיטיבי (ראה איור 6).



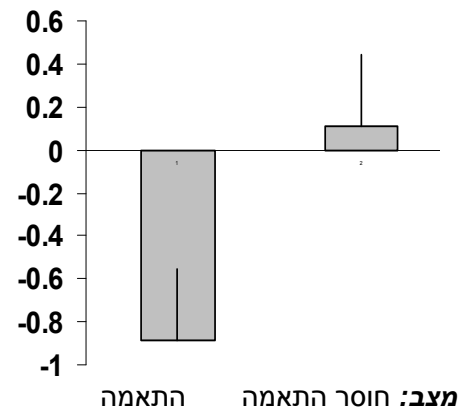
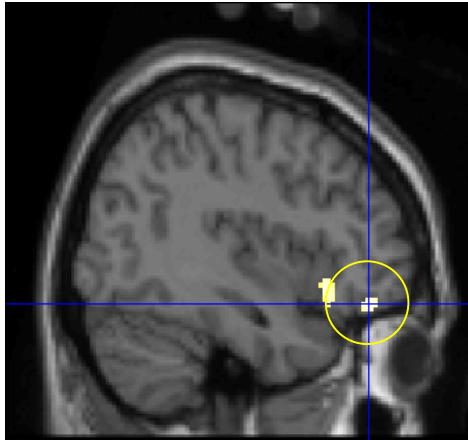
איור 6. פעילות מוחית באונה הקדקודית (הכתם הבהיר המוקף בעיגול צהוב) המשקפת את ההפרש בין פעילות מוחית במצב של התאמה לבין פעילות מוחית במצב של חוסר התאמה עם הכלל האינטואיטיבי (באיור מוצג הצד הימני של המוח בחתך סגיטלי). גרף העמודות מתאר את ערכה של הפעילות המוחית במצב של התאמה ובמצב של חוסר התאמה עם הכלל באזור הפעילות המוגברת (BA 40 ; -34, 28 ; 60).

האזורים הקדקודיים האלה ידועים במעורבותם בעיבוד של מידע תחושתי (פרספטואלי) ומרחבי ובעיבוד הקשור בהשוואת כמויות (מספרים וכמויות רציפות אחרות כמו 'שטח' הקיים במטלה שלנו) (Fias, Lammertyn, Reynvoet, Dupont, & Orban, 2003; Pinel, Piazza, Le) (Bihan, & Dehaene, 2004). פעילות זאת משקפת כנראה את ההשוואה האוטומטית של מימד השטח, הבולט במטלה זו אבל אינו רלוונטי. במצב התואם את הכלל, עיבוד אוטומטי ומהיר זה אינו מפריע לחשיבה הקשורה בהשוואת ההיקפים.

אזורים קדקודיים דומים הופעלו כאשר השווינו את פעילות המוח בעת מתן תשובות אינטואיטיביות שגויות (בהתאם לכלל) למטלות שאינן תואמות את הכלל האינטואיטיבי לעומת פעילותו בעת מתן תשובות נכונות למטלות מסוג זה.

על מנת לקבוע אילו אזורי מוח מופעלים בהקשר לחשיבה במצב שאינו תואם את הכלל ובהתגברות על הקונפליקט, השווינו את פעילות המוח בעת מתן תשובות נכונות למטלות של התאמה עם הכלל לעומת פעילותו בעת מתן תשובות נכונות למטלות במצב של אי התאמה (מעין "החסרה" של הפעילות במצב התואם את הכלל מהפעילות במצב שאינו תואם את הכלל).

אזורים באונות הקדם-מצחיות האורביטו-פרונטאליות (orbito-frontal) משני צידי המוח הראו פעילות מוגברת הקשורה בחשיבה במצב שאינו תואם את הכלל ובהתגברות על הקונפליקט הנוצר בין תוצאות עיבוד מימד ההיקף ותוצאות העיבוד האוטומטי של מימד השטח (ראה אזור 7).



איור 7. פעילות באונה הקדם מצחית האורביטו-פרונטלית מוחית (הכתם הבהיר המוקף בעיגול צהוב) המשקפת את ההפרש בין פעילות מוחית במצב של חוסר התאמה לבין פעילות מוחית במצב של התאמה עם הכלל האינטואיטיבי (באיור מוצג הצד הימני של המוח בחתך סגיטלי). גרף העמודות מתאר את ערכה של הפעילות המוחית במצב של חוסר התאמה ובמצב של התאמה עם הכלל באזור הפעילות המוגברת (BA 11/47, -16, 42, 40).

האזורים הקדם-מצחיים הללו ידועים במעורבותם בבקרה ביצועית מעכבת (executive inhibitory control) על חלקי מוח אחוריים ופנימיים, בעת עיבוד של פונקציות קוגניטיביות שונות (למשל, Kameyama, & Miyashita, 1999). במקרה שלנו תפקיד קליפת המוח האורביטו-פרונטלית הוא כנראה לעכב את העיבוד האוטומטי של המימד המפריע (שטח) באונות הקדקודיות וכך למנוע את ההפרעה שלו ולאפשר פתרון נכון המבוסס על עיבוד נתוני ההיקף.

אזורים קדם מצחיים דומים הופעלו כאשר השווינו את פעילות המוח בעת מתן תשובות נכונות למטלות שאינן תואמות את הכלל האינטואיטיבי לעומת פעילותו בעת מתן תשובות אינטואיטיביות שגויות (בהתאם לכלל) למטלות מסוג זה.

לסיכום, מחקר ההדמייה המוחית הראה שאזורי מוח שונים מופעלים כאשר אדם פותר נכון מטלה התואמת את הכלל לעומת מטלה הנוגדת אותו, למרות שהאדם אינו מודע כלל להבדל בין המטלות. כאשר אדם עונה נכון למטלות שאינן תואמות את הכלל מופעלים אזורי מוח הקשורים בבקרה ביצועית מעכבת.

הממצאים הללו מצביעים על החשיבות הרבה של מנגנוני הבקרה (executive functions) בהתגברות על הקונפליקט בין החשיבה הפורמלית/לוגית לבין החשיבה האינטואיטיבית וכך בהתגברות על ההפרעה הנגרמת בשל הכלל האינטואיטיבי "יותר מ-A, יותר מ-B" בעת פתרון בעיות במדע ובמתמטיקה הקשורות בו. בנוסף, הממצאים מצביעים על אפשרות לשפר את יכולתם של תלמידים בפתרון בעיות כאלה, על ידי חיזוק מנגנוני בקרה אלה, למשל, באמצעות התערבות שמטרתה להסב את תשומת ליבם של התלמידים לגורם הרלוונטי בבעיה ולהתעלם מהגורם המפריע בה.

השפעת התערבות חינוכית על מידת ההשפעה של הכלל "יותר מ-A, יותר מ-B"

האם התערבות חינוכית שמטרתה להסב את תשומת ליבם של תלמידים לגורם הרלוונטי בבעיה ולהתעלם מהגורם המפריע בה תביא לשיפור בהישגיהם במטלת השוואת ההיקפים במצב של חוסר התאמה עם הכלל "יותר מ-A, יותר מ-B"? במטרה להבין כיצד משפיעה ההתערבות על מנגנוני החשיבה בדקנו גם כיצד התערבות כזו תשפיע על מהירות התגובה.

תלמידים משתי כיתות ח' נבחנו באופן יחידני באמצעות מבחן זמן תגובה ממוחשב של השוואת שטחים והשוואת היקפים של זוגות של צורות גיאומטריות (זילבר, 2004; לבידון, 2003). מחצית מהתלמידים ענו קודם על בעיית השוואת השטחים ולאחר שבוע על בעיית השוואת ההיקפים ומחציתם ענו על הבעיות בסדר הפוך (קודם על בעיית השוואת ההיקפים ולאחר מכן על השוואת השטחים).

על מנת לענות על שאלות המחקר בחרנו להתמקד ב- 33 תלמידים שמידת הצלחתם בפתרון בעיית השוואת ההיקפים במצב של חוסר התאמה של שוויון הייתה נמוכה מאוד, פחות מ- 33% הצלחה, שהיא מידת הצלחה הצפויה באופן אקראי כאשר יש לבחור אחת משלוש אפשרויות: גדול/שווה/קטן. תלמידים אלה הפגינו אי יכולת להתגבר על הפרעה של הכלל האינטואיטיבי בבעיה זו. אחד עשר מהם שימשו כקבוצת ביקורת ו- 22 כקבוצת ניסוי.

לאחר כחודש מהמבחן המקדים נערכה בכיתת הניסוי התערבות במסגרת כיתתית, כמתואר בהמשך. לאחריה נבדק שוב באופן יחידני כל אחד מתלמידי כיתה זו במבחן מאוחר הזהה למבחן המקדים. תלמידי קבוצת הביקורת נבדקו גם הם באופן יחידני חודש לאחר המבחן המקדים במבחן מאוחר הזהה למבחן המקדים ללא כל התערבות בין שני המבחנים.

התערבות להסבת תשומת לב התלמידים לגורם הרלוונטי בבעיה

מטרת ההתערבות הייתה להסב את תשומת לב התלמידים למשתנה הרלוונטי בבעיה. עשינו זאת על ידי כך שהצגנו לתלמידים דוגמה של מטלה שידוע שהיא מעוררת תגובה בלתי נכונה המבוססת על המימד הבלתי רלוונטי לבעיה (שטח, במקרה שלנו) ומפעילה את הכלל האינטואיטיבי ואז כווננו את תשומת לבם למימד הרלוונטי (היקף, במקרה שלנו). התערבות כזו מעלה את מודעותם של התלמידים לאי התאמתה של דרך חשיבתם הראשונית ולחיפוש דרך

פתרון אחרת שתוביל אותם למענה נכון. ההתערבות בקבוצת הניסוי כללה שלושה שלבים והיא נערכה במסגרת שיעור אחד.



מצב: התאמה חוסר התאמה של ניגוד חוסר התאמה של שוויון

איור 8. דוגמאות של בעיות שניתנו בשלב הראשון של ההתערבות

שלב 1: עבודה יחידנית - השוואת היקפים

כל תלמיד קיבל שלוש מעטפות אטומות, בכל אחת מהן שתי צורות מקרטון (ראו איור 8). מעטפה א הכילה צורות המייצגות מצב של התאמה. עם הכלל האינטואיטיבי "יותר מ-A, יותר מ-B", מעטפות ב וג הכילו צורות המייצגות את המצבים של חוסר התאמה (של ניגוד ושל שוויון, בהתאמה). התלמידים התבקשו לפתוח את מעטפה א, להשוות את ההיקפים של שתי הצורות שהיו בה, לרשום את החלטתם במחברת ולהסבירה. אחר כך התבקשו לעשות כך לגבי שתי הצורות במעטפה ב ולבסוף לגבי שתי הצורות במעטפה ג. צורות הקרטון בהן השתמשו בהתערבות היו שונות מאילו שהופיעו במבחן השוואת השטחים וההיקפים.

שלב 2: הסבת תשומת לב התלמידים לגורם הרלוונטי בבעיה

במהלך דיון כיתתי, תלמידים התבקשו להתנדב להציג את פתרונותיהם על הלוח ולהסביר אותם לכיתה. תלמיד אחד הוזמן. הוא הסביר, נכון, שהשטח וגם ההיקף של צורה 2 היו גדולים מאלו של צורה 1. כל התלמידים הסכימו איתו. בהמשך, בהקשר למצב של חוסר התאמה של ניגוד (מעטפה ב), התלמיד שגה וטען שהשטח וההיקף של צורה 3 גדולים מאלו של צורה 4. תלמידים

רבים הסכימו איתו. אבל תלמידים אחדים טענו, נכון, שתשובה זו אינה נכונה, הם אמרו שלמרות שהשטח של צורה 3 גדול מזה של צורה 4 ההיקף שלה יותר קטן. קביעה זו עוררה דיון ער בכיתה. תלמידים השתכנעו לאחר שאחד מהם הניח את צורה 4 מעל צורה 3 והראה בעזרת החפיפה הקונקרטיה הזאת שלמרות שהשטח שלה יותר קטן ההיקף של צורה 4 יותר גדול. כתוצאה, רוב התלמידים שינו גם את תגובתם הראשונית, השגויה, לגבי המצב של חוסר התאמה של שוויון (מעטפה ג), וקבעו שלמרות שהשטח של צורה 5 גדול יותר מזה של צורה 6 ההיקפים שלהם שווים. עדיין נותרו מספר תלמידים שטענו שההיקף של צורה 5 גדול יותר מזה של צורה 6. העימות נפתר שוב, כאשר תלמידים שענו נכון על בעיה זו הניחו את הצורות אחת על גבי השניה והראו באופן קונקרטי את השוויון בהיקף.

שלב 3: עבודה יחידנית - תרגילי חזרה

לתלמידים ניתנו על גבי דף עבודה, 10 בעיות השוואת היקפים נוספות (במצבים של התאמה, חוסר התאמה של ניגוד וחוסר התאמה של שוויון). התלמידים עבדו באופן יחידני. התלמידים ענו נכון על בעיות אלה.

נתייחס תחילה להשפעת ההתערבות על מטלת השוואת השטח. תוצאות ההצלחה וזמני התגובה של מטלת השוואת השטח מוצגות עבור קבוצת הניסוי והביקורת בטבלה 3.

טבלה 3. אחוזי ההצלחה וזמני התגובה (בשניות) במטלת השוואת השטח במבחן המקדים

ובמבחן המאוחר

זמן תגובה בשניות		אחוז תשובות נכונות		סוג המטלה	קבוצה
מבחן מאוחר	מבחן מקדים	מבחן מאוחר	מבחן מקדים		
1.0	1.4	89	89	התאמה	ביקורת חוסר התאמה של שוויון
0.9	1.3	94	88	חוסר התאמה של שוויון	
1.0	1.3	93	89	התאמה	ניסוי חוסר התאמה של שוויון
1.0	1.3	95	98	חוסר התאמה של שוויון	

כצפוי, מרבית התלמידים ענו נכון על מטלה זו בשתי הקבוצות בשני סוגי המטלה (התאמה וחוסר התאמה לכלל האינטואיטיבי) במבחן המקדים ובמבחן המאוחר. בנוסף, התברר שזמן התגובה התקצר באופן משמעותי מהמבחן המקדים למבחן המאוחר בשתי קבוצות הניסוי ובשני סוגי המטלה. מסתבר, שחזרה על אותה מטלה מגבירה את יעילות הפותר בפתירתה וגורמת לקיצור זמן התגובה. תופעה דומה נמצאה בעבר על ידי חוקרים רבים לגבי מטלות אחרות, למשל, בעבודתו החלוצית של Stroop (1935).

תוצאות ההצלחה וזמני התגובה של מטלת השוואת ההיקף מוצגות עבור קבוצת הניסוי והביקורת בטבלה 4.

טבלה 4. אחוזי ההצלחה וזמני התגובה במטלת השוואת ההיקף במבחן המקדים ובמבחן

המאחר

זמן תגובה בשניות		אחוז תשובות נכונות		סוג המטלה	קבוצה
מבחן מאוחר	מבחן מקדים	מבחן מאוחר	מבחן מקדים		
1.0	1.3	94	88	התאמה	ביקורת
1.0	1.3	21	12	חוסר התאמה של שוויון	
1.4	1.2	93	94	התאמה	ניסוי
1.4	1.2	41	3	חוסר התאמה של שוויון	

כצפוי, מרבית התלמידים בשתי הקבוצות ענו נכון על מטלה זו במצב התואם את הכלל האינטואיטיבי הן במבחן המקדים והן במבחן המאוחר. מהתוצאות עולה כי ההתערבות גרמה לשיפור ניכר בהישגי התלמידים במטלת השוואת ההיקפים במצב של חוסר התאמה, מ 3% ל-41% אחוזי הצלחה ($p < 0.001$), שעה שבקבוצת הביקורת לא חל שיפור משמעותי באחוז ההצלחה. בנוסף, מידת ההצלחה של קבוצת הניסוי במבחן המאוחר היתה גבוהה באופן מובהק מזו של קבוצת הביקורת (41% לעומת 21% בהתאמה; $p < 0.01$) ואילו, במבחן המקדים מידת ההצלחה של קבוצת הניסוי היתה נמוכה באופן מובהק מזו של קבוצת הביקורת (3% לעומת 12% בהתאמה, $p < 0.04$). עם זאת, הנתונים מורים כי גם לאחר ההתערבות אחוז ההצלחה לא היה כה גבוה. יתכן, שהתערבות הקצרה לא הספיקה לגרום לשינוי ארוך טווח, למרות שהתלמידים ענו נכון על כל תרגילי החזרה בשלב השלישי של ההתערבות.

זמן התגובה בקבוצת הניסוי התארך באופן משמעותי מ 1.2 ל 1.4 שניות, מהמבחן המקדים למאוחר במטלת השוואת ההיקפים ($p < 0.02$). עליה זו נצפתה הן במצב של התאמה ($p < 0.05$) והן במצב של חוסר התאמה ($p < 0.02$) לכלל האינטואיטיבי.

ממצאי זמן התגובה מאפשרים להסביר את המנגנונים הקשורים בהשפעת ההתערבות. ראינו שחזרה על אותה מטלה גרמה לקיצור זמן התגובה במטלת השוואת השטח בשתי הקבוצות. דבר המעיד כי חזרה על אותה מטלה מגבירה את יעילות הפותר בפתירתה. כמו-כן, בקבוצת הביקורת שלא עברה כל התערבות ורק חזרה על המטלות, חלה ירידה בזמן התגובה גם במטלת השוואת ההיקפים במבחן המאוחר לעומת המבחן המקדים (Babai, Zilber, Stavy, & Tirosh, 2008).

לעומת זאת, זמן התגובה למטלת השוואת ההיקפים בקבוצת הניסוי עלה באופן משמעותי מהמבחן המקדים למבחן המאוחר. כלומר, התערבות שמטרתה להסב את תשומת לב התלמידים ולהגביר את מודעותם למשתנה הרלוונטי בבעיה (היקף) הביאה לעליה בזמן התגובה למטלה הקשורה בו (השוואת היקפים). במצב של חוסר התאמה, מודעות זו מפעילה כנראה מנגנוני בקרה הדורשים זמן ומאמץ מנטלי, מנגנונים אלה תורמים לעיכוב המשתנה הבלתי רלוונטי (שטח). מעניין לציין, שלמרות שבמטלת השוואת ההיקפים במצב התואם את הכלל משתנה השטח אינו מפריע לפתרון, חלה עלייה משמעותית בזמן התגובה מהמבחן המקדים למאוחר גם במצב זה. כנראה שהפעלת מנגנוני הבקרה המעכבים היא כללית למטלת השוואת ההיקפים ומתייחסת לשני המצבים שלה. הפעלת מנגנוני בקרה אלה הביאה לשיפור בהשגי התלמידים במצב שאינו תואם את הכלל, אולם, במקביל בעיות השוואת היקפים התואמות את הכלל, שנפתרו נכון ומהר לפני ההתערבות, נפתרות עדיין נכון אחריה אך ביתר איטיות (Babai, Zilber, Stavy, & Tirosh, 2008).

בניסוי ההדמייה שתואר קודם לכן הראינו שתשובה שגויה למטלת השוואת ההיקפים במצב שאינו תואם את הכלל קשורה בהפעלה של אזורי מוח אחוריים שעה שתשובה נכונה מפעילה אזורי מוח קדמיים הידועים בפעילות בקרה ביצועית מעכבת. ייתכן, שההתערבות בה השתמשנו שינתה את דגם הפעלת המוח, מהפעלה של אזורים אחוריים להפעלה של אזורים קדמיים. בדומה, Houde et al. (2000), הראו שאימון מעכב הקשור בחשיבה "על תנאי" (אם...אז...) גרם לשינוי בדגם הפעלת המוח מהפעלה של אזורים אחוריים להפעלה של אזורים קדמיים. Houde ועמיתיו הסיקו מכך, ששינוי כזה הוא חיוני על מנת לאפשר לאדם לחשוב באופן לוגי. בנוסף לכך, Schoenfeld (1985), חוקר בכיר בהוראת המתמטיקה, טוען שהתנהגות מתמטית נקבעת על ידי ארבעה גורמים, אחד מהם הוא בקרה, כלומר היכולת לנהל ולהשתמש במשאבי הידע והאינטואיציות של האדם. הסתכלות רחבה יותר בוטאה על ידי הפסיכולוגים החינוכיים Dempster & Corkil (1999), שטענו שלפעילויות המעודדות תלמידים לשים לב ולהתמקד במידע רלוונטי יש פוטנציאל גדול לעזור להם להתגבר על הפרעות. ממצאי מחקר ההתערבות שלנו לגבי ההפרעה אינטואיטיבית של גורם בלתי רלוונטי מהסוג "יותר מ-A, יותר מ-B" בחשיבה בגיאומטריה תומכים ברעיון זה. מחקרים נוספים לגבי מטלות אחרות במדע ובמתמטיקה עשויים לברר את מידת הכלליות של התופעה שנמצאה כאן. בנוסף, מעניין יהיה לחקור באופן דומה סוגים אחרים של התערבויות ולהעריך את השפעותיהן ארוכות הטווח.

תוצאותינו חוזרות ומעידות על החשיבות הרבה של מנגנוני בקרה בתהליך ההתגברות על הפרעות אינטואיטיביות. הן מצביעות על האפשרות לשפר את יכולת פתרון הבעיות של תלמידים על-ידי התערבויות המכוונות לחזק את מנגנוני הבקרה הביצועית שלהם בנוסף על מתן ידע מדעי רלוונטי.

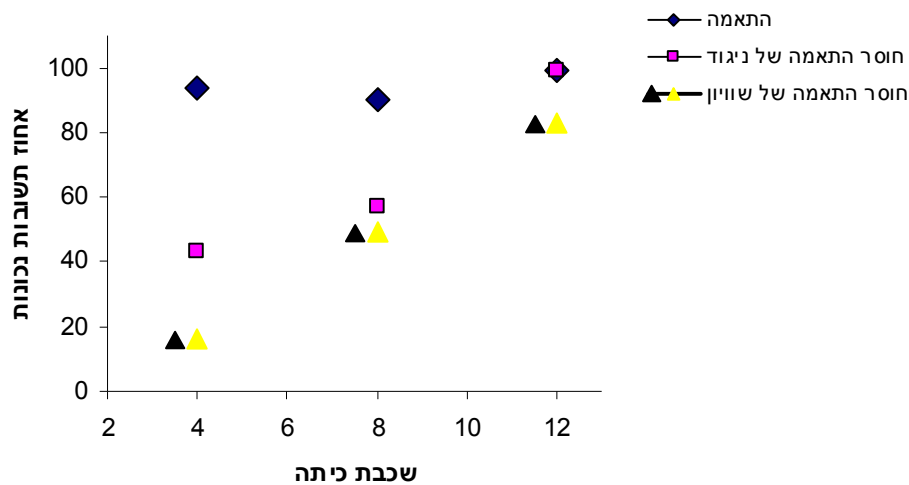
ידוע, שהפונקציות הביצועיות ומנגנוני הבקרה מתפתחים עם הגיל. התפתחות מואצת של מנגנונים אלה מתרחשת בתקופת הילדות והתפתחות נוספת, אם כי איטית יותר, בתקופת גיל

הבגרות (ראה לדוגמה, Anderson, Anderson, Northam, Jacobs, & Catroppa, 2001; Blakemore, & Choudhury, 2006; Zelazo, Carter, Reznick, & Frye, 1997). לפיכך, האם היכולת להתמודד עם ההפרעה האינטואיטיבית בה אנו עוסקים, הקשורה בהפעלת מנגנוני בקרה ביצועית, תשתפר עם העלייה בגילו של התלמיד? כמו כן, האם גורמים אחרים תלויי-נבדק ישפיעו על היכולת להתמודד עם ההפרעה של הכלל האינטואיטיבי "יותר מ-A, יותר מ-B"?

השפעת גורמים תלויי-נבדק על מידת ההשפעה של הכלל "יותר מ-A, יותר מ-B"

גיל הנבדק

האם השפעת הכלל האינטואיטיבי הולכת ונחלשת עם העליה בגיל? על מנת לענות על שאלה זו השוינו את אחוזי ההצלחה של תלמידי כיתה ד (29 תלמידים) לתלמידי כיתה ח (71 תלמידים) ולתלמידי יא-יב (22 תלמידים) במטלת השוואת ההיקפים של צורות פשוטות, במצב של התאמה, חוסר התאמה של ניגוד וחוסר התאמה של שוויון עם הכלל האינטואיטיבי "יותר מ-A, יותר מ-B" (Babai, Levyadun, Stavy, & Tirosh, 2006; Babai, Zilber, Stavy, & Tirosh, 2008). הממצאים מוצגים באיור 9.



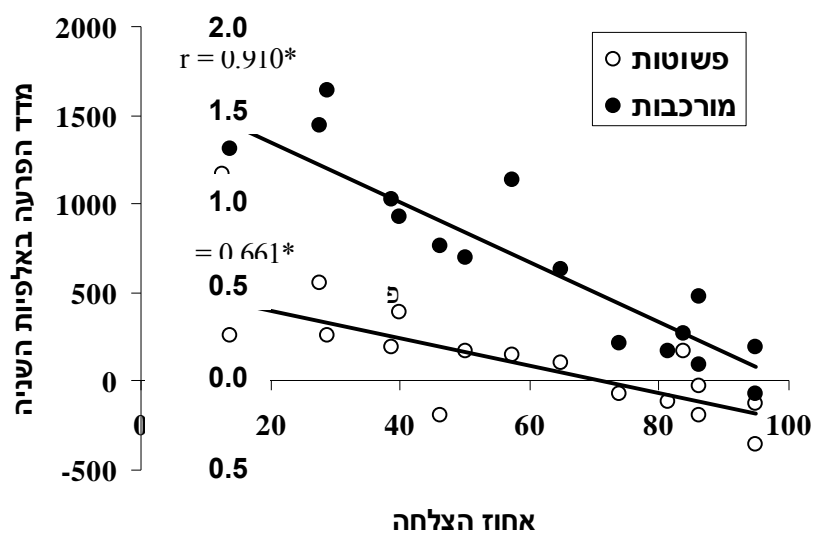
איור 9. אחוז תשובות נכונות למטלות השוואת היקפים פשוטות במצבים השונים (התאמה, חוסר התאמה של ניגוד וחוסר התאמה של שוויון) בשכבות הכיתה השונות (ד=4; ח=8; י=12) (ב)

מאיור 9 ניתן לראות שמרבית התלמידים בכל שכבות הכיתה שנבדקו ענו נכון על מטלת השוואת ההיקפים במצב התואם את הכלל, ללא הבדל ניכר בין שכבות הגיל השונות. במטלות שאינן תואמות את הכלל, אחוזי ההצלחה נמוכים מאוד בכיתה ד והם עולים בהדרגה עד כיתה י"ב. כאשר אחוזי ההצלחה במטלות של חסר התאמה של שוויון נמוכים מאלו של מטלות חוסר התאמה של ניגוד.

חוקרים מתחום הפסיכולוגיה החינוכית מסבירים את התפתחות החשיבה אצל ילדים כפועל יוצא של התפתחות מנגנוני הבקרה במוח (Dempster, & Corkil, 1999). בנוסף להתפתחות מנגנוני הבקרה עם הגיל (ראה מעלה) הסתבר, לאחרונה, כי עם העלייה בגיל גם קיבולת זיכרון העבודה החזותי משתפרת (למשל, Hale, Bronik, & Fry, 1997; Klingberg, Forssberg, & Westerberg, 2002).

מדד הפרעה

במחקרים הרבים שערכנו עם מטלת השוואת ההיקפים במצבים שאינם תואמים את הכלל האינטואיטיבי "יותר מ-A, יותר מ-B" הבחנו בשונות רבה במידת ההצלחה ובזמן התגובה של נבדקים מבוגרים במצב של חוסר התאמה של שוויון. על מנת לאפיין התנהגות תלוית נבדק זו חושב עבור כל אחד מהנבדקים (18 נבדקים מבוגרים, גיל ממוצע 27) מדד מיוחד- מדד הפרעה - המבטא את מידת ההפרעה האינטואיטיבית. מדד זה מתאר כמה זמן הקדיש הנבדק למענה נכון למטלות במצב של חוסר התאמה של שוויון בהשוואה לזמן שהקדיש למענה נכון למטלות התואמות את הכלל. באופן מעשי חישבנו עבור כל נבדק את ההפרש בין זמן התגובה למטלות שאינן תואמות את הכלל לבין זמן התגובה למטלות התואמות אותו (ראה שימוש במדד דומה אצל Rueda et al., 2004). חישבנו מדד זה עבור מטלות פשוטות ומטלות מורכבות ונבדקו האם יש קשר בין מדד זה לבין מידת ההצלחה של הנבדק במטלות של חוסר התאמה לכלל (Stavy, & Babai, 2008). התוצאות מובאות באיור 10.



$$* p < 0.005$$

איור 10. הקשר בין מדד ההפרעה (בשניות) לבין מידת ההצלחה במטלות של חוסר התאמה

פשוטות ומורכבות

כפי שרואים מאיור 10 נמצא קשר חזק ומובהק בין מידת ההצלחה של הנבדק במטלות של חוסר התאמה לבין מדד הפרעה שלו הן לגבי מטלות פשוטות והן לגבי מטלות מורכבות. יתר-על-כן, לנבדקים בעלי רמת הצלחה נמוכה היה מדד הפרעה גבוה יותר במטלות המורכבות מאשר במטלות הפשוטות, שעה שלנבדקים בעלי רמת הצלחה גבוהה היה מדד הפרעה דומה לגבי שני סוגי המטלות, פשוטות ומורכבות.

כיצד ניתן להסביר ממצאים אלה?

הסבר אפשרי אחד הוא שלנבדקים בעלי מדד הפרעה נמוך יש מנגנוני בקרה חזקים ויעילים והם מצליחים לעכב את המידע המתחרה הבלתי רלוונטי של מימד השטח או להתעלם ממנו. כתוצאה מכך, הם משיבים נכון ויש להם זמני תגובה דומים במטלות פשוטות ומורכבות בשני המצבים: מצב של התאמה ומצב של חוסר התאמה. לעומתם, נבדקים בעלי מדד הפרעה גבוה נדרשים להקדיש מאמץ וזמן רב על מנת להתגבר על ההפרעה ולעתים קרובות אף זה אינו מספיק והם שוגים, במיוחד במטלות המורכבות הכרוכות בעומס קוגניטיבי גבוה. הסבר אפשרי נוסף הוא שלנבדקים בעלי מדד הפרעה נמוך קיבולת זיכרון עבודה יותר גבוהה. כמובן שיש לבחון הסבר זה באופן ניסיוני למשל, על-ידי מדידת קיבולת זיכרון העבודה של נבדקים בעלי מדד הפרעה נמוך וגבוה. לאור הסבר זה יש לצפות שלנבדקים בעלי מדד הפרעה נמוך תהיה קיבולת זיכרון עבודה גבוהה יותר מאשר לנבדקים בעלי מדד הפרעה גבוה. במחקרים בתחומים אחרים נמצא שהקיבולת הממוצעת של זיכרון העבודה החזותי היא מוגבלת מאוד, ויכולה להחזיק רק שלושה עד ארבעה פריטים באותה עת (Luck, & Vogel, 1997). בהקשר לכך, דווח לאחרונה שהיעילות של בחירת פריטים רלוונטיים משתנה באופן ניכר בין נבדקים ואפשר לנבא אותה על ידי קיבולת הזיכרון הייחודית של כל אדם (Vogel, McCollough, & Machizawa, 2005). נתון זה מתקשר לעובדה שקיבולת הזיכרון מתפתחת וגדלה עם הגיל

ובהתאם יכולת הנבדקים להתגבר על הפרעה האינטואיטיבית ולהשיב נכון במטלות שאינן תואמות את הכלל (ראה מעלה).

ניתן לסכם, אפוא, שגורמים אישיים הקשורים בפונקציות הביצועיות, מנגנוני בקרה מעכבת ו/או קיבולת זיכרון העבודה, עשויים להשפיע על יכולת האדם להתמודד עם הפרעה אינטואיטיבית, בפתרון בעיות במדע ובמתמטיקה.

סיכום

פרק זה מראה כיצד מאפייני החשיבה האינטואיטיבית עשויים להשפיע על יכולתו של התלמיד והמבוגר להשיב על מטלות פשוטות יחסית. מהמחקרים שתוארו הובררה חשיבותם של מאפייני מטלה שונים וכן של מאפיינים התלויים במשיב כגורמים משמעותיים המשפיעים על יכולתו להשיב למטלות בצורה נכונה. כמו כן, על בסיס ממצאים אלו תוארה גישת התערבות המדגישה את חיזוקם של מנגנוני הבקרה כעזר להתמודדות עם הפרעות הנובעות מחשיבה אינטואיטיבית. מחקרים נוספים שערכנו לאחרונה מראים כי החשיבה האינטואיטיבית משפיעה גם במטלות ובנושאים נוספים במדע ובמתמטיקה (Babai, Brecher, & Amsterdamer, 2008; Babai, 2008; Stavy, & Tirosh, 2006; Babai, Sekal, & Stavy, 2008). מחקרים אלו ממחישים כיצד שימוש במתודולוגיות המקובלות במחקר הפסיכולוגי קוגניטיבי ובמדע העצב עשויים לסייע למחקר בחינוך ולקדמו. להערכתנו, שילוב של גישות מחקר כאלו ושל ידע שהצטבר בתחומים אלו יסייע בידנו להבין תהליכי חשיבה ובהמשך עשוי להצביע על דרכי הוראה שיקדמו את השיגי התלמידים.

רשימה ביבליוגרפית:

זילבר, ח' (2004). שימוש בכלל האינטואיטיבי " יותר מ- A, יותר מ- B" במדידת זמן תגובה בשאלות העוסקות בשטח ובהיקף. עבודת גמר לקראת התואר "מוסמך למדעי הרוח", בית ספר לחינוך, אוניברסיטת תל-אביב.

לבידון, ת' (2003). שימוש בכלל האינטואיטיבי " יותר מ- A, יותר מ- B" בהקשר לשטחים והיקפים: זמני תגובה. עבודת גמר לקראת התואר "מוסמך למדעי הרוח", בית ספר לחינוך, אוניברסיטת תל-אביב.

Anderson, V. A., Anderson, P., Northam, E., Jacobs, R., & Catroppa, C. (2001). Development of executive functions through late childhood and adolescence in an Australian sample. *Developmental Neuropsychology*, 20, 385-406.

Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 170-177.

Babai, R., & Amsterdamer, A., (2008). The persistence of solid and liquid naive conceptions: A reaction time study. *Journal of Science Education and Technology*, in press.

Babai, R., Brecher, T., Stavy R., & Tirosh, D. (2006). Intuitive interference in probabilistic reasoning. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 4, 627-639.

Babai, R., Levyadun, T., Stavy R., & Tirosh D. (2006). Intuitive rules in science and mathematics: A reaction time study. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 37, 913-924.

- Babai, R., Sekal, R., & Stavy, R. (2008). Persistence of the intuitive conception of living things in adolescence. Manuscript submitted for publication.
- Babai, R., Zilber, H., Stavy, R., & Tirosh, D. (2008). The effect of intervention on accuracy of students' responses and reaction times to geometry problems. Manuscript submitted for publication.
- Blakemore, S. J., & Choudhury, S. (2006). Development of the adolescent brain: Implications for executive function and social cognition. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47, 296–312.
- Carey, S. (1985). *Conceptual change in childhood*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Champagne, A. B., Klopfer, L. E., & Anderson J. H. (1980). Factors influencing the learning of classical mechanics. *American Journal of Physics*, 48, 1074-1079.
- Dempster, F. N., & Corkil, A. J. (1999). Interference and inhibition in cognition and behavior: Unifying themes for educational psychology. *Educational Psychology Review*, 11, 1-88.
- Driver, R. (1994). *Making a sense of secondary science*. London: Routledge.
- Duit, R. (2007). Students' and teachers' conceptions and science education: A bibliography, full version March 2007. Retrieved from <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>
- Evans, J. B. T., & Over, D. E. (1996). *Rationality and reasoning*. Hove, UK: Psychology Press.

- Fias, W., Lammertyn, J., Reynvoet, B., Dupont, P., & Orban, G. A. (2003). Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, 47-56.
- Fischbein, E. (1987). *Intuition in science and mathematics*. Dordrecht, The Netherlands: Reidel.
- Gunstone, R. F., & White, R. T. (1981). Understanding of gravity. *Science Education*, 65, 291-299.
- Hale, S., Bronik, M. D., & Fry, A. F. (1997). Verbal and spatial working memory in school-age children: Developmental differences in susceptibility to interference. *Developmental Psychology*, 33, 364–371.
- Houde, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 721-728.
- Klingberg, T., Forssberg, H., Westerberg, H. (2002). Increased Brain Activity in Frontal and Parietal Cortex Underlies the Development of Visuospatial Working Memory Capacity during Childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 1-10.
- Konishi, S., Nakajima, K., Uchida, I., Kikyo, H., Kameyama, M., & Miyashita, Y. (1999). Common inhibitory mechanism in human inferior prefrontal cortex revealed by event-related functional MRI. *Brain*, 122, 981-991.

- Lawson, A. E. (1995). *Science teaching and the development of thinking*. Belmont, CA: Wadsworth.
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390, 279-281
- Mullis, I. V. S., Martin, M. O., Gonzalez, E. J., & Chrostowski, S. J. (2004). *Findings from IEA's trends in international mathematics and science study at the fourth and eighth grades*. Chestnut Hill, MA: TIMSS & PIRLS International Study Center, Boston College.
- Novak, J. D., & Gowin, B. (1984). *Learning how to Learn*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Osborne, R. J., & Freyberg, P. (1985). *Learning in science: The implication of children's science*. Auckland, New Zealand: Heinemann.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1969). *The psychology of the child*. New York: Basic books.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1974). *The child's construction of quantities*. London: Routledge & Kegan Paul.
- Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D., & Dehaene S. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron*, 41, 983-993.
- Rueda, M. R., Fan, J., McCandliss, B. D., Halparin, J. D., Gruber, D. B., Lercari, L. P., & Posner, M. I. (2004). Development of attentional networks in childhood. *Neuropsychologia*, 42, 1029-1040.

- Schoenfeld A. H. (1985). *Mathematical problem solving*. New York: Academic Press.
- Shayer, M., & Adey, P. (1981). *Towards a science of science teaching: Cognitive development and curriculum demand*. London: Heinemann.
- Sloman, S. (1996). The empirical case for two systems of reasoning. *Psychological Bulletin*, 119, 30-32.
- Stavy, R., & Babai, R. (2008). Complexity of shapes and quantitative reasoning in geometry. *Mind, Brain, and Education*, in press.
- Stavy, R., Babai, R., Tsamir, P., Tirosh, D., Lin, F. L., & McRobbie, C. (2006). Are intuitive rules universal? *International Journal of Science and Mathematics Education*, 4, 417-436.
- Stavy, R., Goel, V., Critchley, H., & Dolan, R. (2006). Intuitive interference in quantitative reasoning. *Brain Research*, 1073-1074, 383-388.
- Stavy, R., & Tirosh, D. (1996). Intuitive rules in science and mathematics: The case of 'more of A – more of B". *International Journal of Science Education*, 18, 653-667.
- Stavy, R., & Tirosh, D. (2000). *How students (mis-)understand science and mathematics*. New York: Teachers College Press.
- Stroop, R. J. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Tirosh, D., & Stavy, R. (1999a). Intuitive rules and comparison tasks. *International Journal of Mathematics Thinking and Learning*, 1, 179-194.

- Tirosh, D., & Stavy, R. (1999b). Intuitive rules: A way to explain and predict students' reasoning. *Educational Studies in Mathematics*, 38, 51-66.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1983). Extensional versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability judgment. *Psychological Review*, 90, 293-315.
- Vogel, E. K., McCollough, A. W., & Machizawa M. G. (2005). Neural measures reveal individual differences in controlling access to working memory. *Nature*, 438, 500-503.
- Vosniadou, S., & Ioannides, C. (1998). From conceptual development to science education: A psychological point of view. *International Journal of Science Education*, 20, 1213-1230.
- Zelazo, P. D., Carter, A., Reznick, J. S., & Frye, D. (1997). Early development of executive function: A problem-solving framework. *Review of General Psychology*, 1, 1-29.

המוח המוסיקלי: מוסיקה ויכולות אחרות

רוני יגר-גרנות, האוניברסיטה העברית, ירושלים

דונה אבקסיס, אוניברסיטת בן-גוריון שבנגב

עיבוד והפקת מוסיקה הן מהפעילויות הקוגניטיביות המורכבות ביותר שמבצע האדם. אפילו האזנה לשיר ילדים פשוט מערבת הפעלה של רשת של אזורים מוחיים שונים, הרבה מעבר לאזורי השמע ובכלל זה אזורים המעורבים בעיבוד מידע מוטורי, רגשי ולשוני, לצד מערכות קשב וזיכרון. יחד עם זאת, היכולת לקלוט ולהפיק מוסיקה היא עתיקת יומין (מתוארכת בסדרי גודל של עשרות אלפי שנים), מצויה בכל התרבויות, והיא נחלת הכול – גם אלה הזייפנים בינינו. למעשה, מחקרים מראים שרק כ-4-5% מהאוכלוסייה סובלת מלקות מוסיקלית מולדת (congenital amusia) וגם זאת, בעיקר בכל הקשור לגובה הצליל ללא לקות נלוות בתפיסה או הפקת קצב (Foxton et al., 2006). יתרה מזו, אפילו תינוקות בני 5-7 חודשים מראים יכולות מוסיקליות מורכבות, הדומות מאוד ליכולות שלנו כמבוגרים. למעשה, תינוקות מראים לעיתים יכולות עדיפות על יכולותיהם של מבוגרים אשר אצלם כבר התקבעו סכימות קוגניטיביות ספציפיות לתרבותם המוסיקלית (Trainor & Trehub, 1992). צירוף נתונים זה העלה בשנים האחרונות את האפשרות שמוסיקה אינה רק קישוט תרבותי מענג ("חגיגה לאוזן" או auditory cheesecake כפי שכינה אותה חוקר המוח סטיבן פינקר, Pinker, 1997) אלא בעלת תפקיד ממשי בהישרדות האדם. ללא תלות במה שיגלה המחקר על תפקידה האבולוציוני של המוסיקה, קשה להתווכח על המרכזיות שלה בחיינו החל מן השירה והדיבור ה"מוסיקלי" שבין האם לתינוק, דרך השירים המלווים אותנו במעגל החיים, השירים המתנגנים במוחנו גם כשאנחנו לא מזמינים אותם, דרך כוחה של המוסיקה לבטא מחאה, להגדיר קבוצות השתייכות, להרגיע או לעורר, ולאפשר תקשורת במקום שבו שפה נכשלת.

1. השפעת המוסיקה על המוח – מחקרים בקרב מוסיקאים מקצועיים

למרות שלכל אחד מאיתנו יכולות מוסיקליות, רק קומץ "נבחר" מבינינו הופכים (בעולם המערבי) להיות מוסיקאים מקצועיים. נגינה בכלי או שירה מקצועית מערבות בו זמנית פעולה של קריאת מערכת סימנים מורכבת המספקת מידע על צלילי המנגינה ותזמונם היחסי (תווים) לצד פעילות רב-חושית מורכבת. מן הנגן נדרשת פעולה של מיפוי המידע הראייתי המופק מכתב התווים, למידע מוטורי שמאפשר תכנון והפקה של הרצף המוטורי התומך ביכולת להזיז את אברי הגוף (ידיים, אצבעות, פה, רגליים) לנקודה נתונה במרחב בעוצמה ובתזמון המדויקים. פעולה זו, דומה במידה רבה לפעולה של קריאת טקסט המחייב מיפוי מן הסימן החזותי לתוצר מוטורי ואקוסטי. ואכן, מחקרים מראים שהפעולה של קריאת תווים נתמכת על ידי אזורים מוחיים חופפים או סמוכים לאזורי המוח התומכים בקריאת טקסט ובכלל זה אזורים באונה האוקסיפיטלית ובאונה הפריאטלית (Nakada et al., 1998; Schön et al., 2002).

תוך כדי התהליך המורכב הזה, מוחו של הנגן מקבל בו זמנית קלט תחושת (למשל מגע האצבע על הקליד), קלט קינסטטי (המשוב מן השרירים והמפרקים בכל גופו), וקלט שמיעתי המושווים לסכימה המנטאלית הקיימת במוחו על בסיס הכרות עם היצירה הספציפית, או עם רצפים דומים מיצירות אחרות כגון סולמות (רצף של צלילים בזה אחר זה), אקורדים (צירופים מקובלים של שלושה או ארבעה צלילים בו זמניים), וחלקי מנגינות נפוצים כגון תבניות סיום (קדנצות). לעיתים קרובות, נדרש המוסיקאי המקצועי גם ללמוד רצפים ארוכים בעל-פה. אך אפילו בנגינה מתווים קיימת הפעלה מתמדת של זיכרון ארוך טווח (יצירות קודמות, תרגולים קודמים) וקצר טווח (הצלילים הקודמים). ברור גם, שעל מנת להצליח לבצע את כל המשימות הללו בו זמנית נדרשת יכולת לחלק את משאבי הקשב מחד, ולא לאבד קשב מאידך. בשונה אולי מפעולות מוטוריות רב-חושיות ומורכבות אחרות שאנו מבצעים כגון נהיגה או הקלדה, הנגינה דורשת גם גמישות רבה של הפעלת התוכניות המנטאליות התומכות בהפקה המוטורית, לטובת המבע הרגשי ההולם את היצירה. שכן בסופו של דבר, הפקת מוסיקה, כמו שפה היא בבסיסה, תהליך תקשורתי.

אין פלא אם כן שמוסיקאים מתרגלים נגינה לאורך שנים, לרוב מגיל צעיר מאוד, ומהווים לכן מודל מצוין לחקר יכולתו של המוח להשתנות ולהתעצב בהשפעת תרגול (brain plasticity & expertise). באופן כללי ניתן לחלק את האזורים המראים הבדלים בין מוסיקאים מקצועיים ללא-מוסיקאים או אפילו למוסיקאים חובבים, לאזורים התומכים ישירות בנגינה ובהאזנה; לאזורים שתפקידם לשלב את המידע המגיע מן החושים השונים (אזורים מולטימודאליים); ולאזורים פר-פרונטאליים הקשורים יותר לבניית הרצף. בכל האזורים הללו ובהם אזורי שמע ראשוניים ושניוניים, אזורים סנסומוטוריים ראשוניים ושניוניים, אזור הצרבלום (האחראי, בין היתר על קואורדינציה ופעולות מוטוריות מורכבות), אזורים באונה הטמפורלית הקשורים לאינטגרציה רב-חושית, ואזורים פרונטאליים ובעיקר אזור ברודמן BA44-45 -- נצפו הבדלים בנפח החומר האפור במוחם של פסנתרנים מקצועיים לעומת חובבנים (Schlaug et al., 2005). כך למשל, גם אגד הסיבים המחבר בין שתי ההמיספרות (Corpus Callosum) גדול יותר בחלקו הקדמי בקרב פסנתרנים מקצועיים בהשוואה ללא-מוסיקאים, בפרט אצל אלה שהתחילו את לימודי הנגינה לפני גיל שבע (Schlaug et al., 1995). נראה שהבדל זה משקף את הבסיס הניורוני לתקשורת הבין-המיספרית המוגברת הנדרשת, בעיקר בין אזורים מוטוריים כגון ה premotor and supplementary motor cortex, בעת ביצוע רצפים מוטוריים מורכבים בשתי הידיים. הפעולה המורכבת הנדרשת בזמן נגינה משפיעה גם על האופן שבו המוח מקצה "שטחי עיבוד" למידע הסנסומוטורי המתקבל מן האצבעות. כך למשל אלברט ושותפיו (Elbert et al., 1995) דיווחו על הגדלה של האזור המייצג את אצבעות יד שמאל אצל נגני כלי מיתר בהשוואה ללא-מוסיקאים, ובהשוואה ליד ימין (שהיא היד האוחזת בקשת או פורטת ומקבלת לכן פחות מידע סנסומוטורי). יתרה מזו, הגדלה זו הייתה פחות משמעותית עבור אגודל יד שמאל (האוחזת בצוואר הכלי) ומידת ההגדלה נמצאה, כמו בדיווח של שלאוג וחבריו, במתאם עם הגיל שבו החל הנגן את לימודי הכלי. לא רק אזורי המוח הקשורים בפעולה המוטורית משתנים בעקבות תרגול המוסיקה אלא גם אזורים בקורטקס השמיעתי. שניידר ושותפיו השוו באמצעות

מגנטואנצפולוגרפיה MEG עיבוד צלילים בקרב מוסיקאים מקצועיים בהשוואה למוסיקאים חובבנים וללא-מוסיקאים (Schneider et al., 2002)). עיבוד הצלילים עורר תגובה נירופיזיולוגית חזקה יותר בקורטקס האודיטורי הראשוני בקרב המוסיקאים, ונפח החומר האפור באזור ה- Heschl's gyrus היה גדול יותר בקרב קבוצה זו. שני המדדים נמצאו במתאם עם הצלחה במבחנים של יכולת מוסיקלית ועם גיל התחלת הלימוד. התגובה המוחית לצלילים בקרב מוסיקאים גדולה אף יותר לצליל של הכלי שעליו הנגן מתרגל. כך למשל כריסטו פנטב הראה שכאשר פסנתרנים שומעים צלילי פסנתר, אזור גדול יותר בקורטקס השמיעתי (השמאלי) מגיב בהשוואה ללא-מוסיקאים, ובהשוואה לצלילים לא-מוסיקליים (Pantev et al., 1998). שינויים דומים נצפו אצל ילדים אפילו לאחר שנה אחת בלבד של תרגול (Fujioka et al., 2006).

מעניינים במיוחד ההבדלים האנטומיים שנצפו בין מוסיקאים ולא-מוסיקאים באזורים BA44-45 - אזור הידוע יותר בשמו אזור ברוקה (וההומולוג שלו בהמיספרה הימנית). אזור זה, המוכר יותר כתומך ברצף המוטורי הדרוש לדיבור, נמצא בשנים האחרונות כבעל תפקודים רחבים הרבה יותר ובהם שליטה ובקרה על רצפים מוטוריים מורכבים אחרים כגון תנועות ידיים, אינטגרציה של רצף אודיטורי ליחידות הירארכיות ויכולת ניבוי על בסיס מבנה הרצף, וכן מיפוי שבין אובייקטים ראיתיים ושמיעתיים לבין הפעולות המייצרות אותן (ראה למשל Sluming et al., 2002, 2007).

2. הבדלים מולדים או תוצאה של תרגול?

בעקבות ממצאים אלה, עולה השאלה האם ההבדלים הנצפים בין מוסיקאים מקצועיים ללא-מוסיקאים הם תולדה של התרגול המאסיבי בתקופות קריטיות להתפתחות המוח, או שהם מעידים על הבדלים אנטומיים או פונקציונאליים מולדים אשר אפשרו, אולי, התפתחות של היכולות הנדרשות למוסיקאי המקצועי. מחקרים על בעלי חיים המראים שינויים בצפיפות הסינפסות כתוצאה מתרגול מוטורי מאסיבי, לצד המתאם בין גודל השינוי הנצפה לבין כמות התרגול או הגיל שבו החלה ההכשרה, כמו גם מחקרים המראים שינויים פונקציונאליים (למשל

בפעילות החשמלית) גם לאחר תרגול קצר יחסית, מרמזים כולם על-כך שההבדלים הם אכן תוצר של תרגול. יחד עם זאת, אין דרך לוודא זאת ללא מחקר אורך שבו משווים קבוצה של ילדים המתחילים הכשרה של נגינה, לעומת קבוצת ילדים שאינה לומדת נגינה המשווים אליהם בפרמטרים של גיל, מצב סוציו-אקונומי ואינטליגנציה כללית. בוחנים את הביצועים והמדדים המוחיים של שתי הקבוצות בנקודת התחלת המחקר, ושוב חוזרים על הבדיקה לאחר מספר שנים. שלאוג וקבוצתו נמצאים בעיצומו של מחקר כמו זה המתואר כאן, בקרב ילדים בני 5-7 (Norton et al., 2005; Schlaug et al., 2005; Schlaug & Bangert, 2007). ברמת הקבוצה (ממוצע של ההדמיות של כל חברי הקבוצה) לא נמצאו הבדלים מוחיים מוקדמים בין הילדים שבחרו להתחיל ללמוד כלי נגינה לבין אלה אשר לא החלו בלימודי נגינה. יחד עם זאת, יידרשו עוד מספר שנים על מנת לבחון האם אותם בודדים שכן יהפכו בסופו של דבר למוסיקאים מקצועיים יראו, ברמת הפרט, הבדלים אנטומיים מולדים שהובילו אותם להצטיין כמוסיקאים.

שני ממצאים מעניינים נוספים דווחו בעבודה זו: ילדים אשר הצליחו ברמה גבוהה יותר בטסט של גורדון הבודק יכולת מוסיקלית (Gordon's primary music measures of audiation:) (PMMA), ללא תלות בקבוצה (מתחילים ללמוד מוסיקה או לא), הצליחו יותר בטסט של מודעות פונולוגית (לחזור על המלה בלי תחילית או סופית) ובטסט של יכולת מרחבית שבו הילד מתבקש להביט בפאזל עם חלק אחד חסר ולבחור את החלק התואם מבין 6-8 חלקים (Raven's Colored Progressive Matrices (CPM) & Raven's Standard Progressive Matrices (SPM)). לא נמצא מתאם מובהק עם יכולות אחרות כגון בניית מבנה של קוביות על בסיס מודל הנמצא לפני הנבדק, אוצר מילים, או יכולת שחזור מקצבים בהקשה. המתאם שכן נמצא מרמז על הקשר שבין העיבוד המוסיקלי לעיבוד המרחבי והלשוני (כפי שיפורט בהמשך).

תמונה מרתקת זו על ההבדלים במוחם של מוסיקאים לעומת לא-מוסיקאים מעלה את האפשרות שהתרגול המוסיקלי משפיע גם על יכולות קוגניטיביות אחרות. האם האזנה למוסיקה משפרת יכולת של תפיסה מרחבית כפי שנטען ב"אפקט מוצרט"? האם היא משפרת יכולות מתמטיות או

שפתיות? האם יש קשר בין תרגול מוסיקלי לבין אינטליגנציה כללית? העיסוק בהשפעותיה התרפויטיות והחינוכיות של המוסיקה עלה כבר בימים קדומים כפי שאנו שומעים למשל בסיפור דוד ושאול או כפי שעולה ב"המדינה" של אפלטון. המחקר העכשווי בנושאים אלה חושף בצורה חדה לא רק את מורכבות השאלה אלא גם את הצורך להציב מסגרת תיאורטית מתאימה למחקר מסוג זה, כפי שיודגם להלן.

3. הקשר בין פעילות מוסיקלית לבין יכולת מרחבית

דוגמה מאלפת במיוחד לזהירות שיש לנקוט בסוג המחקר המבקש לחקור את השפעות המוסיקה על יכולות אחרות מצויה באפקט שכונה "אפקט מוצרט" ואשר הוטבע בעקבות מחקרם של פרנסיס ראושר ושותפיה (Rauscher, Shaw, & Ky, 1993; Rauscher & Shaw, 1998). הטענה שהוצגה על ידי החוקרים הייתה ש-10 דקות האזנה לסונטה לשני פסנתרים ק.448 של מוצרט, גורמת לשיפור ביכולת מרחבית כפי שזו נמדדת במבחן המבוסס על היכולת לדמיין כיצד יראה דף מקופל שבוצעו בו מספר חיתוכים לאחר פרישתו (paper folding and cutting) (subtest from the Stanford Binet Intelligence test, see Thorndike et al., 1986). המחקר עורר הדים רבים, ואומץ בחום על ידי התקשורת שהציגה אותו, תוך עוות ממצאי החוקרים, כהוכחה לכך שהאזנה למוצרט משפרת את האינטליגנציה. יחד עם זאת מחקרי המשך התקשו לשחזר את האפקט. יתרה מזו שלנברג ואחרים הראו שלמעשה קיים גם "אפקט באך" (Ivanov and Geake, 2003), "אפקט שוברט", ואפילו "אפקט האזנה לסיפור" (Nantais & Schellenberg, 1999). בעקבות כך הועלתה ההשערה שהגורם האחראי לשיפור הביצועים בטסטים בכל המקרים האלה היה רמת העוררות (עליה ניתן לחשוב במונחים של רמת האקטיבציה הפיזית והפסיכולוגית) ומצב-הרוח של הנבדקים, עליהם ניתן להשפיע בקלות יחסית באמצעות מוסיקה. אולם גם הסבר זה נמצא פשטני מדי כפי שעלה מתוך מחקר שפורסם לאחרונה על ידי גלן שלנברג ושותפיו (Schellenberg et al., 2007). במחקר זה נמצאה אומנם

התאמה בין דיווח על עלייה בעוררות ושיפור מצב הרוח לבין שיפור בביצועים, אולם התאמה זו נמצאה רק במטלה של חיפוש סימבול ברצף סימנים וויזואליים (מדד של מהירות עיבוד), ולא נמצאה במטלה של זיכרון עבודה.

יחד עם זאת, יהיה זה מוקדם מדי ל"קבור" את הקשר שבין פעילות מוסיקלית לבין יכולת מרחבית.

המחקר של ראושר ושותפיה, התבסס על הנחה לפיה המבנה הצלילי המתוחכם של המוסיקה של מוצרט מעורר פעילות נוירוגלית בעלת תצורה של מבנים מרחביים מורכבים במוחנו. גם אם נקבל טענה זו, הרי שאין סיבה לחשוב שמבנים מרחביים אלה הנוצרים תוך כדי האזנה למוסיקה, מסייעים בעיבוד מרחבי. לעומת זאת, תרגול של נגינה בכלי, בפרט כלי כמו פסנתר יכול בהחלט להפעיל אזורים הקשורים לעיבוד מרחבי ולתרגל אותם. ראשית, קריאת תווים נסמכת על זיהוי מיקומו המרחבי של הצליל על הדף. זהות הצליל נקבעת על בסיס מיקומו סביב "שורה" הבנויה מחמישה קווים מקבילים הקרויה חמשה, באופן שאותו סימן (עיגול למשל) המופיע בנקודות גובה שונות על קווי החמשה מזוהה בכל פעם כצליל שונה. ואכן, מחקרים מראים שקריאת תווים מפעילה אזורים מוחיים התומכים בעיבוד ראייתי מרחבי ובפרט באזור אוקסיפיטו-טמפורלי ימני שהוא, לפי החוקרים אזור הומוולוגי לאזור ראייתי התומך בקריאת מילים אשר ממוקם ב left fusiform gyrus. הבדל זה נובע מכך שבעוד קריאת טקסט דורשת זיהוי צורות, קריאת מוסיקה דורשת זיהוי מרחבי (Schön et al., 2002). שנית, הנגינה עצמה מחייבת הזזת היד והאצבעות לנקודות נבחרות במרחב (קליד מסוים על הפסנתר), תוך אינטגרציה של המידע משתי הידיים. למרות האמור לעיל, הממצאים הקושרים בין נגינה או קריאת תווים לבין יכולת מרחבית אינם חד משמעיים (לסקירה ראה Črnčec, Wilson, & Prior, 2006). בעוד ראושר מצאה שתרגול נגינה בפסנתר בקרב ילדים אכן משפר יכולות של פתרון פאזלים אפילו בהשוואה לשיעורי מחשב (Rauscher et al., 1997), מחקר אורך של קוסטה ג'ומי (Costa-Giomi, 1999, 2004) מראה שלימוד נגינה בפסנתר יכול לשפר יכולות

מרחביות בקרב ילדים בני 9-11 אולם שיפור זה קטן עד בינוני ובעיקר, היתרון ההתפתחותי מתקזז עם הזמן. בעוד שבשנה הראשונה לנגינה נצפה הבדל בין הילדים שנגנו במקלדת לבין אלה שלא, הרי שבתום שלוש שנים ההבדלים הללו נעלמו. יחד עם זאת, גם המחקר של קוסטה ג'יומי מראה שהשיפור משמעותי מעט יותר כאשר מעורבים תהליכים של לימוד תווים, וכן שהשיפור משמעותי יותר כאשר התחלת ההוראה היא לפני גיל 5. שתי עבודות חדשות יותר מחזקות את הקשר בין פעילות מוסיקלית לבין יכולת מרחבית ובפרט יכולת לבצע רוטציה מנטלית של צורה תלת ממדית. מטלה זו מחייבת זיהוי הגירוי, אחזקתו בזיכרון העבודה, וכן את היכולת לבצע עליו סיבוב "בעיני רוחינו". ונסה סלאמינג ושותפיה (Sluming et al., 2007), הראו שנגנים בתזמורת מבצעים מטלות של הבנת משפטים פשוטים בשפה, וכן מטלה מרחבית פשוטה באופן דומה ללא-מוסיקאים, אך מראים עליונות באחוזי הדיוק במטלה מרחבית תלת-ממדית. יתרה מזו, בעוד שהלא-מוסיקאים הראו את התגובה הקלאסית של מתאם בין זמן תגובה לבין זווית הרוטציה של הצורה (ככל שהזווית גדולה יותר זמן התגובה ארוך יותר), לא נמצא מתאם כזה בקרב המוסיקאים. ממצא דומה דווח בעבר רק בקרב נבדקים אשר עברו תרגול מאסיבי על המטלה עצמה או על מטלות דומות לה. לבסוף זמן התגובה הממוצע של המוסיקאים נמצא במתאם הפוך לשנות הנגינה, אך רק במטלה המרחבית המורכבת. הדמיה פונקציונאלית באמצעות תהודה מגנטית (fMRI) הראתה במהלך המטלה המרחבית המורכבת פעילות דומה בשתי הקבוצות באזורים קלאסיים למטלה זו ובהם אזורי ראייה שניוניים (BA 18/19) אזורים פר-מוטוריים (BA6) ואזורים פריאטליים (BA7). מבין האזורים הנבדלים בין מוסיקאים ללא מוסיקאים בולט אזור ברוקה (BA44/45) שהראה מתאם בין רמת האקטיבציה באזור לבין מהירות התגובה. החוקרים משערים שהתרומה של אזור זה היא בעיקר לרצף הנדרש בעת תהליך אחזקת הדימוי המנטאלי של הצורה והרוטציה הווירטואלית שמפעילים עליה. מחקר זה מדגיש את החשיבות של בחירה מתאימה של המטלה הנדרשת מן הנבדקים

לצד בקרה הולמת של רמת ההכשרה שלהם, כגורמים חשובים להבנת הקשר בין פעילות מוסיקלית לבין יכולת מרחבית.

עדות נוספת המחזקת את הקשר בין יכולת מוסיקלית לבין יכולת מרחבית נמצאה לאחרונה בעבודתם של קייטי דאגלס ודיוויד בילקי (Douglas & Bilkey, 2007). עבודה זו התבססה על ההנחה לפיה ייצוג של צלילים אינו רק אודיטורי אלא גם מרחבי. יתרה מזו, הייצוג המרחבי אינו תלוי בהכרות מוקדמת עם כתב התווים או כלי נגינה כלשהו, אלא מהווה חלק מהאופן שבו אנו מקדדים את היחס בין צלילים באופן אינטואיטיבי, בדומה לאופן שבו אנו מארגנים את המספרים על ציר אחד או יותר במרחב. ביסוס להנחה זו נמצא במספר עבודות בהן נמצא אפקט התאמה בין גירוי לתגובה (SRC = Stimulus Response Compatibility) באופן שהתגובה לצלילים גבוהים יותר (אודיטורית) הייתה מהירה יותר כאשר התגובה שנדרשה הייתה לחיצת כפתור המצוי בנקודה גבוהה במרחב (מצב התאמה) בהשוואה למצב של אי-התאמה שבו נדרש הנבדק להגיב לצליל גבוה בלחיצה על כפתור המצוי בנקודה נמוכה במרחב (Rusconi et al., 2006).

מעניין לציין שאפקט זה שכונה SMARC (Spatial-Musical Association of Response Codes) אנלוגי לאפקט מרחבי דומה שנמצא לגבי מספרים הידוע בכינוי Spatial-Numerical Association of Response Codes = SNARC. דאגלס ובילקי מצאו שנבדקים אמוזיים (הלוקים ביכולת לזהות הבדלים בגבהי הצלילים) היו טובים פחות ממוסיקאים ומלא-מוסיקאים בעלי יכולת מוסיקלית תקינה, במטלה של רוטציה מנטאלית של צורות גיאומטריות. לעומת זאת הם לא נבדלו בביצועיהם במטלה של זיהוי והשוואה בין דמות של חיה לבין סדרה של 15 תמונות של בעלי חיים. יתרה מזו, קבוצת האמוזיים הראתה פחות הפרעה בביצוע המטלה במצבי אי-תיאום בין הגובה הצלילי לגובה המרחבי של התגובה המוטורית, וכן פחות הפרעה במצבים של מטלה אודיטורית ומרחבית בו זמנית. ממצאים אלה יחדיו יכולים להעיד על קשר ישיר בין הייצוג הצלילי האודיטורי למרחבי באמצעות משאבים נירונליים משותפים, או על קשר עקיף באמצעות מנגנון שלישי המשפיע על שניהם – כמו למשל רמות הטסטוסטרון ברחם. נותר

לברר בצורה מושכלת יותר את כוון ההשפעה של יכולות אלה: האם השפעה על יכולת מרחבית משפיעה על יכולת קידוד גבהים צליליים כשם ששיפור ביכולת המוסיקלית יגרור שיפור ביכולות מרחביות? או אולי ההשפעה היא חד-כיוונית? מה שברור הוא שעל מנת לקדם את המחקר חובה עלינו להבין את התהליכים המנטאליים בבסיס כל אחת מן היכולות, לחפש את המשותף, ולתכנן מטלות אשר מתרגלות או מנצלות בדיוק את התהליכים אליהם אנו מכוונים בדומה למה שכבר נמצא לגבי המטלה של רוטציה מנטאלית מורכבת.

4. הקשר בין פעילות מוסיקלית לבין יכולת מתמטית

בקרב אנשים רבים קיימת סברה שקיים קשר בין יכולת מוסיקלית לבין יכולת מתמטית. למרות ששני תחומים אלה שונים מאוד זה מזה, הם חולקים עקרונות מבניים מסוימים. כך למשל המקצב המוסיקלי מבוסס על יחסים מתמטיים באופן שמשכי צלילים עוקבים עומדים ביחס של מספרים שלמים זה לזה (למשל הצליל הארוך נמשך פי 2 או פי 3 מהקצר). עקרון זה מהווה מרכיב בסיסי במוסיקה כפי שעולה מהתבוננות באלתורים ספונטאניים של ילדים (Bamberger & Disessa, 2003). קריאת תווים דורשת יכולת לזהות תבניות והבנה של מושגים כגון כפל וחילוק (היחס בין צליל ארוך לקצר ובין כל אחד מאלה לביט הבסיסי ביצירה), והוספה והחסרה של ערכי משך שונים על בסיס ייצוגים סימבוליים שונים (למשל נקודה הנוספת לצד העיגול בכתב התווים מהווה הוראה להוסיף לצליל חצי ממשכו). גם בהבנה של המנגינה יש תהליכים שיכולים להיות רלוונטיים לחשיבה מתמטית כמו למשל הבנה של החוקיות של הרצף בדומה להבנת החוקיות בסדרות מתמטיות. דוגמה יפה לכך מצויה בעיקרון ה"סקוונצה" שבו אותו רצף צלילים קצר חוזר על עצמו בהזזה כלפי מעלה או מטה (למשל רצף הצלילים 1-2-3-2 שמיצג מדרגות בסולם, ינוגן בהזזה כ 2-3-4-3 וכו'). ככל שהנגן יזהה במהירות גדולה יותר שמדובר באותה תבנית בהזזה, יוכל כמובן לקדד, לבצע, ולזכור את הרצף ביתר יעילות.

למרות העקרונות המשותפים שהוצגו לעיל, המחקר על הקשר בין תרגול מוסיקלי ויכולת מתמטית לא הניב תמונה חד משמעית. בניתוח-על שביצעה ווהן (Vaughn, 2000) היא דיווחה על קשר של מתאם מסוים בין תרגול מוסיקלי לבין יכולות מתמטיות. אולם בשישה מחקרים שבחנו לא רק מתאם אלא גם סיבתיות, נמצא רק קשר חלש ביותר בין שני התחומים. אחד המחקרים שהראו אפקט חזק יחסית דווח על ידי גארדינר ושותפיו (Gardiner et al., 1996) שהראו שילדים בני 5-7 אשר תורגלו במשך שנתיים בתרגול מוסיקלי אינטנסיבי, הצליחו במבחנים מתמטיים טוב מחבריהם שלא קבלו תוספת לתוכנית הלימודים הרגילה. מובן שתחת תנאי השוואה אלה קשה לדעת מה מקור האפקט – האם הוא קשור ספציפית לתרגול המוסיקלי או באופן כללי יותר לטיפוח, למוטיבציה או שיפור במצב הרוח שחוו הילדים שלמדו מוסיקה. מנגד, מחקר האורך של קוסטה ג'יומי (Costa-Giomi, 2004) שנמשך שלוש שנים הצביע על כך שילדים שלמדו נגינה בפסנתר מראים רק נטייה חלשה, שלא עברה את סף המובהקות, להשיג הישגים גבוהים יותר במתמטיקה בהשוואה לחבריהם שלא למדו פסנתר. באופן דומה מרי פורגירד ושותפיה שגם אחרי 3-7 שנות נגינה, הילדים המנגנים לא השיגו ציונים גבוהים יותר במבדקים מתמטיים בהשוואה לקבוצה מקבילה של ילדים שלא למדו נגינה (Forgeard et al., 2008).

באחד המחקרים הבודדים שבחנו את הקשר בין יכולת מוסיקלית למתמטית באמצעות הדמיה מוחית, השוו שמיטהורסט והולנד (Schmithorst & Holland, 2004) מוסיקאים ולא מוסיקאים במטלה של חיבור וחיסור מנטאליים של שברים. בקרב המוסיקאים התגלתה פעילות מוגברת בקורטקס הפר-פרונטאלי השמאלי (BA46) אשר פורשה כפעילות מוגברת של זיכרון עבודה, וכן פעילות מוגברת באזור ה fusiform gyrus השמאלי לצד פעילות קטנה יותר באזורי ראייה אסוציאטיביים ובאזור ה inferior parietal lobule השמאלי אשר פורשו כעדות לעיבוד מרחבי טוב יותר או אפילו ייצוג מופשט יותר של השברים. מובן שחיבור וחיסור שברים מהווים רק הבט אחד של היכולת המתמטית ותידרש עוד עבודה רבה לאפיין את התהליכים הספציפיים

המשותפים לשני התחומים אשר אולי מאפשרים העברה מתחום לתחום. נראה שהתרגול של תבניות משכים וגבהים על הייצוג הסימבולי המורכב שלהם לצד הטרנספורמציות שניתן להכיל עליהם כגון הזזה, הרחבה (למשל כל משך מוכפל פי שתיים), צמצום ועוד, יכולים להוות נקודת התחלה טובה (Bahr & Christensen, 2000).

5. הקשר בין פעילות מוסיקלית לבין יכולת לשונית

5.1 כמה נקודות על דמיון ושוני בין מוסיקה ושפה

מוסיקה, הינה תופעה אוניברסאלית, אשר גם אם יש לה שורשים בתקשורת של בעלי החיים, בצורתה המורכבת המוכרת לנו היום, ייחודית למין האנושי. מוסיקה כמו שפה מעבירה "משמעות" באמצעות ארגון הירארכי של צלילים הנפרשים בהדרגה על פני ציר הזמן, ואשר קליטתם מחייבת יכולת קליטה ועיבוד של אותות אקוסטיים מורכבים. יתרה מזו, ההפקה בשתייהן תלויה ביכולת לייצר רצפים מוטוריים מורכבים הממופים לרצף האקוסטי. וכמו בשפה, יחידות בדידות (פונמות בשפה וצלילים במוסיקה) המהוות בחירה (תלוית תרבות) מתוך הרצף האקוסטי האינסופי, משמשות כאבני בניין ליצירת אינסוף צירופים חדשים (תכונת הגנרטיביות). המשמעות של צירופים אלה, הן במוסיקה והן בשפה היא יותר מסך המשמעות של החלקים מהם הם בנויים. הסינטקס המוסיקלי אינו כולל קטגוריות דקדוקיות כגון פועל או תואר אבל הוא כופה, כמו הסינטקס הלשוני חוקיות המארגנת את צירופי הצלילים לכלל רצפים, שהם, לעיתים קרובות, בעלי ארגון הירארכי מורכב. יתרה מזו, ניסויים כמו אלה שערכה ג'ני ספראן (McMullen & Saffran, 2004) מראים שאותו מנגנון של רגישות לחוקיות הסטטיסטית של הופעת יחידות בתוך הרצף האקוסטי, מסייעת לתינוקות בני מספר חודשים להבין מה הן יחידות המשמעות הן ברצף הפונטי (מילים) והן ברצף הצלילי (מוטיב חוזר במנגינה). כך למשל כדי להבין שהצירוף מוסיקה ומוח נפרדים למוסיקה ומוח צריך לעקוב אחר סבירות ההופעה של "קה" אחרי מוסי (מוסיקה) בהשוואה לסבירות של "ו" אחרי סיקה (סיקה). ברור שצירוף

המופיע תמיד כמילה יהיה בעל סבירות הופעה גבוהה מצירוף הנוצר מעבר לגבול של שתי מילים שכן אין הכרח ששתי המילים תמיד תופענה יחד בזו אחר זו (למעשה מוסיקה ומוח הוא צירוף נדיר וחדש יחסית). הרגישות לחוקיות הסטטיסטית, שהיא יכולת קוגניטיבית כללית עשויה להסביר, מדוע שירים מולחנים שבהם גבולות המילים מודגשים על ידי המידע הפונטי והמוסיקלי החופף, עשויים להיות כלי עזר חשוב בהוראת שפה שנייה, וזאת בנוסף להשפעה שעשויה להיות למוסיקה על רמת העוררות והקשב (Schön et al., 2008).

אך בעוד שפה מעבירה משמעות באמצעות סימנים מוסכמים ושרירותיים (מילים) אשר מקבלים את משמעותם המלאה על בסיס הארגון הסינטקטי במשפט, במוסיקה, אין יחס של מסמן ומסומן. צלילים, אקורדים, או מנגינות אינם מצביעים על משהו או מישהו בעולם אלא רק על עצמן. אולם גם השפה ובעיקר זו הדבורה, אינה מעבירה רק מידע רפרנציאלי (מצביעה על דברים בעולם) אלא גם מידע רגשי על מצבו של הדובר ועל היחס שלו לנמען. היא מנסה לשכנע, לרגש ובמובן זה היא "מניפולטיבית". במוסיקה, תפקידים אלה מועצמים והופכים לעיקר, אולי על חשבון המידע הרפרנציאלי הנעדר. אין זה מפליא לכן שכדי להעביר את הכוונה או הרגש, נדרש הדובר לשינויים אקוסטיים שמהווים אבני יסוד גם במוסיקה – שינויי גובה המתייחסים לקונטור עולה או יורד של ההנגנה, שינויי עוצמה, שינויי קצב, ושינויי גוון. מן העבר השני, מאחר שמוסיקה מבוססת גם היא על מרכיבים אקוסטיים דומים, הרי שככזו היא מתחברת למידע האקוסטי העשיר בעולמנו ולמשמעויות הקשורות בו: צליל מתחזק הוא גם צליל מתקרב ולכן גם יותר מאיים, צליל מואץ הריהו כדופק המואץ וכך הלאה. מוסיקה, אם כן, אינה מנותקת, מן העולם החוץ מוסיקלי, בדיוק כשם ששפה אינה מנותקת מן העולם האקוסטי הרגשי.

אין פלא אפוא שמספר חוקרים הציעו שגם מוסיקה וגם שפה התפתחו מאב קדום משותף שהווה שלב ביניים בין קריאות בעלי החיים אותן חיקו בני האדם הקדמונים לבין צורות התקשורת הללו – כפי שאנו מכירים אותן היום (Brown, 2000). ואכן תהליכי העיבוד ואזורי המוח התומכים בהפקה ובקליטה של מוסיקה מראים קשרים רבים לתהליכים של הפקה וקליטה של שפה.

5.2 תהליכים ואזורי עיבוד משותפים למוסיקה ושפה

מחקרים אלקטרופיזיולוגיים של רישום פוטנציאלים חשמליים (ERP – Event Related Potentials) המופקים כנגזרת מתוך הפעילות החשמלית המוחית הכללית כפי שנרשמת ב , EEG מצביעים על שלושה רכיבים בגל של המתח החשמלי המופיע בתגובה להפרות תחביריות (Koelsch et al., 2000). במוסיקה הפרות אלה מתממשות בדרך כלל על ידי אקורד שאינו מתאים לרצף האקורדים הקודם לו, ואילו בשפה בעזרת מילה היוצרת הפרה דקדוקית כגון "הילד פתח את הדלת ונכנס בית". הרכיבים המרכזיים שדווחו בתגובה להפרות כאלה הם רכיב מוקדם (בסביבות ה 200 מ"ש מתחילת הגירוי) המראה לטרליזציה לשמאל בחריגות לשוניות (ERAN = Early Right Anterior Negativity) ; ושני רכיבים מאוחרים יותר: ה- N5 וה- P600 . מאס ושותפיו (Maess et al., 2001) הראו שהמחולל החשמלי שמייצר את רכיב ה ERAN מצוי באזור ברוקה, ואילו קולש וסטיינבייס (Koelsch & Steinbeis, 2008) הראו שהמשרעת של רכיב זה קטנה כאשר החריגה המוסיקלית מוצגת בו זמנית עם חריגה לשונית – דבר המעיד על שימוש במשאבים קוגניטיביים משותפים בעיבוד שני סוגי החריגות. התמונה הנוירואנטומית של אזורים המשתתפים בעיבוד מוסיקה ושפה מצביעה גם היא על אזורי עיבוד משותפים רבים ובהם הקורטקס השמיעתי הראשוני התומך בעיבוד הראשוני של גובה הצליל (BA41), הקורטקס המוטורי הראשוני ובפרט אזורים התומכים בהפקה קולית (BA4) לצד אזורים תת-קורטיקליים משותפים כגון הגרעינים הבזליים וחלקים מהצרבלום. אזורי עיבוד הומולוגיים (באזורים מקבילים בשתי ההמיספרות) נמצאו עבור עיבוד פונולוגי וסינטקטי באזורים הקשורים לעיבוד שמיעתי מורכב (Wernicke Area BA22) ולהפקת רצפים מורכבים (BA44/45 Broca's Area) עם לטרליזציה לשמאל בעיבוד השפתי ולטרליזציה לימין בעיבוד המוסיקלי (Brown et al., 2006). בין אזורי העיבוד המשותפים הללו, קיימים כמובן גם אזורי עיבוד

ייחודיים למוסיקה מחד ולשפה מאידך כמו למשל האזורים באונה הטמפורלית התומכים בעיבוד סמנטי לשוני (למשל אזורים BA38; BA39 ;BA40).

5.3 תרגול מוסיקה ועיבוד לשוני

לאור הקשרים הנרחבים הפונקציונאליים והניוראנטומיים שבין מוסיקה ושפה שתוארו לעיל, אין להתפלא שיותר ויותר מחקרים מדווחים על קשר בין יכולת מוסיקלית לבין תפקודים לשוניים שונים. למעשה, ההשפעה של התרגול המוסיקלי על כוונן מערכת השמע כפי שבאה לידי ביטוי ביכולת לעקוב אחר מימד הגובה בגירויים לשוניים (למשל בשפות טונליות), נצפתה אפילו ברמות עיבוד תת-קורטיקליות עד לרמת גזע המוח (Wong et al., 2007). אולם ההשפעה ניכרת גם ברמות עיבוד גבוהות יותר. כך למשל דניאל שון וקולגות הראו רגישות גבוהה יותר של מוסיקאים לשינויים בגובה לא רק במנגינות, אלא גם בקונטור (קו המתאר) בדיבור בשפת האם (Schön et al., 2004) או אפילו בשפה זרה (Marques et al., 2007). השפעת התרגול המוסיקלי ניכרה גם בקרב ילדים בני 8 שלמדו 3-4 שנים נגינה אשר הצליחו להבחין לא רק בין משפטים הנבדלים בקונטור הגובה בצורה טובה יותר בהשוואה לילדים שלא נגנו, אלא גם הראו תגובה מוחית שהעידה על עיבוד החריגה בצורה טובה, גם כאשר ההבדלים בקונטור היו קטנים (Magne, Schön & Besson, 2006). נראה אם כן שהתהליך התומך בעיבוד מימד הגובה במוסיקה ובשפה הוא אותו תהליך, ותרגולו באמצעות המוסיקה משפיע גם על העיבוד הלשוני. ייתכן שרגישות מוגברת זו למימד הגובה עשויה להסביר גם את הרגישות הגבוהה יותר של מוסיקאים לזיהוי המבע הרגשי כפי שמועבר בפרוסודיה בדיבור (ענבר, 2002). כך למשל, תומפסון ושותפיו הראו שמוסיקאים מבחינים טוב יותר, בהשוואה ללא-מוסיקאים בין מספר קטגוריות רגשיות במשפטים לשוניים. הזיהים מבחינת התוכן הסמנטי אך נבדלים בפרוסודיה. למעשה מספיקה שנה אחת של תרגול מוסיקלי בקרב ילדים (בני 6) על מנת להשיג שיפור היוצר

אבחנה בין הילדים שהחלו לנגן לבין אלו שלא נגנו, אם כי יש להביא בחשבון ששיפור דומה הושג גם על ידי שעורי דרמה (Thompson, Schellenberg, & Husain, 2004).

עדות נוספת לקשר בין עיבוד חומר לשוני פונטי לבין עיבוד ממד הגובה והגוון במוסיקה מצויה בעליונות שמראים מוסיקאים בהיגוי של שפה שאינה שפת האם שלהם (Slevc, & Miyake, 2006). מעניין שגם הקשר ההפוך נמצא: ילדים שעברו תרגול פונטי ואשר הראו עליונות בהגייה של שפה זרה להם, הצליחו טוב יותר לא רק במבדקי אבחנה בין הפונמות בהן תורגלו אלא גם במבדקים של יכולת מוסיקלית בהשוואה לילדים עם הגייה פחות טובה (Milovanov et al., 2008). הבדלים אלה נרשמו גם ברמה ההתנהגותית וגם ברמה המוחית כפי שנמדד באמצעות רכיב ה Mismatch Negativity (MMN) של הפוטנציאלים החשמליים.

עיבוד הגובה (עיבוד ספקטראלי) שהוא גם הבסיס לתחושת הגוון, מהווה רק מימד אחד משותף לעיבוד המוסיקלי והלשוני. ממד נוסף חשוב לא פחות הוא העיבוד הטמפורלי – דהיינו היכולת לעבד מידע לגבי התזמון של האירועים האקוסטיים. טלאל וגאב (Tallal & Gab, 2006) טוענות שאצל ילדים הסובלים מלקות שפתית (LLI- Language Learning Impairment) הקושי העיקרי הוא בעיבוד ספקטרום-טמפורלי מהיר הפוגע בייצוגים הפונולוגיים וכתוצאה מכך יש פגיעה ביכולות שפתיות כגון קריאה וכתובה. ההנחה היא שתרגול מוסיקלי עשוי לשפר יכולות אלה. גאו ושותפיה (Gab et al., 2005) הראו שמוסיקאים בוגרים מצליחים להבחין בסדר של 3 צלילים אשר הופיעו בזה אחר זה בהפרשי זמן קצרים, טוב מאשר לא-מוסיקאים. יתרה מזו, בצלילים הקצרים ביותר אחוזי ההצלחה נמצאו במתאם עם שנות ההכשרה המוסיקלית. ההבדלים ניכרו גם ברמה המוחית כאשר הרשת המוחית שהייתה פעילה אצל המוסיקאים בזמן המטלה צרכה פחות חמצן (הייתה יעילה יותר) מאשר אצל לא-מוסיקאים. הממצא החשוב ביותר הוא שהאזורים שהראו את ההבדלים בין המוסיקאים ללא-מוסיקאים היו אזורים הקשורים לעיבוד לשוני בהמיספירה השמאלית, ובפרט אזור ברוקה. החוקרות מדגישות שחשוב לבחון

האם התרומה של המוסיקה במקרה זה היא רק בתרגול האודיטורי או גם בתרגול רצפים מוטוריים.

ייתכן שתרומת המוסיקה לעיבוד הלשוני אינה מסתכמת בשלב התפיסתי אלא באה לידי ביטוי גם בתהליכי זיכרון. למעשה, השפעה חיובית של תרגול מוסיקלי על זיכרון וורבלי דווחה במספר מחקרים, בקרב מבוגרים וילדים בריאים (Ho et al., 2003; Kilgore et al., 2000; Lee et al., 2007), גם בקרב חולים כגון חולי אמנזיה (Harlem & Cook, 2002) או טרשת נפוצה (Taut et al., 2008). הקשר בין זיכרון צלילי לזיכרון פונולוגי בוסס לאחרונה במחקרם של גאו ושותפיה שבו הושוו הביצועים ונתוני הדמיה מוחית fMRI של קבוצה שתרגלה במשך 5 ימים מטלה של זיכרון אודיטורי מוסיקלי, לקבוצה שלא קבלה כל תרגול כזה (Gab et al., 2006). בעקבות התרגול נצפתה הגברה בסיגנל שנרשם באזור בקורטקס האודיטורי הקשור לאבחנה בגובה הצליל (Heschl's gyrus) וכן באזור המהווה תחנת ממסר לזיכרון אודיטורי, ובכלל זה לזיכרון פונולוגי (supramarginal gyrus) – שניהם בהמיספירה השמאלית. יחד עם זאת, חשוב לשים לב שרק חלק מן הנבדקים הראו שיפור בביצועים ורק בנבדקים אלה גם נצפו השינויים המוחיים המדווחים כאן – תזכורת למורכבות הנושא ולצורך החיוני להתייחס גם להבדלים בין אישיים.

האם ממצאים אלה מתורגמים גם לממצאים הקשורים ליכולת האקדמית הכל-כך מרכזית של קריאה? האם תרגול מוסיקלי יכול להשפיע על יכולת זו? האם ההשפעה שונה מאשר צורות תרגול אחרות? סיכום המחקרים ההתנהגותיים שנעשו עד כה (Butzlaff, 2000; Forgeard et al., 2008) מצביע על מתאם בקרב ילדים ללא לקות קריאה, בין יכולת מוסיקלית לבין קריאה – מתאם המתווך ככל הנראה על ידי המודעות הפונולוגית (Ehri et al., 2001). גם בקרב ילדים דיסלקטים נמצא מתאם כזה כאשר חלק מן המחקרים מצביעים על יכולות רתמיות לקויות וחלק אחר מצביעים על תפיסת גובה לקויה בקרב ילדים אלה (Overy, 2003). תרגול מוסיקלי המבוסס על שירה בקרב ילדים בני 6 שהיו בסיכון בינוני-גבוה לדיסלקציה יצר שיפור במטלות

פונולוגיות אבל לא בקריאה. תרגול דומה של 15 שבועות בקרב בני 8 הוליד שיפור במבחר מטלות פונולוגיות ואפילו בהכתבות אך לא במדדים של קריאה. למרות שמחקרים אלה מתקשים להראות קשר סיבתי ישיר בין תרגול מוסיקלי לבין שיפור הקריאה, הממצאים שדווחו עד כה בהחלט מצדיקים המשך המחקר בכוון זה.

6. הקשר בין פעילות מוסיקלית לבין יכולות מוטוריות

אחת התגובות החזקות והבולטות ביותר למוסיקה היא התגובה המוטורית – בדרך כלל כזו הקשורה לביט המוסיקלי. הביט המוסיקלי (פעמה) מחלק את ציר הזמן במוסיקה ליחידות זמן אחידות המהוות בסיס לכל המבנה הקצבי המוסיקלי. כפי שאפשר לראות בתנועות הגוף בקרב קהל מאזינים, אנו נוטים להסתנכרן לביט זה באופן ספונטני וללא תלות בהכשרה המוסיקלית הפורמאלית, במגוון תגובות מוטוריות הנעות ממנוד ראש קל דרך הנעת הבהונות, תיפוף ועד לריקוד ממש. למעשה, כבר ב 1976 רוסיניול ומלוויל ג'ונס, Rossignol & Melvill Jones, (1976) מצאו שגם צלילים מוסיקאליים, אשר אינם חזקים עד כדי יצירת רפלקס בהלה, יכולים בכל זאת לגרום לחיזוק הפעולה המוטורית כאשר הם מסונכרנים איתה וזאת על ידי הגברת העירור של עצבים מוטוריים ספינאליים. מספר מחקרים התנהגותיים שבהם נבדקים התבקשו להקיש בתיאום עם גירוי אודיטורי קבוע שהוכנסו בו שינויי טמפו קלים (שינוי במשך מביט לביט) הראו שהנבדקים תקנו את התנועה מוטורית גם כאשר הם לא יכלו להבחין בשינויים באופן מודע (Thaut, Miller & Schauer, 1998). מעניין שבשלב הראשון התיקון התייחס למשך בין ביט לביט, ורק לאחריו בא גם תיקון של הפאזה לסנכרון מלא בין ההקשה לביט. המידע האודיטורי מספק אם כן למוח ובפרט למערכת המוטורית, מידע טמפורלי אפילו במצבים שמידע זה אינו נגיש באופן מודע. מן העבר השני, המערכת המוטורית משפיעה על החוויה האודיטורית. מבוגרים כמו גם תינוקות הראו העדפה למקצבים התואמים את התבנית המוטורית שלה הורגלו

(למשל תנועה בקצב ריקוד הוואלס) על פני מקצבים אחרים (Phillips-Silver & Trainor, 2005, 2007).

מחקרים של הדמיה מוחית מצביעים גם הם על קשר ישיר בין תנועה לבין מידע אודיטורי. במחקר חדש של הדמיה פונקציונאלית באמצעות תהודה מגנטית, צ'ן ושותפים הראו שאזורים מוטוריים במוח מגיבים גם במצבי האזנה פסיביים (ללא תגובה מוטורית נראית לעין) לתבניות קצביות בלתי מוכרות אפילו בקרב מאזינים ללא הכשרה מוסיקלית (Chen et al., 2008). הרשת העצבית המתעוררת נרחבת אף יותר אצל מוסיקאים כמו למשל פסנתרנים בשעה שהם מקשיבים לצלילי פסנתר שעבורם יש להם מיפוי בין צליל לתנועה (Bangert et al., 2006). מיפוי זה יכול להיווצר במהירות גדולה יחסית כבר לאחר חמישה ימים של תרגול על מקלדת כפי שהראו להב ושותפיו (Lahav et al., 2007). מעניין שהרשת המוחית המתעוררת בתגובה לצלילים כוללת את אזור ברוקה הן בקרב הפסנתרנים והן בקרב לא-מוסיקאים אשר תרגלו נגינה במקלדת, אולם אצל האחרונים, רק עבור צלילים אשר עבורם תורגל הקשר בין הצליל לתנועה. ייתכן שמעורבות אזור זה קשורה לבניית הרצף ובפרט ליצירת ניבויים, הגם אם לא מודעים, לגבי התנועה/הצליל הבאים ברצף.

באופן כללי, מחקרים המשווים את הפעילות המוחית בקרב מוסיקאים ולא מוסיקאים בעת ביצוע פעולות מוטוריות, מראים לעומת זאת, פעילות חלשה יותר או ממוקדת יותר בקרב מוסיקאים בקורטקס המוטורי הראשוני, כמו גם באזורים מוטוריים אסוציאטיביים -- ממצא שפורש כעדות לעיבוד יעיל או חסכוני יותר בקרב המוסיקאים (Jäncke et al., 2000; Meister et al., 2005). חשוב לציין שתהליך הלמידה עצמו המתרחש בזמן תרגול פעולה מוטורית פשוטה בתנאי מעבדה עלול להיות שונה במהותו מתהליך רכישת מיומנות מוטורית מורכבת כמו נגינה בכלי (Wulf & Shea, 2002), ולמעשה, אין בידינו עדיין הבנה טובה של המנגנונים המוחיים בבסיס התהליך של רכישת רצף מוטורי מורכב. סקאי למשל, (Sakai et al., 2004) מציע במודל שלו שרכישת המיומנות לייצר רצף מוטורי, תלויה ביכולת לקדד לא רק את הסדר של הרצף, אלא גם

את התזמון היחסי של התנועות – תהליך היוצר תבנית טמפורלית קצבית טיפוסית לרצף הנתון. הרצף מתארגן לתת-מקטעים של תנועה, המאפשרים הקטנת העומס הקוגניטיבי. תהליך זה מתבטא בהסטה של מוקד הפעילות המוחית מאזורים קוגניטיביים כגון (prefrontal cortex and pre-supplementary motor area) לאזורים הקשורים יותר להפקה המוטורית עצמה כגון (supplementary motor area and primary motor cortex).

תהליך זה יכול לעמוד לא רק בבסיס מטלות של הפקת מקצבים מוסיקליים אלא גם בבסיס מיומנויות מוטוריות מורכבות אחרות כגון כתיבה שבה האפיון הטמפורלי והמרחבי של הרצף התנועתי קשורים זה בזה לכדי ייצוג אחד (Viviani & Terzuolo, 1980). בהקשר זה מעניין לציין שבמחקר חדש שנערך על ידי בן-פזי ושותפיה (Ben-Pazi et al., 2007) בקרב ילדים בני 8-14 נמצא מתאם ברור בין איכות כתב-היד לבין לקות בהפקת מקצבים בהקשה. ממצאים אלה מעידים על קושי גלובאלי אצל ילדים אלה בעיבוד והפקה ריתמיים, כפי שכבר הוצע במקרה של ילדים דיסלקטים (Wolff, 2002; Overy et al., 2003), ומכאן שייתכן שתרגול כזה בהקשר מוסיקלי יוכל לשפר את התפקוד שלהם. למעשה, תרגול כזה מיושם באוכלוסיות קליניות מסוימות כגון ילדים עם שיתוק מוחי (Thaut et al., 1998); מבוגרים שעברו שבץ מוחי (Schneider et al., 2007); חולי פרקינסון (Rochester et al., 2005); ובחולים באפאזיית ברוקה (Schlaug et al., 2008).

למרות מיעוט המחקר בתחום זה בקרב ילדים בריאים, שני מחקרי אורך מצביעים על הפוטנציאל של הוראת נגינה לשיפור יכולות מוטוריות עדינות. קוסטה ג'יומי (Costa-Giomi, 2005) מצאה במחקרה שיפור בציונים של יכולות מוטוריות עדינות ומהירות תגובה בטסט של מיומנויות תנועה (Bruinsky-Oseretsky Motor Proficiency Test) וזאת לאחר שנתיים של לימוד נגינה בפסנתר. באופן דומה שלאוג וחבריו (Schlaug et al., 2005), מדווחים על שיפור במהירות ומיומנות בתנועה מוטורית עדינה (למשל הקשה באצבעות) כבר לאחר שנה אחת של נגינה בכלי ומחזקים את הממצא במחקר קורלציה נוסף המשווה ילדים עם 3-7 שנות נגינה לילדים שאינם

מנגנים בכלי נגינה (Forgeard et al., 2008). ממצאים אלה לצד הקשר ההדוק בין הפן הריתמי במוסיקה לבין המערכת המוטורית, מרמזים שהמשך המחקר בתחום זה עשוי להוביל בעתיד להבנה טובה יותר של לקויות במוטוריקה גסה ועדינה הקשורות לבניית הרצף המוטורי והפקתו, ובעקבות כך גם להניב תובנות על דרכי התערבות באמצעות מוסיקה, שעשויות להיות רלוונטיות גם למסגרת הבית-ספרית.

7. מוסיקה ואינטליגנציה

תופעות כמו ה Idiot Savant – שילוב של יכולת יוצאת דופן בתחום מסוים על רקע מגבלות קוגניטיביות קשות בתחומים אחרים, מעלות שאלות מעניינות על הקשר שבין כישרון מיוחד – כגון כישרון למוסיקה לבין אינטליגנציה כללית. ואכן, אחד התחומים הבולטים שבהם מתגלה סאבנטיזם הוא יכולת מוסיקלית. במקרים רבים מדובר על שילוב שבין אוטיזם לבין זיכרון מוסיקלי יוצא דופן (Treffert, 1988). מקרים אלה מרמזים לכאורה על הפרדה בין אינטליגנציה כללית לבין יכולת מוסיקלית ומציבים את ה"אינטליגנציה המוסיקלית" כסוג של אינטליגנציה נפרדת כפי שהציע למשל גארדנר (Gardner, 1993). יחד עם זאת, כדאי לשים לב לשת נקודות. ראשית, המושג "יכולת מוסיקלית" מקפל בתוכו מגוון מאוד רחב של יכולות אודיטוריות, מוטוריות ורגשיות, לצד משתני אישיות כלליים (מוטיבציה, התמדה, קשב, וכו'). היכולת הבולטת ביותר של הסאבנטיים המוסיקליים היא יכולת של זיכרון מוסיקלי ולא "כישרון מוסיקלי". רובם, גם ניחנים ביכולת מיוחדת הקרויה "שמיעה אבסולוטית" המאופיינת ביכולת לזהות צליל במנותק מהקשר בניגוד לסוג השמיעה הנפוץ יותר הקרוי "שמיעה יחסית" שבה המידע המשמעותי הוא היחס בין הצלילים ולא גובהם האבסולוטי. יכולת זו, אשר נראה שהיא נדירה מאוד בקרב בעלי חיים, היא זו שמאפשרת לנו לזהות מנגינה כ"אותה מנגינה" גם אם בכל פעם נשיר אותה החל מצליל אחר. שנית, גם אם קיימות יכולות מסוימות ייחודיות לתהליכים של עיבוד או הפקת מוסיקה, אין פירושו שלא ניתן למצוא קשר בין אינטליגנציה לבין תרגול מוסיקלי. השאלה

המעניינת, במידה ויימצא קשר כזה, היא כמובן, מה הגורם המתווך קשר כזה, והאם הוא ייחודי לפעילות המוסיקלית.

המחקר המקיף ביותר על הקשר בין מוסיקה ואינטליגנציה נערך על ידי גלן שלנברג ושותפיו (Schellenberg et al., 2006). המחקר בחן את הקשר בין מספר שנות התרגול המוסיקלי לבין אינטליגנציה כללית כפי שנמדדה במספר מדדים ובהם הציון ב WISC-III, ב- Kaufman Test of Academic Achievement והציונים בבית-הספר. במחקר השתתפו 147 ילדים בני 6-11 בעלי רמת הכשרה מוסיקלית שונה. לאחר סילוק השונות הנובעת ממשתני "רעש" כגון מצב סוציו-אקונומי, נמצא מתאם קטן אך משמעותי בין משך התרגול המוסיקלי לבין מדדי האינטליגנציה. מתאם זה כיסה את רוב מרכיבי הטסטים ולא התכנס ליכולת אחת או שתיים בולטות. לא נמצא מתאם בין מספר שנות התרגול המוסיקלי לבין יכולות אחרות חוץ-אקדמיות כגון יכולות חברתיות. באופן מעניין, חוגים ופעילויות חוץ אקדמיות אחרות לא נמצאו במתאם עם מדדי האינטליגנציה שדווחו כאן.

יחד עם זאת יש לסייג את הממצאים, כפי שגם כותבי המאמר עצמם מעידים, שכן המדגם כולל בהכרח רק ילדים אשר בחרו מרצונם ללמוד נגינה ולכן אינו מדגם מייצג. ייתכן למשל שילדים כאלה הם מראש בעלי מוטיבציה גבוהה יותר. גם לא ברור ממחקר כזה מה התרומה של המוסיקה לשיפור הנרשם. ייתכן ששיעורי המוסיקה אינם אלא הרחבה של ההוראה הבית-ספרית בתנאים טובים במיוחד של הוראה אישית. ייתכן גם ששיעורי המוסיקה מספקים מגוון התנסויות שאינם נמצא באותו צירוף בפעילויות אחרות ובכלל זה דרישות קשב גבוהות, קריאה, זיהוי תבניות, יכולת הפשטה, פעילות מוטורית מורכבת, לצד הבעה רגשית עשירה. כל אחד מן הגורמים האלה כשלעצמו או כולם ביחד יכולים לתרום לאפקט.

חשובים בהקשר זה ממצאים המעידים שהאזנה עם קשב ממוקד כפי שנדרש בזמן הנגינה עצמה מפעילה אזורים מרכזיים לשני משאבים קוגניטיביים מוגבלים החשובים ביותר להצלחה במטלות אקדמיות שונות: קשב וזיכרון עבודה. פטר ג'נטה וחבריו (Janata, Tillman, &

Bharucha, 2002) הראו שהאזנה ממוקדת למוסיקה, בפרט כאשר נדרש מעקב אחר צליל מטרה או מנגינת מטרה בתוך בליל של צלילים (מטלה הדומה באופייה ל Cocktail party effect מעוררת פעילות בטווח רחב של אזורים מוחיים באונות הפרונטאליות (Frontal Operculum BA44, Supplementary Motor Area BA6, & (Precentral Sulcus BA6/8 באונות הפריאטליות (Superior IPS-Intraparietal Sulcus, BA 7/39) ובאונות הטמפורליות (Temporal Gyrus, BA 41/42/22). עבודות אחרות מצביעות על המעורבות של אזורים הקשורים לזיכרון עבודה ובפרט באונה הפרונטאלית הימנית במטלות הקשורות לזיכרון אודיטורי (Zatorre, Evans & Meyer, 1994).

8. האם מוסיקת רקע עוזרת או מפריעה בביצוע מטלות קוגניטיביות?

כל אחד מאיתנו התנסה בחוויה של התמודדות עם מטלה קוגניטיבית כאשר ברקע מתנגנת מוסיקה כזו או אחרת. יחד עם זאת, בעוד יש כאלה שמוכנים להישבע שבלי מוסיקה כזו הם אינם יכולים להתרכז במטלה, אחרים מעידים שבנוכחות המוסיקה הם אינם מסוגלים לבצע. פליקס (Felix, 1993) סקרה מספר גדול של מחקרים אשר בדקו את הסוגיה הזו והגיעה למסקנה שבאופן כללי למוסיקת רקע יש השפעה מיטיבה על סביבת הלמידה, אולם השפעה זו תלויה בסוג המוסיקה המושמעת (ההשפעה המיטיבה הושגה בעיקר בנוכחות מוסיקת בארוק או קלאסית) ובמשימה שעומדת בפני הנבדקים. כך למשל, מוסיקה השפיעה לטובה על משך הזמן שבו תלמידים בגילאי 10-11 היו מעורבים באופן אקטיבי בלמידה במהלך שיעורי מדעים (Davidson & Powell, 1986). אולם השפעת המוסיקה במטלות של חישובים אריתמטיים (Vaughn) 2000; Hallam et al., 2002) או במטלות של הבנת הנקרא, לא תמיד הייתה חיובית. אפילו הממצא העקבי יחסית של שיפור ביכולת לזכור מילים שנלמדו בנוכחות מוסיקת רקע (Felix, 1993), נמצא לאחרונה מוגבל לקבוצה חלקית בלבד של נבדקים שהתבקשו ללמוד מילים בשפה זרה (de Groot, 2006). למעשה, נראה שיש חשיבות רבה להבדלים בינאישיים

באופן שהשפעת מוסיקת הרקע תלויה בהצלבה שבין רמת העוררות האינדיבידואלית לבין סוג המוסיקה – הן בקרב ילדים והן בקרב מתבגרים (Furnham & Strbac, 2002; Furnham & Stephenson, 2007) מספר מחקרים מצביעים על האפשרות שבעלי אופי מופנם מגיעים לביצועים טובים יותר כאשר רמת הגירוי הסביבתי נמוכה – דהיינו בהעדר מוסיקת רקע – עקב סף עוררות נמוך יותר מזה של בעלי אופי מוחצן, ולהפך. נראה אם כן שמוסיקת רקע אינה הגורם הישיר לשיפור בביצועים, ואם אפקט כזה קיים הרי שהוא מתווך על ידי רמת עוררות.

9. סיכום ומסקנות

בשנים האחרונות נוספו עשרות ואולי מאות מחקרי הדמיה הבוחנים היבטים שונים של התגובה המוחית במהלך פעילות מוסיקלית. חלק מעבודות אלה אף פורסמו בכתבי עת יוקרתיים כגון Nature-Neuroscience, דבר המעיד שמדובר לא רק בהגדלה משמעותית בכמות הפרסומים אלא גם באיכותם. למרות המידע שהולך ומצטבר על אזורי המוח המופעלים בעת האזנה למוסיקה כפעילות נפרדת או בקשריה עם פעולות קוגניטיביות אחרות כגון תפיסה מרחבית, זיכרון או שפה, היכולת להקיש מן הידע הקיים היום אל ההקשר המעשי של מסגרת בית-הספר מוגבלת. יש לזכור שרוב גדול של העבודות בוצע על סטודנטים בוגרים, בתנאי מעבדה שבהם הנבדק יושב, בדרך כלל בחדר מבודד ולא בסביבה רועשת מלאה בגירויים מסיחים, ובמקרים רבים הגירויים פשוטים יחסית – "דוגמיות מוסיקליות" יותר מאשר "מוסיקה". באופן לא מפתיע, אך לא תמיד מתאים להקשר הבית-ספרי, המחקרים מחפשים הכללות ומתעלמים מהבדלים בינאישיים (אבל ראה Gaab et al., 2006), מהבדלים הנובעים מהשלב ההתפתחותי (אבל ראה Overy et al., 2004), או מהבדלים מגדריים (אבל ראה Koelsch et al., 2003). בנושאים רבים הממצאים ממחקרים שונים לא מתיישבים זה עם זה בשל הבדלים בחומר המוסיקלי, מהלך הניסוי, או שיטות המדידה. בנוסף לכך, במחקרים רבים חסרה מסגרת תיאורטית המגדירה מה הם התהליכים הקוגניטיביים שבבסיס הפעילות המוסיקלית מחד,

והיכולת הקוגניטיבית שעליה מבקשים להשפיע מאידך. כתוצאה מכך המטלה ו/או החומר המוסיקלי שניתנים לנבדקים בניסוי או אופן התרגול לא תמיד מתאימים באמת לשאלה המחקרית, ותקפות הממצאים נפגמת.

כך למשל, סיכום הממצאים על הקשר בין מוסיקה לבין תפיסה מרחבית מעלה בצורה ברורה את החשיבות של אבחנה בין האזנה פסיבית לבין לימוד נגינה ובפרט תרגול קריאת תווים כגורם מתווך בקשר בין שני התחומים. הסיכום גם מצביע על כך שהתרומה של המוסיקה לתפיסה המרחבית לא בא לידי ביטוי במטלות פשוטות של זיהוי אובייקטים, אלא במטלות המחייבות מניפולציה על האובייקט הוויזואלי בזמן (למשל רוטציה). יש למקד באופן מדויק אף יותר מהו התהליך הספציפי בהאזנה למוסיקה האנלוגי למטלה זו: האם אנו מתייחסים למנגינות כ"אובייקטים" בסצנה האודיטורית? (למושג שטבע ברגמן auditory scene, ראה 1990 Bregman, ומבצעים עליהם אופרציות דומות לרוטציה מנטלית? ניתן לחשוב למשל שכאשר אנו מזיזים מנגינה בזמן (למשל כניסות עוקבות בקאנון), כאשר אנו מזיזים את נקודת ההתחלה של המנגינה לצליל התחלתי שונה (למשל קול שני), או אפילו מנגנים את אותה מנגינה אבל בתמונת ראי (בכל מקום שהצליל עולה הופכים אותו ליורד, כפי שמרבה לעשות באך למשל), אנחנו למעשה מבצעים על האובייקט המוסיקלי פעולה המחייבת אחזקתו בזיכרון העבודה תוך מניפולציה כלשהי על זהותו בדומה לרוטציה מנטלית. מסגרת תיאורטית מסוג זו המוצעת כאן, תאפשר בחינת השערות ממוקדות הרבה יותר מאלה שהוצגו ברוב העבודות שנעשו עד כה, תוך ניצול נכון של החומרים והמטלות המוסיקליות. בהקשר של ההשערות המוצגות כאן, למשל, כדאי לבקש מילדים להאזין ולשיר שירים בקאנון של 2-3 קולות, או לעקוב אחר מנגינה מסוימת בתוך פוגה (יצירה רב קולית שבה כל קול מתנהל פחות או יותר באופן עצמאי). ניתן גם לתרגל את הקשר שעבור רוב האנשים שלא לומדים מוסיקה הוא סמוי, בין גובה הצליל למיקומו במרחב על ידי מטלות שבהן מצירים את התנהלות המנגינה כעולה או יורדת. רק לאחר תרגול מסוג כזה

ניתן יהיה לבחון בצורה מושכלת יותר את הקשר בין התרגול המוסיקלי ליכולת המרחבית. גישה זו, תקפה כמובן לכל אחת מן היכולות הקוגניטיביות אותן רוצים להעצים בעזרת המוסיקה. הקשר ההדוק ביותר בין מוסיקה ליכולות קוגניטיביות אחרות נמצא לגבי היכולת הלשונית. גם כאן, חשוב להבחין ברמת העיבוד אותה רוצים להעצים: האם העיבוד האודיטורי של ממד הגובה? של שינויים אקוסטיים המתרחשים באופן מהיר? האם הזיכרון האודיטורי? או הרגישות לחוקיות של רצפים? בחלק מן התחומים כבר נמצאה עדות להעברה (transfer) מתחום המוסיקה לתחום הלשוני, כמו למשל לגבי זיהוי שינויים בקונטור הגובה של המשפט. נקודות השקה אחרות עדיין ממתינות למחקר שיוכיח בצורה ברורה יותר מהי התרומה של הפעילות המוסיקלית ליכולת הלשונית, ובפרט – האם תרומה זו ייחודית בהשוואה לצורות תרגול אחרות. כדאי לשים לב שמוסיקה עשויה לסייע לעיבוד לשוני מכוונים שונים וכל אחד מאלה דורש צורת תרגול וחומרים שונים. המוסיקה משלבת דרך מהנה לתרגול אודיטורי על הממדים השונים שבו, היא מהווה אמצעי מעולה להדגשת ותרגול הסגמנטציה ברצף האקוסטי (השוו למשל את החלוקה להברות במילה ירושלים כאשר היא מדוברת לעומת הופעתה בשיר "ירושלים של זהב") וגם מערכת סימבולית המועברת מן הכתב אל הצליל.

אולי המידע המעניין ביותר העולה מן הסקירה של האזורים המוחיים הפעילים בעת האזנה, או הפקה של מוסיקה בהשוואה לשפה הוא המידע על המעורבות הגדולה של אזור ברוקה כאזור מרכזי לשני התחומים וכאזור המבדיל בין מוחם של מוסיקאים ללא-מוסיקאים. יש מקום לבחון לאלו היבטים ספציפיים של פעילות האזור הזה, יכולה הפעילות המוסיקלית לתרום. ייתכן שהגורם המכריע הוא התהליך של יצירת מיפוי בין רצפים מוטוריים לאודיטוריים לבניית משמעות, שהוא תהליך קריטי הן לדיבור והן לנגינה. כפי שמראה המחקר של להב ושותפיו (2007), ניתן לייצר מיפוי כזה תוך זמן קצר יחסית, ובעזרת כלים מוסיקליים פשוטים כגון מקלדת של אורגנית או קסילופון. כדאי לזכור שאחד היתרונות המשמעותיים של מוסיקה בחיזוק הקשר שבין תפיסה לפעולה או בין שמיעה להפקה הוא בארגון הריתמי שלה שמאפשר סנכרון

של שתי המערכות זו לזו באמצעות הביט המוסיקלי - אולי על בסיס מנגנון של שעון או אוסילטור נירונלי פנימי. עדות יפה לכך ניתנה לאחרונה בעבודתה של אמילי ראשט שהראתה שיכולתם של אפאזים להגות מילים אינה שונה בשירים מוכרים לעומת מילים בפתגמים או תפילות, אך כן משתפרת כאשר החולה חוזר על המשפט ביחד עם הקלטה מדוברת, ומשתפרת אף יותר כאשר החולה שר עם ההקלטה של השיר (Racette, Bard, & Peretz, 2006).

למרות החשיבות הרבה במחקרים שתוארו כאן, יהיה זה שגוי להתעלם מן ההיבטים הנוספים של הפעילות המוסיקלית – שהם אולי, בסופו של דבר ההיבטים החשובים והמשפיעים ביותר שלה: כוחה הרגשי וכוחה החברתי. מוסיקה, יותר מכל פעילות אחרת מאפשרת ליכוד של הקבוצה שכן היא מאפשרת סנכרון של כל חברי הקבוצה לביט המוסיקלי ובאמצעותו – זה לזה. כך בשירי עבודה, כך במארשים צבאיים, כך בקונצרט רוק שבו אלפי חוגגים יכולים לשיר ולנוע יחד, וכך למעשה בכל ריקוד – מהריקודים השבטיים העתיקים ועד למסיבות טראנס. מוסיקה היא גם אמצעי פשוט, נייד, ובריא לאיזון מצב הרוח והעוררות. ולבסוף, מוסיקה היא אומנות המאפשרת מתן ביטוי ליצירתיות ולהבעה הרגשית הפרטית והאישית של כל אחד, ללא גבולות קשיחים של נכון, ראוי, והולם. יחד עם זאת, מצב המחקר היום עדיין לא מאפשר לנו להגדיר מה בדיוק עושה לנו המוסיקה בתחומים אלה. ולמרות שיש החושבים שטוב שכך, אין ספק שבשנים הקרובות גם תחומים אלה יכנסו באופן חזק יותר לתחומי המחקר ויש לקוות שיספקו לנו תובנות נוספות על ההשפעה של המוסיקה על גופו ומוחו של האדם.

- Bahr, N. & Christensen, C.A. (2000). Inter-domain transfer between mathematical skills and musicianship. *Journal of Structural Learning & Intelligent Systems*, 14(3), 187-197.
- Bamberger, J. & Disessa, A. (2003). Music as embodied mathematics: a study of a mutually informing affinity. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, 8(2), 123-160.
- Bangert, M., Peschel, T., Schlaug, G., Rotte, M., Drescher, D., Hinrichs, H., Heinze, H.J. & Altenmüller, E. (2006). Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: Evidence from fMRI conjunction. *Neuroimage*, 30, 917-926.
- Ben-Pazi, H., Kukke, S. & Sanger, T.D. (2007). Poor penmanship in children correlates with abnormal rhythmic tapping: a broad functional temporal impairment. *Journal of Child Neurology*, 22(5), 543-549.
- Bregman, A.S. (1990). *Auditory scene analysis*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Brown, S. (2000). The "musilanguage" model of music evolution. In N. L. Wallin, B. Merker, & S. Brown (Eds), *The Origins of Music*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 271-300.
- Brown, S., Martinez, M. J., & Parsons, L. M. (2006). Music and language side by side in the brain: A PET study of the generation of melodies and sentences. *European Journal of Neuroscience*, 23(10), 2791-2803.

- Butzlaff, R. (2000). Can music be used to teach reading? *Journal of Aesthetic Education*, 34, 167-178.
- Chen, J.L., Penhune, V.B. & Zatorre, R.J. (2008). Listening to musical rhythms recruits motor regions of the brain. *Cerebral Cortex*, advance access.
- Costa-Giomi, E. (1999). The effects of three years of piano instruction on children's cognitive development. *Journal of Research in Music Education*, 47(3), 198-212.
- Costa-Giomi, E. (2004). Effects of three years of piano instruction on children's academic achievement, school performance and self-esteem. *Psychology of Music*, 32(2), 139-152.
- Costa-Giomi, E. (2005). Does music instruction improve fine motor abilities? *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060, 262–264.
- Črnčec, R., Wilson, S. & Prior, M.(2006). The cognitive and academic benefits of music to children: facts and fiction. *Educational Psychology*, 26(4), 579-594.
- Davidson, C.W. & Powell, L.A. (1986). The effects of easy-listening background music on the on-task-performance of fifth grade children. *Journal of Educational Research*, 80(1), 29-33.
- De Groot, A.M.B. (2006). Effects of stimulus characteristics and background music on foreign language vocabulary learning and forgetting. *Language Learning*, 56(3), 463-506.

- Douglas, K. M., & Bilkey, D. K. (2007). Amusia is associated with deficits in spatial processing. *Nature Neuroscience*, 10(7), 915-921.
- Ehri, L. C., Nunes, S. R., Willows, D. M., Schuster, B. V., Yaghoub-Zadeh, Z., & Shanahan, T. (2001). Phonemic awareness instruction helps children learn to read: Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis. *Reading Research Quarterly*, 36, 250-287.
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., et al. (1995). Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science*, 270(5234), 305-307.
- Felix, U. (1993). The contribution of background music to the enhancement of learning in suggestopedia: A critical review of the literature. *Journal of the Society for Accelerative Learning and Teaching*, 18, 277–303.
- Forgeard, M., Schalug, G., Norton, A., Rosam, C., & Iyengar, U. (2008). The relation between music and phonological processing in normal-reading children and children with dyslexia. *Music Perception*, 25(4), 383-390.
- Forgeard, M., Winner, E., Norton, A., & Schlaug, G. (2008). Practicing a musical instrument in childhood is associated with enhanced verbal ability and nonverbal Reasoning. *PLOS One*, 3(10), 1-8.
- Foxton, J. M., Nandy, R. K & Griffiths, T. D. (2006). Rhythm deficits in “tone deafness”. *Brain and Cognition*, 62, 24–29.

- Fujioka, T., Ross, B., Kakigi, R., Pantev, Ch. & Trainor, L. J. (2006). One year of musical training affects development of auditory cortical-evoked fields in young children. *Brain*, 129, 2593–2608.
- Furnham, A. & Strbac, L. (2002). Music is as distracting as noise on the cognitive test performance of introverts and extraverts. *Ergonomics*, 45, 203–17.
- Furnham, A. & Stephenson, R. (2007). Musical distracters, personality type and cognitive performance in school children. *Psychology of Music*, 35(3), 403-420.
- Gaab, N., Tallal, P., Kim, H., Lakshminarayanan, K., Archie, J.J., Glover, G.H. & Gabrieli, J.D.E. (2005) Neural correlates of rapid spectro-temporal processing in musicians and nonmusicians. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060, 82-88.
- Gaab, N., Gaser, C., & Schlaug, G. (2006). Improvement-related functional plasticity following pitch memory training. *NeuroImage*, 31(1), 255-263.
- Gardiner, M.F., Fox, A., Knowles, F. & Jeffrey, D. (1996). Learning improved by arts training. *Nature*, 381, 284.
- Gardner, H. (1993). *The Theory of Multiple Intelligences*. New York: Basic Books.
- Hallam, S., Price, J., & Katsarou, G. (2002). The effects of background music on primary school pupils' task performance. *Educational Studies*, 28, 111–122.
- Haslam, C., & Cook, M. (2002). Striking a chord with amnesic patients: Evidence that song facilitates memory. *Neurocase*, 8, 453-465.

- Ho, Y. C., Cheung, M. C., & Chan, A. S. (2003). Music training improves verbal but not visual memory: Cross-sectional and longitudinal explorations in children. *Neuropsychology*, 17(3), 439-450.
- Inbar, E. (2002). Emotional expression in speech and music. Unpublished Ph.D. dissertation, the Hebrew University of Jerusalem [in Hebrew].
- Ivanov, V. K., & Geake, J. G. (2003). The Mozart effect and primary school children. *Psychology of Music*, 31, 405-413.
- Janata, P., Tillmann, B., & Bharucha, J. J. (2002). Listening to polyphonic music recruits domain-general attention and working memory circuits. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 2(2), 121-140.
- Jäncke, L., Shah, N.J. & Peters, M. (2000). Cortical activations in primary and secondary motor areas for complex bimanual movements in professional pianists. *Brain Research Cognitive Brain Research*, 10, 177–183.
- Kilgour, A. R., Jakobson, L. S., & Cuddy, L. L. (2000). Music training and rate of presentation as mediators of text and song recall. *Memory and Cognition*, 28(5), 700-710.
- Koelsch, S., Gunter, T., Friederici, A.D., Schröger, E. (2000). Brain indices of music processing: "Nonmusicians" are musical. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(3) 520-541.
- Koelsch, S., Grossman, T., Gunter Th.C., Hahne A., Schroger, E., & Friederici, A. (2003). Children processing music: Electric brain responses reveal musical competence and gender differences. *Journal of Cognitive Science*, 15(5), 683-693.

- Lahav, A., Saltzman, E. & Schlaug, G. (2007). Action representation of sound: audiomotor recognition network while listening to newly acquired actions. *The Journal of Neuroscience*, 27(2), 308-314.
- Lee, Y., Lu, M., Ko, H. (2007). Effects of skill training on working memory capacity. *Learning and Instruction*, 17(3), 336-344.
- Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T.C. & Friederici, A.D. (2001). Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. *Nature Neuroscience*, 4, 540–545.
- Magne, C., Schön, D. & Besson, M. (2006). Musician children detect pitch violations in both music and language better than nonmusician children: behavioral and electrophysiological approaches. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 199-211.
- Marques, C., Moreno, S., Castro S. L., & Besson, M. (2007). Musicians detect pitch violations in foreign language better than nonmusicians: Behavioral and electrophysiological evidence, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(9), 1453-1463
- McMullen & Saffran (2004). Music and Language: A developmental comparison. *Music Perception*, 21(3), 289-311.
- Meister, I. Krings, T., Foltys, H., Boroojerdi, B., Müller, M., Töpper, R. & Thron, A. (2005). Effects of long-term practice and task complexity in musicians and nonmusicians performing simple and complex motor tasks: Implications for cortical motor organization. *Human Brain Mapping*, 25(3), 345 – 352.

- Milovanov, R., Huotilainen, M. Välimäki, V., Paulo A.A. Esquef, P. A. & Tervaniemi, M. (2008). Musical aptitude and second language pronunciation skills in school-aged children: Neural and behavioral evidence. *Brain Research*, 1194, 81-89.
- Nakada, T., Fujii, Y., Suzuki, K., Kwee, I.L. (1998). 'Musical brain' revealed by high-field (3 Tesla) functional MRI. *Neuroreport*, 9(17), 3853-3856.
- Nantais, K. M. and Schellenberg, E. G. (1999). The Mozart Effect: an artifact of preference, *Psychological Science* 10(4): 370–3.
- Norton, A., Winner, E. Cronin, K., Overy, K., Lee, D. J., & Schlaug, G. (2005). Are there pre-existing neural, cognitive, or motoric markers for musical ability? *Brain and Cognition*, 59(2), 124-134.
- Overy, K. (2003). Dyslexia and music. From timing deficits to musical intervention. *Annals of the New York Academy of Science*, 999, 497-505.
- Overy, K., Nicolson, R., Fawcett, A. J., & Clarke, E. F. (2003). Dyslexia and Music: Measuring Musical Timing Skills. *Dyslexia: An International Journal of Research and Practice*, 9(1), 18-36.
- Overy, K., Norton, A. C., Cronin, K. T., Gaab, N., Alsop, D. C., Winner E., et al., (2004). Imaging melody and rhythm processing in young children. *Neuroreport*, 15(2), 1723-1726.
- Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L. E., & Hoke, M. (1998). Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature*, 392(6678), 811-814.

- Phillips-Silver, J. & Trainor, L.J. (2005). Feeling the beat: movement influences infant rhythm perception. *Science*, 308, 1430.
- Phillips-Silver, J. & Trainor, L.J. (2007). Hearing what the body feels: auditory encoding of rhythmic movement. *Cognition*, 105, 533-546.
- Pinker, S. (1997). *How the mind works*. New York: W. W. Norton.
- Racette, A., Bard, C., & Peretz, I. (2006). Making non-fluent aphasics speak: sing along! *Brain*, 129(10), 2571-2584.
- Rauscher, F. H., Shaw, G. L., & Ky, K. N. (1993). Music and spatial task performance. *Nature*, 365, 611.
- Rauscher, F.H., Shaw, G.L., Levine, L.J., Wright, E.L., Dennis, W.R. & Newcomb, R.L. (1997). Music training causes long-term enhancement of preschool children's spatial-temporal reasoning. *Neurological Research*, 19, 2-8.
- Rauscher, F. H., & Shaw, G. L. (1998). Key components of the "Mozart Effect". *Perceptual and Motor Skills*, 86, 835-841.
- Rochester, L., Hetherington, V., Jones, D., Nieuwboer, A., Willems, A.M., Kwakkel, G. & Van Wegen, E. (2005). The effect of external rhythmic cues (auditory and visual) on walking during a functional task in homes of people with parkinson's disease. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86, 999-1006.

- Rossignol, S. & Melvill Jones, G. (1976). Audio-spinal influences in man studied by the H-reflex and its possible role in rhythmic movements synchronized to sound. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 41, 83-92.
- Rusconi, E., Kwan, B., Fiordano, B. L., Umita, C., & Butterworth, B. (2006). Spatial representation of pitch height: the SMARC effect. *Cognition*, 99, 113-129.
- Sakai, K., Hikosaka, O. & Nakamura, K. (2004). Emergence of rhythm during motor learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(12), 547-553.
- Schellenberg, E. G., & Nakata, T. Y., Hunter, P. G., & Tamoto, S. (2007). Exposure to music and cognitive performance: tests of children and adults. *Psychology of Music*, 35(1), 5-19.
- Schellenberg, E. G. (2006). Long-term positive associations between music lessons and IQ. *Journal of Educational Psychology*, 98(2), 457-468.
- Schlaug, G., Jancke, L., Huang, Y., Staiger, J. F., et-al. (1995). Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia*, 33(8), 1047-1055.
- Schlaug, G., Norton, A., Overy, K., & Winner, E. (2005). Effects of music training on the child's brain and cognitive development. *Annals of the New York Academy of Science*, 1060, 219-230.
- Schlaug, G., & Bangert, M. (2007). Neural correlates of music learning and understanding. In W. Gruhn & F. Rauscher (Eds.). *Neuroscience and Music Pedagogy*, New York: Nova Biomedical Books, pp, 101-120.

- Schlaug, G., Marchina, S. & Norton, A. (2008). From singing to speaking: why singing may lead to recovery of expressive language function in patients with Broca's aphasia. *Music Perception*, 25(4), 315–323.
- Schmithorst, V.J. & Holland, S.K. (2004). The effect of musical training on the neural correlates of math processing: a functional magnetic resonance imaging study in humans. *Neuroscience Letters*, 354, 193–196.
- Schneider, P., Scherg, M., Dosch, H. G., Specht, H. J., Gutschalk, A., & Rupp, A. (2002). Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nature Neuroscience*, 5(7), 688-694.
- Schneider, S., Schönle, P.W., Altenmüller, E. & Münte, T.F. (2007). Using musical instruments to improve motor skill recovery following a stroke. *Journal of Neurology*, 254(10), 1339-1346.
- Schön, D., Anton, J. L., Roth, M., & Besson, M. (2002). An fMRI study of music sight-reading. *Neuroreport*, 13/7, 2285-2289.
- Schön, D., Cyrille, M., & Besson, M. (2004). The music of speech: Music training facilitates pitch processing in both music and language. *Psychophysiology*, 41(3), 341-349.
- Schön, D., Boyer, M., Moreno, S., Besson, M., Peretz, I., & Kolinsky R. (2008). Songs as an aid for language acquisition. *Cognition*, 106, 975-983.
- Slevc, L. R., & Miyake, A. (2006). Individual differences in second language proficiency: does musical ability matter? *Psychological Science*, 17, 675–681.

- Sluming, V., Barrick, T., Howard, M., Cezaerirli, E., Mayes, A., & Roberts, N. (2002). Voxel-based morphometry reveals increased gray matter density in Broca's area in male symphony orchestra musicians. *Neuroimage*, 17, 1613–1622.
- Sluming, V., Brooks, J., Howard, M., Downes, J. J., & Roberts, N. (2007). Broca's area supports enhanced visuospatial cognition in orchestral musicians. *The Journal of Neuroscience*, 27(14), 3799-3806.
- Steinbeis, N., & Koelsch, S. (2008). Shared neural resources between music and language indicate semantic processing of musical tension-resolution patterns. *Cerebral Cortex*, 18, 1169-78.
- Tallal, P., & Gaab, N. (2006). Dynamic auditory processing, music experience and language development, *Trends in Neurosciences*, 29, 382-389.
- Thaut, M.H., Miller, R.A. & Schauer, L.M. (1998). Multiple synchronization strategies in rhythmic sensorimotor tasks: phase vs period correction. *Biological Cybernetics*, 79(3), 241-250.
- Thaut, M. H., Hurt, C. P., Dragan, D., & McIntosh, G. C. (1998). Rhythmic entrainment of gait patterns in children with cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 40(78), 15.
- Thaut, M. H., Peterson, D. A., Sena, K. M., & McIntosh, G. C. (2008). Musical structure facilitates verbal learning in multiple sclerosis. *Music Perception*, 25(4), 325-330.
- Thompson, W. F., Schellenberg, E. G., & Husain, G. (2004). Decoding Speech Prosody: Do Music Lessons Help? *Emotion*, 4(1), 46-64.

- Thorndike, R. L., Hagen, E. P. & Sattler, J. M. (1986) *The Stanford-Binet Scale of Intelligence*. Chicago: Riverside.
- Trainor, L., & Trehub, S. (1992). A comparison of infants' and adults' sensitivity to Western musical structure. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance*, 18(2), 394-402.
- Treffert, D. A. (1988) The Idiot Savant: A Review of the Syndrome. *American Journal of Psychiatry*, 145, 563-572.
- Vaughn, K. (2000). Music and mathematics: Modest support for the oft claimed relationship. *Journal of Aesthetic Education*, 34, 149–166.
- Viviani, P. & Terzuolo, C. (1980). Space-time invariance in learned motor skills. In G. E. Stelmach, & J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior II*, Amsterdam: Elsevier Science Pubs., pp. 525–533.
- Wolff, P. (2002). Timing precision and rhythm in developmental dyslexia. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 15, 179–206.
- Wong, P. C. M., Skoel, E., Russo, N. M., Dees, T., & Kraus, N. (2007). Musical experience shapes human brainstem encoding of linguistic pitch patterns. *Nature Neuroscience*, 10/4, 420-422.
- Wulf, G. & Shea, C. H. (2002). Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(2), 185-211.
- Zatorre, R. J., Evans, A. C., & Meyer, E. (1994). Neural mechanisms underlying melodic perception and memory for pitch. *Journal of Neuroscience*, 14, 1908-1919.

שינה ולמידה

אבי שדה, מרכז אדלר לחקר ההתפתחות והפסיכופתולוגיה של הילד, החוג לפסיכולוגיה,

אוניברסיטת ת"א

הקשרים בין השינה לבין הלמידה הם מורכבים ודו כיווניים. השינה משפיעה על תהליכי למידה ויכולות הקשורות ללמידה, ובכיוון ההפוך, תהליכי למידה משפיעים על מאפייני השינה ותהליכים המתרחשים בשינה. מאמר זה סוקר את המאפיינים של השינה והתפתחות השינה, את המרכיבים החשובים בתפקודים הנירופסיכולוגיים הקשורים ללמידה ואת קשרי הגומלין בין השינה לבין הלמידה.

התפתחות השינה ומאפייני השינה המשמעותיים

התינוק היילוד מבלה כשני שלישי מהיממה בשינה. הוא עושה זאת באפיזודות קצרות המפוזרות על פני כל היממה. במהלך החודשים הראשונים לחיים, חל תהליך מהיר של התרכזות השינה לתקופת שינה עיקרית בלילה תוך כדי צמצום דרמטי של השינה במהלך שעות היום. תהליך זה של התרכזות השינה בלילה והפיכתה לשינה רציפה יחסית למשך זמן ארוך מבוקר על ידי מנגנונים מוחיים הקשורים לקליטת האינפורמציה הסביבתית של שעות האור והחושך ועל ידי מנגנונים סביבתיים ובהם השפעת ההורים ועידוד התינוק לישון בלילה ברציפות. תהליך זה של התגבשות השינה הלילית הוא תהליך מהיר ודרמטי אבל לעתים קרובות אינו עובר בצורה חלקה ועקב כך תינוקות וילדים רבים סובלים מיקיצות רבות ו/או ממושכות בלילה שמהוות את בעיית השינה הנפוצה ביותר בילדות. מחקרים שונים מצביעים על כך ש- 20-30% מכלל הילדים סובלים מבעיות אלה בשנים הראשונות.

התגבשות השינה הלילית היא תהליך מרשים שקל לצפות בו. אבל בצורה סמויה מתרחשת דרמה נוספת הקשורה לשלבי השינה. בשנות החמישים גילו החוקרים אשרינסקי

וקלייטמן שהשינה אינה תהליך אחיד השונה אך ורק ממצב הערות, אלא שבשינה עצמה ישנם שלבים שונים החוזרים על עצמם במחזוריות במהלך השינה (Aserinsky & Kleitman, 1953). גילוי מיוחד זה של תנועות העיניים המהירות בשינה (Rapid Eye Movements / REM sleep) הוביל לכך שהשינה הפכה לנושא למחקר מדעי פורה ביותר, כאשר הסתבר ששנת ה-REM קשורה לחלימה. כלומר, כאשר מעירים בני אדם במצב שינה זה הם ברוב המקרים מדווחים על חלום לעומת מעט דיווחים בשלבי שינה אחרים. בנוסף הסתבר במחקרים מאוחרים יותר, שהמוח פעיל ביותר בשלב זה של השינה ולעתים אפילו פעיל יותר מאשר בערות.

מסתבר שגם בנושא של שנת החלום מתרחשת דרמה התפתחותית מעניינת. כשתינוקות נולדים הם מבליים כ-50% מזמנם בשנת חלום (כשמונה שעות ביממה) ובמהלך השנים הראשונות כמות שנת החלום הולכת ומצטמקת בהדרגה. תהליך זה עורר גם הוא שאלות לגבי התפקיד של שנת החלום ומדוע שלב שינה זה בולט כל כך בינקות?

מחקרים בבעלי חיים שונים הראו שכמעט ללא יוצא מן הכלל, ניתן לזהות את מאפייני שנת החלום אצל כל היונקים שנחקרו. הסתבר גם שאחוז הזמן שהיילוד של סוג כזה או אחר של בעל חיים מבלה בשנת החלום הוא במתאם כמעט מושלם עם גודלו היחסי של המוח שלו בלידה. כך למשל, התינוק האנושי שנולד עם כ-30% מגודל המוח בבגרות מבלה כ-50% משנתו בשנת חלום ולעומת זאת היונקים שנולדים עם מוח בשל יחסית מבליים אחוז קטן מאד משנתם בשנת החלום. לטענת החוקרים הדבר מצביע על כך שהפעילות המוגברת של המוח בזמן שנת החלום היא חיונית להיווצרות של נוירונים חדשים, וליצירת קשרים בין נוירונים והבשלה של המוח ולכן היא כל כך בולטת אצל התינוק האנושי בתחילת הדרך ומצטמצמת במהירות כאשר המוח של התינוק מבשיל במהירות במהלך ההתפתחות המוקדמת.

למידה, זיכרון ושינה

כל תהליך למידה משמעותי כרוך בעיבוד אינפורמציה ואכסוניה בזיכרון לטווח ארוך, על מנת שתהיה זמינה לשליפה לתפקוד עתידי. חקר השינה הוביל בעשורים הראשונים למסקנות מעניינות ביותר לגבי התפקיד של שנת החלום בזיכרון האנושי. הסתבר שכאשר מונעים מבעלי חיים או מבני אדם באופן סלקטיבי את שנת החלום (לעומת מניעת שלבים אחרים של שינה), לאחר תהליך למידה כלשהו הם זוכרים פחות טוב את החומר הנלמד או מבצעים פחות טוב מטלה שלמדו לבצע לפני השינה. (Karni, Tanne, Rubenstein, Askenasy, & Sagi, 1994;) (Stickgold & Walker, 2007). במשך העשורים האחרונים התברר שככל הנראה גם לשלבים אחרים של השינה יש תפקיד בהתגבשות הזיכרון, השפעת השלבים השונים של השינה תלויה בסוג הזיכרון (למשל, זיכרון פרוצדוראלי לעומת זיכרון דקלרטיבי) ובשלב של התגבשות הזיכרון שבו מדובר (Smith, 2001; Stickgold & Walker, 2007). מבלי להיכנס לעומק המחקר המורכב בתחום ולממצאים הרבים, לפעמים סותרים, שנמצאו בו, ניתן להסיק שלשינה על שלביה השונים יש חשיבות גודלה בהתגבשות הזיכרון, למרות שעדיין יש כאלה החולקים על קביעה זו ומציעים הסברים אחרים (Frank & Benington, 2006; Rial *et al.*, 2007;) (Stickgold & Walker, 2005).

בנוסף לעדויות על התרומה של השינה בכלל ושנת החלום בפרט ללמידה וזיכרון, בשנים האחרונות הצטברו עדויות לכך שהמוח ממשיך לעבד בשנת החלום את האינפורמציה החדשה שהוא קולט בשעות הערות. כך למשל, נמצא שאזורי מוח שפעילים במיוחד בזמן למידת מטלה חדשה, חוזרים להיות פעילים כאשר האדם נכנס לשנת חלום וכן שיש קשר בין הפעילות המוחית בשנת החלום לבין רמת הלמידה (Maquet *et al.*, 2000; Peigneux *et al.*, 2003).

שינה, חסך שינה, ערנות ולמידה

בנוסף לתהליכי עיבוד האינפורמציה ושימורה המתרחשים במהלך השינה, לשינה השפעה דרמטית על רמת הערנות ויכולות הקשב, הריכוז והתפקוד של האדם במהלך הערות. הקשר בין שינה וערנות ותפקוד יכול לנבוע משני מקורות עיקריים: (א) איכות שינה ירודה או הפרעות שינה שפוגעות בערך המרענן של השינה ועקב כך נפגעת הערנות והתפקודים הקשורים; (ב) שינה לא מספקת או חסך שינה פוגעים גם הם ברמת הערנות של האדם ועקב כך נפגעים תפקודי הקשב והלמידה.

מחקרים על הקשר שבין שינה ותפקודי קשב, למידה והישגים אקדמיים

במשך העשורים האחרונים התפרסמו עשרות מחקרים המצביעים על קשר שבין שינה לבין תפקודי קשב, למידה והישגים אקדמיים (Curcio, Ferrara, & De Gennaro, 2006). מחקרים אלה מצביעים בצורה גורפת ששינה לא מספקת בכמותה או באיכותה קשורה הדוקות לתפקוד ירוד בתפקודים נוירו-פסיכולוגיים של קשב, למידה, ולהישגים אקדמיים ירודים. חלק גדול מהמחקרים התבססו על סקרים ושאלונים בלבד והפגינו קשרים הדוקים בין שינה ותפקודי למידה (Bruni *et al.*, 2006; Epstein, Chillag, & Lavie, 1998; Meijer, Habekoth, & van den Wittenboer, 2000; Meijer & van den Wittenboer, 2004; Quach, Hiscock, Canterford, & Wake, 2009; Ravid, Afek, Suraiya, Shahar, & Pillar, 2009; Wolfson & Carskadon, 1998). כך למשל, במחקר של Wolfson ושותפיה, נמצא שתלמידי תיכון שדירגו את עצמם כבעלי ציונים נמוכים בבית הספר, דיווחו גם על זמן הליכה לשינה מאוחר יותר, פחות זמן שינה, וכן על חוסר יציבות בדפוסי השינה שלהם (Wolfson & Carskadon, 1998). במחקר של רביד ושותפיו נמצא שילדים שלא נמצאו מתאימים לעלות מהגן לכיתה א' היו מאופיינים בשינה יותר קצרה ואיכות שינה ירודה שהתבטאה ביקיצות מרובות ויעילות שינה נמוכה (Ravid *et al.*, 2009).

בשנים האחרונות בוצעו גם מחקרים רבים שבחנו במדדים אובייקטיביים יותר את השינה ואת תפקודי הקשב והלמידה בילדים (Gradisar, Buckhalt, El-Sheikh, & Keller, 2007; Sadeh, Gruber, & Raviv, 2002; Terrill, Johnston, & Douglas, 2008). כך למשל, במחקרנו בילדים בגיל ביה"ס מצאנו שאיכות שינה ירודה של הילדים (כפי שהתבטאה ביקצות מרובות על פי רישומי שינה אובייקטיביים) הייתה קשורה הדוקות לתפקודי קשב ולמידה ירודים כפי שנמדדו במטלות של קשב מתמשך ומטלות זיכרון (Sadeh et al., 2002).

חשוב לציין שמחקרים גם הצביעו על קשר בין שינה ותפקודי למידה וכישורים פסיכו-מוטוריים אצל תינוקות וילדים צעירים מאד (Gertner, Freudigman & Thoman, 1993; Scher, 2005; Greenbaum, Sadeh, Dolfen, Sirota, & Ben-Nun, 2002). מחקרים אלה הצביעו שדפוסי השינה המוקדמים של התינוק מנבאים את יכולותיו המנטאליות והמוטוריות כפי שבאות לידי ביטוי במבחנים המותאמים לגילאים הצעירים.

חשוב לציין שמחקרים קורלטיביים אלה לא מצביעים על קשר סיבתי ולא ניתן להסיק באופן חד משמעי שהשינה הירודה פוגעת בתפקודי הלמידה. בהחלט ייתכן שבמחקרים רבים הקשר עשוי לייצג קשר אחר כגון שפגיעה נורואנטומית פוגעת גם בדפוסי השינה וגם בתפקודים נורופסיכולוגיים אחרים. לצורך בחינת הקשר הסיבתי יש לבחון את הנושא באופן ניסויי נשלט, דבר שמתבצע במחקרי חסך והגבלת השינה שמתוארים בהמשך.

מחקרי ניסוי בחסך שינה

אחת הדרכים הבסיסיות לחקור את תפקיד השינה היא באמצעות מחקרים על חסך שינה או הגבלת השינה (Sleep deprivation / restriction), שבהם בוחנים את ההשלכות של חסך שינה על תפקודים קוגניטיביים והתנהגותיים אחרים. עשרות מחקרים של חסך שינה נעשו עם נבדקים בוגרים (Durmer & Dinges, 2005; Pilcher & Huffcutt, 1996). תוצאות המחקרים המרובים מצביעים על כך שלחסך שינה יש השפעה דרמטית שלילית על תפקוד קוגניטיבי של

הנבדקים, ונבדקים חסוכי שינה מתפקדים באזור האחוזון התשיעי (9%) של נבדקים שאינם חסוכי שינה. מסקנה נוספת שנבעה מהמחקרים הרבים בתחום היא שהתפקודים הקוגניטיביים שנפגעים מחסך שינה הם התפקודים הגבוהים יותר שקשורים לתפקודים ניהוליים (Executive functions), ומבחינה אנטומית מקושרים יותר לאזורים המוחיים הפרה-פרונטאליים (Dahl, 1996; Durmer & Dinges, 2005; Harrison & Horne, 1998; Harrison, Horne, & Rothwell, 2000; Horne, 1993).

מחקרים בהגבלת שינה במבוגרים (sleep restriction) מצביעים על קשר ישיר בין רמת חסך השינה המצטברת לבין הירידה בתפקודי הקשב והלמידה. כך למשל, במחקר שבו הוגבלה שנתם של נבדקים בוגרים לכ-4-5 שעות בלילה למשך שבועה ימים נמצאה ירידה מתמשכת ומצטברת בתפקודי הקשב של הנבדקים (Dinges et al., 1997). ירידה זו תוקנה רק לאחר לילות של שינה ארוכה ומפצה על חסך השינה המצטבר.

בילדים נערכו רק מחקרים בודדים של חסך או הגבלת שינה (Carskadon, Harvey, & Dement, 1981a, 1981b; Copes & Rosentswieg, 1972; Fallone, Acebo, Arnedt, Seifer, & Carskadon, 2001; Randazzo, Muehlbach, Schweitzer, & Walsh, 1998; Sadeh, Gruber, & Raviv, 2003). המחקרים בילדים הם בעייתיים מאחר וקשה לבצע מחקר על חסך שינה קיצוני בילדים מסיבות אתיות ומעשיות. עקב כך רוב המחקרים בחנו את ההשלכות של הגבלת שינה. חלק מהמחקרים לא מצאו תוצאות ברורות, אך שני מחקרים שנערכו לאחרונה הצביעו שגם אצל ילדים יש פגיעה משמעותית בתפקודים ניהוליים ותפקודי קשב ולמידה בעקבות הגבלת שינה (Randazzo et al., 1998; Sadeh et al., 2003). במחקר שבו בדקנו את ההשלכות של חסך שינה מינימאלי, של פחות משעה, למשך שלושה לילות עוקבים מצאנו השלכות דרמטיות על תפקודי הקשב והלמידה של הילדים (Sadeh et al., 2003). במחקר נבחנו דפוסי השינה של הילדים באמצעות שעונים שמודדים תנועות גוף שמתורגמות למדדים של שינה וערות. במקביל, נבדקו תפקודי הקשב והריכוז שלהם בתנאי

הבסיס באמצעות מערכת מבחנים ממוחשבים של קשב, זיכרון ולמידה. לאחר מכן חצי מהילדים התבקשו ללכת לישון שעה יותר מוקדם למשך שלושה לילות עוקבים וחצי מהילדים התבקשו ללכת לישון שעה יותר מאוחר. בפועל, בעקבות ההתערבות, הילדים קיצרו או האריכו את שנתם בארבעים דקות בערך. תפקודם נבחן שוב לאחר שלושת ימי ההתערבות ונמצאה ירידה דרמטית בתפקודי של הילדים שצמצמו את שנתם לעומת אלה שהאריכו אותה. הירידה הייתה כל כך דרמטית שהיא הייתה שקולה לשנתיים של הבשלה והתפתחות. חשוב לציין שלא נמצאה פגיעה במטלות מוטוריות פשוטות כגון מהירות הקשה רציפה. תוצאות המחקר הצביעו על כך שאפילו שינויים מתונים בדפוסי השינה של הילדים (כגון להישאר ער שנה נוספת בלילה לצפות בתוכנית טלביזיה נוספת או לגלוש באינטרנט) יכולים באופן מצטבר לפגוע קשה מאד בתפקודי קשב, זיכרון ולמידה שמנבאים הצלחה בלימודים בבית הספר.

במחקר של Randazzo ושותפיה, נבדקו ההשלכות של הגבלת זמן השינה של ילדים לחמש שעות בלילה אחד לעומת ילדים שבילו 11 שעות במיטה באותו לילה. החוקרים מצאו פגיעה משמעותית בתפקוד במטלות של יצירתיות מילולית, ובמטלה של גמישות קוגניטיבית (Wisconsin Card Sorting Test), החוקרים לא מצאו פגיעה במטלות קוגניטיביות פשוטות יותר והסיקו, בדומה למסקנות מחקרי המבוגרים, שתפקודים גבוהים יותר שדורשים חשיבה אבסטרקטית ויצירתיות רגישים יותר לחסך שינה בילדים.

מחקר נוסף שבחן את ההשלכות של הגבלת שינה (לארבע שעות) על ילדים לעומת שינה אופטימאלית של הילדים, מצא שלאחר הגבלת השינה הילדים היו יותר עייפים ופחות קשובים אך לא נמצאו ממצאים במבחנים של קשב ועיכוב תגובה (Fallone et al., 2001). נראה אם כך, שבמחקר בחסך שינה יש חשיבות למתודולוגיה של המחקר וסוג המטלות שנבחנו ורגישותן לחסך שינה. יחד עם זאת, המחקרים המודרניים על חסך שינה בילדים מצביעים על ממצאים דומים לאלה שהתקבלו במחקרים הרבים שבוצעו עם נבדקים בוגרים.

שינה ולמידה במדגמים קליניים

הפרעות נשימה בשינה הן הפרעות שכיחות בילדות עקב חסימות בדרכי הנשימה עקב שקדים או אדנואידים מוגדלים או פגמים אנטומיים אחרים. הפרעות נשימה בשינה עלולות לפגוע קשות באיכות השינה של הסובל מהן והשינה הופכת לשטחית ולא מרעננת. מחקרים קליניים רבים הראו שילדים הסובלים מהפרעות נשימה בשינה סובלים גם מפגיעה משמעותית בתפקודי קשב ולמידה (Ali, Pitson, & Stradling, 1993; Beebe, 2006; Blunden, Lushington, & Kennedy, 2001; Gozal, 1998, 2008; Gozal & Pope, 2001; O'Brien & Gozal, 2004). ההשלכות השליליות של הפרעות נשימה על התפקוד הן אפילו כאשר מדובר בנחירות בלבד ללא הפרעות קשות המתבטאות גם בדום נשימה בשינה. באחד המחקרים נמצא שההישגים האקדמיים של ילדים שסובלים מהפרעות נשימה בשינה ירודים יחסית לילדי ביקורת שלא סובלים מהפרעות שינה. כאשר ילדים אלה טופלו באמצעות ניתוח שנועד לפתוח את דרכי הנשימה החסומות הישגיהם הלימודיים השתפרו משמעותית (Gozal, 1998).

אם בוחנים את הנושא מזווית אחרת, שלפיה בוחנים את נושא השינה במדגמים קליניים של ילדים עם ליקויי למידה וילדים המאובחנים כהפרעת קשב, ריכוז והיפראקטיביות (ADHD), מגלים גם כן קשרים הדוקים בין התחומים. נושא ה-ADHD יתואר בפירוט בהמשך -- אבל בהקשר של ליקויי למידה האחרים, מחקרים הצביעו על דפוסי שינה מובחנים של ילדים הסובלים מליקויי למידה (Mercier, Pivik, & Busby, 1993; Quine, 1992). דפוסי השינה אופיינו בבעיות משמעותיות באיכות השינה ושינוי משמעותי בשלבי השינה (יותר שינה בשלב 4 העמוק של השינה ופחות שנת חלום), שאופייני לחסך שינה מתמשך.

שינה, הפרעות קשב וריכוז ו-ADHD

בספרות המדעית והקלינית דווח במשך שנים קשר הדוק בין הפרעות שינה ו-ADHD בילדים. על פי דיווחי ההורים, ילדים עם ADHD סובלים משכיחות גבוהה יותר של הפרעות שינה לעומת

ילדים ללא ADHD (Ball & Koloian, 1995; Cohen-Zion & Ancoli-Israel, 2004;)
(Corkum, Tannock, & Moldofsky, 1998). זהו ממצא שנמצא בצורה עקבית ושיטתית
במחקרים רבים.

במחקרים על ילדים הסובלים מהפרעות שינה נמצאים באופן עקבי יותר ילדים
המאובחנים כ-ADHD או הסובלים מסממנים בולטים של ADHD, כגון חוסר שקט ובעיות ריכוז,
מאשר בקרב ילדים שלא סובלים מהפרעות שינה. קיימים מספר תיאורים קליניים של ילדים
שאובחנו כ-ADHD ולאחר מכן אובחנו שהם סובלים מהפרעת שינה ראשונית. כאשר טופלה
הפרעת השינה חל שיפור ניכר בתפקוד הילד וירידה בסממנים של ADHD (Dahl, 1996;)
(Dahl, Pelham, & Wiersen, 1991).

ברמה האינטואיטיבית כל הורה מכיר את התופעה של הילד העייף, או הילד "שעבר את
השעה שלו" והופך להיות פעיל יתר, עצבני, חסר שקט ובמידה רבה מזכיר את המאפיינים של
הילד עם ADHD. גם תופעה זו מרמזת לכאורה על קשר בין חוסר שינה ועייפות לבין מאפיינים
של ADHD בילדים.

בשנים האחרונות נערכו מחקרים שבדקו בצורה אובייקטיבית (במעבדת שינה או
באמצעות ציוד מדידה ביתי) את שנתם של ילדים עם ובלי ADHD. חלק מהמחקרים הצביעו על
הפרעות שינה משמעותיות יותר אצל ילדים עם ADHD. הפרעות אלה כוללות הפרעות נשימה
בשינה, נחירה, תנועות רגליים מחזוריות בשינה, יקיצות מרובות, ובעיות בתזמון השינה (שינויים
גדולים בזמני ההרדמות ומשך השינה מלילה ללילה). במחקרים שערכנו במעבדתנו מצאנו שאכן
ילדים עם ADHD מאופיינים בדפוס שינה כאוטי יותר מאשר ילדי ביקורת והם נוטים ללכת לישון
בשעות שונות מלילה ללילה ולישון כמות שינה משתנה ולא יציבה (Gruber & Sadeh, 2004;)
(Gruber, Sadeh, & Raviv, 2000). במחקר מטה-אנליטי (שבוחן תוצאות של מחקרים רבים)
שערכנו מצאנו שהממצא היחיד העקבי שעולה מכל המחקרים המעבדתיים שנערכו הוא שילדים
עם ADHD סובלים יותר בתסמונת תנועות רגליים בשינה, שהיא הפרעה נוירולוגית שעלולה

לפגוע בשנתם בצורה משמעותית ולגרום להם לעייפות יתר ביום (Sadeh, Pergamin, & Bar-
(Haim, 2006).

עד לפני עשור היה מקובל להתייחס את הפרעות השינה כאל תוצר לוואי של תסמונת ה-ADHD ניתן לתאר זאת בצורה פשוטה: "אם לילד יש מנוע טורבו כל היום, למה שיצליח לדומם אותו ולישון בשקט בלילה"? הגיון זה התבסס על הרציונאל שהן ה-ADHD והן הפרעות השינה נובעות מעוררות יתר של הילד. בשנים האחרונות דווקא גישה אחרת והפוכה קיבלה חיזוק משמעותי. גישה זו מתבססת על השערת התת-עוררות של ADHD. השערה זו טוענת שהסינדרום הוא תוצאה של תת-עוררות ותת-פעילות של מערכות מוחיות (פרה-פרונטאליות) שאחראיות לוויסות ותכנון הפעילות. תת-הפעילות של מערכות אלה היא שמובילה לפעילות יתר, קושי לעכב תגובה (אימפולסיביות) ופעילות שאינה מכוונת למטרה. השערת התת-עוררות מתבססת בין היתר על התגובה הפרדוקסאלית של ילדים עם ADHD לחומרים מעוררים כגון ריטלין. ההנחה היא שחומרים אלה שגורמים להגברת העוררות במערכות הויסות המוחיות אצל ילדים אלה גורמות לתפקוד מווסת, רגוע ומכוון יותר למטרות ארוכות טווח (כגון לימודים).

המחקרים המעבדתיים והאובייקטיביים האחרים שהצביעו על הפרעות שינה משמעותיות אצל אחוז ניכר מילדי ה-ADHD, גם כן תומכים בהשערה ששנתם של הילדים אינה מספקת ואינה מרעננת די הצורך ולכן הילד סובל מעייפות יתר. תמיכה נוספת להשערת התת-עוררות הגיעה ממחקרים שבחנו את מהירות ההרדמות של ילדים בשעות שונות של היממה כאשר מספקים להם תנאי שינה והם מוגבלים למיטה למשך זמן ההרדמות. שיטה זו מקובלת להערכה אובייקטיבית של רמת העייפות או הישנוניות של הנבדק. הבדיקה נערכת במעבדת שינה מספר פעמים ביום בשעות שונות של היום. הילד מחובר לאלקטרודות שרושמות את גלי המוח וערוצים נוספים. בשעה מסוימת הוא מתבקש להיכנס למיטה בחדר חשוך ולהירדם הכי מהר שהוא יכול. הרישום המעבדתי מגלה תוך כמה זמן הילד נרדם בתנאים אלה, והבדיקה נקראת מבחן חביון שינה חוזר (Multiple Sleep Latency Test). ככל שהילד נרדם מהר יותר

הדבר מהווה סמן לכך שהוא היה עייף וישנוני יותר. בבדיקה כזו האינטואיציה אומרת שלילד עם ADHD שהוא חסר שקט ופעיל כ"כ יהיה קשה מאד להירדם באמצע היום. אבל, בניגוד לאינטואיציה, שני מחקרים כבר הראו שילדים עם ADHD נרדמים הרבה יותר מהר מאשר ילדים ללא ADHD. זוהי שוב תמיכה משמעותית להשערה שילדים רבים עם ADHD סובלים אולי מעייפות יתר או תת-עוררות (Konofal, Bouvard, Falissard, & Mouren-Simeoni, 2000; Lecendreux, Golan, Shahar, Ravid, & Pillar, 2004).

למרות שהעדויות גרמו לשינוי התפיסה לגבי הקשר בין שינה ו-ADHD, אסור לשגות ולחשוב שהפרעות שינה הן הסיבה או המקור הבלעדי או העיקרי ל-ADHD. יחד עם זאת, יש סיבות טובות לחשוב שבמקרים מסוימים הפרעות שינה עלולות להיות הסיבה העיקרית ובמקרים רבים הפרעות שינה מסבכות ומקשות על תפקוד הילד גם אם המקור ל-ADHD הוא ממקור ביולוגי או התנהגותי אחר. מחקרים רבים אחרים הצביעו על הקשר שבין הפרעות שינה לתלונות על בעיות קשב וריכוז גם ללא אבחנה של ADHD ולכן יש תמיד לבחון את נושא השינה והערנות בהערכה כוללת של בעיות קשב וריכוז.

שינה, תפקודי למידה והשעון הביולוגי

במוחנו ובגופנו מתקתקים שעונים ביולוגיים רבים שחלקם מתפקדים בדומה לשעון הסביבתי אור-חושך סביב כעשרים וארבע שעות. השעון הביולוגי שלנו שמכתיב לרובנו לישון בלילה ולהיות ערים ביום מושפע ממנגנונים מוחיים מורכבים שמושפעים מהחשיפה לאור ולחושך הסביבתי. יחד עם זאת, קיימים הבדלים אינדיבידואליים בין בני אדם בנטיות שלהם שקשורות לשעון הביולוגי. כך למשל, מוכרים "טיפוסי הבוקר", שנוטים לקום בבוקר מוקדם ולהיות ערניים בשעות הבוקר והיום אבל נוטים ל"הכבות" בשעות הערב. לעומתם "טיפוסי הלילה" מתקשים לקום ולהתניע בבוקר והם מרגישים במיטבם בשעות הערב והלילה. מחקרים מראים שאכן התפקוד של טיפוסים שונים במטלות קישביות וקוגניטיביות אחרות תלויות בהתאמה בין הטיפוסיות שלהם לבין שעת ביצוע המטלה (Goldstein, Hahn, Hasher, Wiprzycka, &)

Zelazo, 2007; Matchock & Mordkoff, 2009). בנוסף לכך יש לזכור שבאופן כללי השעון הביולוגי משפיע על איכות הביצועים שלנו בשעות שונות של היום. כך למשל מצאנו במחקרנו על תפקודי למידה וקשב של ילדים בגיל ביה"ס היסודי שתפקודם במטלה כגון החלפת אות-סימן (symbol-digit substitution) הייתה טובה יותר באופן מובהק בשעות הצהריים לעומת שעת הבוקר. כמו כן מצאנו שהתפקוד של ילדים עם איכות שינה ירודה היה גרוע יותר בהשוואה לילדי הביקורת בשעות הבוקר לעומת שעות הצהריים (Sadeh et al., 2002). ממצאים אלה מצביעים על חשיבות השעה ביום והשעון הביולוגי האינדיבידואלי בקשר שבין שינה ותפקודי קשב ולמידה.

סיכום

המחקר המגוון והרחב מצביע על כך שלשינה תפקידים מרכזיים בויסות תפקודי הקשב והלמידה. בשינה עצמה מתבצעים תהליכים הקשורים להמשך עיבוד האינפורמציה שנקלטה בערות ואכסונה בזיכרון לטווח ארוך. קיימת אי בהירות לגבי שלבי השינה החיוניים לכל תהליך או סוג אינפורמציה, אבל קיימת הסכמה גורפת לגבי החשיבות של השינה על כל מרכיביה בתחום זה.

השינה האיכותית והמרעננת חיונית ליכולת התפקוד היומיומית שלנו. הערנות היא מרכיב חיוני בתפקודי קשב ולמידה, והיא מושפעת מאיכות וכמות השינה שלנו וממרכיבים של השעון הביולוגי שמכתיב לנו רמות ערנות שונות בשעות שונות של היום. המחקרים הרבים מצביעים על הקשר ההדוק בין הפרעות שינה או חסך שינה לבין ליקויים בתפקודי הקשב והלמידה. במציאות העכשווית שבה מחקרים מראים שהשינה של הילדים מתקצרת והולכת, וכן שהילדים הישראלים ישנים פחות מעמיתיהם באירופה למשל, יש לשקול היטב את המחירים השליליים של חסך שינה מצטבר והולך כתופעה חברתית גורפת.

- Ali, N. J., Pitson, D. J., & Stradling, J. R. (1993). Snoring, sleep disturbance, and behaviour in 4-5 year olds. *Archives of Disease in Childhood*, 68, 360-366.
- Aserinsky, E., & Kleitman, N. (1953). Regularly occurring periods of eye motility, and concomitant phenomena, during sleep. *Science*, 118, 273-274.
- Ball, J. D., & Koloian, B. (1995). Sleep patterns among adhd children. *Clinical Psychology Review*, 15, 681-691.
- Beebe, D. W. (2006). Neurobehavioral morbidity associated with disordered breathing during sleep in children: A comprehensive review. *Sleep*, 29, 1115-1134.
- Blunden, S., Lushington, K., & Kennedy, D. (2001). Cognitive and behavioural performance in children with sleep-related obstructive breathing disorders. *Sleep Medicine Reviews*, 5, 447-461.
- Bruni, O., Ferini-Strambi, L., Russo, P. M., Antignani, M., Innocenzi, M., Ottaviano, P., et al. (2006). Sleep disturbances and teacher ratings of school achievement and temperament in children. *Sleep Medicine*, 7, 43-48.
- Buckhalt, J. A., El-Sheikh, M., & Keller, P. (2007). Children's sleep and cognitive functioning: Race and socioeconomic status as moderators of effects. *Child Development*, 78, 213-231.
- Carskadon, M. A., Harvey, K., & Dement, W. C. (1981a). Acute restriction of nocturnal sleep in children. *Perceptual and Motor Skills*, 53, 103-112.

- Carskadon, M. A., Harvey, K., & Dement, W. C. (1981b). Sleep loss in young adolescents. *Sleep*, 4, 299-312.
- Cohen-Zion, M., & Ancoli-Israel, S. (2004). Sleep in children with attention-deficit hyperactivity disorder (adhd): A review of naturalistic and stimulant intervention studies. *Sleep Medicine Reviews*, 8, 379-402.
- Copes, K., & Rosentswieg, J. (1972). The effects of sleep deprivation upon motor performance of ninth-grade students. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 12, 47-53.
- Corkum, P., Tannock, R., & Moldofsky, H. (1998). Sleep disturbances in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent psychiatry*, 37, 637-646.
- Curcio, G., Ferrara, M., & De Gennaro, L. (2006). Sleep loss, learning capacity and academic performance. *Sleep Medicine Reviews*, 10, 323-337.
- Dahl, R. E. (1996). The regulation of sleep and arousal: Development and psychopathology. *Development and Psychopathology*, 8, 3-27.
- Dahl, R. E., Pelham, W. E., & Wierson, M. (1991). The role of sleep disturbances in attention deficit disorder symptoms: A case study. *Journal of Pediatric Psychology*, 16, 229-239.
- Dinges, D. F., Pack, F., Williams, K., Gillen, K. A., Powell, J. W., Ott, G. E., et al. (1997). Cumulative sleepiness, mood disturbance, and psychomotor vigilance performance decrements during a week of sleep restricted to 4-5 hours per night. *Sleep*, 20, 267-267.

- Durmer, J. S., & Dinges, D. F. (2005). Neurocognitive consequences of sleep deprivation. *Seminars in Neurology*, 25, 117-129.
- Epstein, R., Chillag, N., & Lavie, P. (1998). Starting times of school: Effects on daytime functioning of fifth-grade children in israel. *Sleep*, 21, 250-256.
- Fallone, G., Acebo, C., Arnedt, J. T., Seifer, R., & Carskadon, M. A. (2001). Effects of acute sleep restriction on behavior, sustained attention, and response inhibition in children. *Perceptual and Motor Skills*, 93, 213-229.
- Frank, M. G., & Benington, J. H. (2006). The role of sleep in memory consolidation and brain plasticity: Dream or reality? *Neuroscientist*, 12, 477-488.
- Freudigman, K. A., & Thoman, E. B. (1993). Infant sleep during the first postnatal day: An opportunity for assessment of vulnerability. *Pediatrics*, 92, 373-379.
- Gertner, S., Greenbaum, C. W., Sadeh, A., Dolfin, Z., Sirota, L., & Ben-Nun, Y. (2002). Sleep-wake patterns in preterm infants and 6 month's home environment: Implications for early cognitive development. *Early Human Development*, 68, 93-102.
- Golan, N., Shahar, E., Ravid, S., & Pillar, G. (2004). Sleep disorders and daytime sleepiness in children with attention-deficit/ hyperactive disorder. *sleep*, 27, 261-266.
- Goldstein, D., Hahn, C. S., Hasher, L., Wiprzycka, U. J., & Zelazo, P. D. (2007). Time of day, intellectual performance, and behavioral problems in morning

- versus evening type adolescents: Is there a synchrony effect? *Personality and Individual Differences*, 42, 431-440.
- Gozal, D. (1998). Sleep-disordered breathing and school performance in children. *Pediatrics*, 102, 616-620.
- Gozal, D. (2008). Obstructive sleep apnea in children: Implications for the developing central nervous system. *Semin Pediatr Neurol*, 15, 100-106.
- Gozal, D., & Pope, D. W. (2001). Snoring during early childhood and academic performance at ages thirteen to fourteen years. *Pediatrics*, 107, 1394-1399.
- Gradisar, M., Terrill, G., Johnston, A., & Douglas, P. (2008). Adolescent sleep and working memory performance. *Sleep and Biological Rhythms*, 6, 146-154.
- Gruber, R., & Sadeh, A. (2004). Sleep and neurobehavioral functioning in boys with attention deficit hyperactivity disorder (adhd) and no breathing problems. *Sleep*, 27, 267-273.
- Gruber, R., Sadeh, A., & Raviv, A. (2000). Instability of sleep patterns in children with attention- deficit/hyperactivity disorder. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 39, 495-501.
- Harrison, Y., & Horne, J. A. (1998). Sleep loss impairs short and novel language tasks having a prefrontal focus. *Journal of Sleep Research*, 7, 95-100.
- Harrison, Y., Horne, J. A., & Rothwell, A. (2000). Prefrontal neuropsychological effects of sleep deprivation in young adults - a model for healthy aging? *Sleep*, 23, 1067-1073.

- Horne, J. A. (1993). Human sleep, sleep loss and behaviour. Implications for the prefrontal cortex and psychiatric disorder. *British Journal of Psychiatry*, 162, 413-419.
- Karni, A., Tanne, D., Rubenstein, B. S., Askenasy, J. J. M., & Sagi, D. (1994). Dependence on rem-sleep of overnight improvement of a perceptual skill. *Science*, 265, 679-682.
- Lecendreux, M., Konofal, E., Bouvard, M., Falissard, B., & Mouren-Simeoni, M. C. (2000). Sleep and alertness in children with adhd. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 41, 803-812.
- Maquet, P., Laureys, S., Peigneux, P., Fuchs, S., Petiau, C., Phillips, C., et al. (2000). Experience-dependent changes in cerebral activation during human rem sleep. *Nature Neuroscience*, 3, 831-836.
- Matchock, R. L., & Mordkoff, J. T. (2009). Chronotype and time-of-day influences on the alerting, orienting, and executive components of attention. *Experimental Brain Research*, 192, 189-198.
- Meijer, A. M., Habekothe, H. T., & van den Wittenboer, G. L. H. (2000). Time in bed, quality of sleep and school functioning of children. *Journal of Sleep Research*, 9, 145-153.
- Meijer, A. M., & van den Wittenboer, G. L. H. (2004). The joint contribution of sleep, intelligence and motivation to school performance. *Personality and Individual Differences*, 37, 95-106.
- Mercier, L., Pivik, R. T., & Busby, K. (1993). Sleep patterns in reading disabled children. *Sleep*, 16, 207-215.

- O'Brien, L. M., & Gozal, D. (2004). Neurocognitive dysfunction and sleep in children: From human to rodent. *Pediatric Clinics of North America*, 51, 187-202.
- Peigneux, P., Laureys, S., Fuchs, S., Destrebecqz, A., Collette, F., Delbeuck, X., et al. (2003). Learned material content and acquisition level modulate cerebral reactivation during posttraining rapid-eye-movements sleep. *Neuroimage*, 20, 125-134.
- Pilcher, J. J., & Huffcutt, A. I. (1996). Effects of sleep deprivation on performance: A meta-analysis. *Sleep*, 19, 318-326.
- Quach, J., Hiscock, H., Canterford, L., & Wake, M. (2009). Outcomes of child sleep problems over the school-transition period: Australian population longitudinal study. *Pediatrics*, 123, 1287-1292.
- Quine, L. (1992). Severity of sleep problems in children with severe learning difficulties: Description and correlates. *Journal of Community and Applied Social Psychology*, 2, 247-268.
- Randazzo, A. C., Muehlbach, M. J., Schweitzer, P. K., & Walsh, J. K. (1998). Cognitive function following acute sleep restriction in children ages 10-14. *Sleep*, 21, 861-868.
- Ravid, S., Afek, I., Suraiya, S., Shahar, E., & Pillar, G. (2009). Kindergarten children's failure to qualify for first grade could result from sleep disturbances. *Journal of Child Neurology*.

- Rial, R. V., Nicolau, M. C., Gamundi, A., Akaarir, M., Aparicio, S., Garau, C., et al. (2007). The trivial function of sleep. *Sleep Medicine Reviews*, 11, 311-325.
- Sadeh, A., Gruber, R., & Raviv, A. (2002). Sleep, neurobehavioral functioning and behavior problems in school-age children. *Child Development*, 73, 405-417.
- Sadeh, A., Gruber, R., & Raviv, A. (2003). The effects of sleep restriction and extension on school-age children: What a difference an hour makes. *Child Development*, 74, 444-455.
- Sadeh, A., Pergamin, L., & Bar-Haim, Y. (2006). Sleep in children with attention-deficit hyperactivity disorder: A meta-analysis of polysomnographic studies. *Sleep Medicine Reviews*, 10, 381-398.
- Scher, A. (2005). Infant sleep at 10 months of age as a window to cognitive development. *Early Human Development*, 81, 289-292.
- Smith, C. (2001). Sleep states and memory processes in humans: Procedural versus declarative memory systems. *Sleep Medicine Reviews*, 5, 491-506.
- Stickgold, R., & Walker, M. P. (2005). Sleep and memory: The ongoing debate. *Sleep*, 28, 1225-1227.
- Stickgold, R., & Walker, M. P. (2007). Sleep-dependent memory consolidation and reconsolidation. *Sleep Medicine*, 8, 331-343.
- Wolfson, A. R., & Carskadon, M. A. (1998). Sleep schedules and daytime functioning in adolescents. *Child Development*, 69, 875-887.

דו לשוניות: פרספקטיבות מפסיכולוגיה קוגניטיבית ומדעי העצב

ענת פריאור

מרכז אדמונד ג' ספרא לחקר המוח ולקוייות הלמידה, הפקולטה לחינוך, אוניברסיטת חיפה

רוב תושבי העולם כיום עושים שימוש כלשהו ביותר מאשר שפה אחת, ולתופעת הדו-לשוניות יש מגוון רחב של ביטויים. בקצה אחד של הספקטרום ישנן קהילות שרוב חבריהן דוברים שתי שפות על בוריין ומשתמשים בכל אחת מן השפות בחיי היומיום כגון ספרדית וקטלנית בברצלונה או ערבית ועברית בקרב ערביי ישראל. בנוסף, בישראל לימודי האנגלית כשפה שניה מתחילים בגיל מוקדם במערכת החינוך הפורמאלית, וישנה חשיפה לאנגלית ושימוש בה בתחומי חיים רבים. בקצה השני של הספקטרום ניתן למקם רבים מדוברי האנגלית בארה"ב אשר בחלקם לומדים שפה שנייה רק בגיל מאוחר יחסית (תיכון או אוניברסיטה) ולמעשה שימושם בשפה זו מוגבל פעמים רבות לכיתת הלימוד. בכל אופן, בשני העשורים האחרונים ישנו ענין גובר בקרב הקהילה האקדמית בסוגית רכישת שפה שנייה ושימוש בה. פרק זה יסקור ממצאים עדכניים בתחומי הדו-לשוניות ועיבוד שפה שנייה, תוך התמקדות בתחומי המחקר והידע של הפסיכולוגיה הקוגניטיבית והספרות הנוירוקוגניטיבית, או מדעי העצב. אין בכך להמעיט מחשיבותם של המחקר הענף והדיונים התיאורטיים הערים המתקיימים בדיסציפלינה של הוראה שפה שנייה כפרקטיקה חינוכית (Doughty & Long, 2003). אולם, בשל קוצר היריעה אין אפשרות אמיתית לכסות מגוון דיסציפלינות רחב מידי, ולפיכך בחרתי להתעמק בתחום ממוקד יותר.

ברצוני להדגיש כי בדיון הנוכחי השימוש במונח דו-לשוניות הוא רחב ביותר, ואינו מוגבל רק למקרים הנדירים יחסית של רכישת שתי שפות בילדות ושמירה על רמת שליטה גבוהה בשתייהן לאורך החיים. רבות מן הסוגיות שידונו בפרק זה רלוונטיות, במידות שונות, לטווח רחב של

דוברים, אשר עושים שימוש זה או אחר ביותר מאשר שפה אחת. פרק זה יתאר מספר מודלים קוגניטיביים של תפקוד דו-לשוני, יבחן את סוגיית הגיל הקריטי ברכישת שפה שניה, יציג ממצאים ממחקרי הדמיה מוחית שבחנו את דפוסי הפעילות במוחם של דו-לשוניים, ולבסוף יתאר קו מחקר חדשני הבוחן את ההשלכות האפשריות של דו-לשוניות על התפקוד הקוגניטיבי הכולל.

מודלים קוגניטיביים של דו-לשוניות

השאלה כיצד מאורגנות שתי שפות, או יותר, במערכת הקוגניטיבית של דובר יחיד היא מורכבת, והובילה להצגתם של מודלים שונים בספרות (Kroll & Tokowicz, 2005), והדיון המחקרי בה נסוב סביב שתי סוגיות מרכזיות. הסוגיה הראשונה היא שאלת הייצוג והמבנה, כלומר, מה מידת העצמאות של כל אחת מן השפות, או לחילופין, באיזו מידה חולקות השפות ייצוגים לשוניים ברמות עיבוד שונות (הפונטית, הלקסיקלית, התחבירית וכו'). הסוגיה השנייה נוגעת בתחום השימוש והאקטיבציה של השפות השונות. קרי, האם ישנן עדויות לכך שהמערכת הקוגניטיבית יכולה ל"כבות" את האחת השפות על מנת לאפשר שימוש בלתי מופרע בשפה השנייה (בין אם בהפקה ובין אם בהבנה)? האלטרנטיבה גורסת כי בכל רגע נתון, שתי השפות פעילות במידה זו או אחרת, וישנה תחרות מתמדת ביניהן. שתי הסוגיות הללו כמובן כרוכות זו בזו, אם כי אינן זהות. למשל, ייתכן כי כל אחת מן השפות תהיה מיוצגת באופן עצמאי, אך יחד עם זאת תהיה אקטיבציה של שתיהן במקביל.

המודל ההיררכי (Kroll & Stewart, 1994) ומודל התכונות המבוזר (DeGroot, 1992;) (Van Hell & De Groot, 1998) מתמקדים ברמות הייצוג הלקסיקלי (מילים) והסמנטי (משמעויות). שני המודלים מפרדים בין שתי רמות ייצוג אלו, ומניחים לקסיקונים נפרדים לשתי השפות, בעוד הייצוג הסמנטי הוא משותף. המודל ההיררכי מדגיש את הפן הדינאמי בהתפתחות הלקסיקון הדו-לשוני. בתחילה, מילים בשפה השנייה מעוררות את משמעותן רק באמצעות המילים בשפה הראשונה. כלומר, כאשר דובר עברית אשר נמצא בשלבים מוקדמים

של רכישת אנגלית נתקל במלה "DOOR", בשלב הראשון מתעורר הייצוג הלקסיקלי "דלת" ורק לאחר מכן ישנה גישה למשמעות המלה. על פי המודל ההיררכי, ככל שרמת השליטה בשפה השנייה מתפתחת, נוצרים קשרים ישירים בין לקסיקון השפה השנייה לבין ייצוגי המשמעות (ברמה הסמנטית), ואלו מתעוררים באופן ישיר, ללא תיווך של השפה הראשונה. מודל התכונות המבוזר שם את הדגש על אופי הייצוגים ברמה הסמנטית. על פי מודל זה, למלים בשתי השפות ישנה יכולת לעורר משמעויות באופן ישיר. ייצוג המשמעות מורכב ממערך של תכונות סמנטיות, והמשמעות של מלה בודדת מבוטאת על ידי דפוס הפעלה מסוים על פני תכונות אלו. כך, מילים בעלות משמעות דומה בשתי השפות (מלות תרגום) יובילו לדפוסי הפעלה דומים ברמה הסמנטית.

ניתן לראות אם כן, כי בנוגע לשאלת מידת השיתוף בייצוג, שני המודלים שהוצגו לעיל גורסים כי יתכן ייצוג נפרד ברמת המילים הלקסיקון, בעוד ייצוגי המשמעות משותפים לשתי השפות. זוהי כיום הדעה הרווחת בתחום (Francis, 2005), אם כי עדיין נותרו שאלות פתוחות רבות כגון באיזו מידה מתקיימים קשרים ישירים בין ייצוגים לקסיקליים בשתי השפות? עד כמה הייצוג ברמה הסמנטית מושפע על ידי מילים בשתי השפות? עד כמה הייצוגים הסמנטיים של דובר דו-לשוני דומים או שונים מן הייצוגים הסמנטיים של דוברים של כל אחת מן השפות שאינם דו-לשוניים? עד כמה מידת השיתוף בייצוג מוכתבת על ידי הקרבה בין שתי השפות? השאלה שאולי רלוונטית במיוחד לענייננו, היא זו הנדונה במסגרת המודל ההיררכי והנוגעת לתהליך רכישת השפה השנייה. ספציפית, באיזה שלב של רכישת שפה שנייה מתפתחים קשרים ישירים בין מילים בשפה השנייה לבין הייצוגים הסמנטיים? ישנן עבודות הגורסות כי תהליך זה מתרחש בשלב מוקדם יחסית של רכישת השפה (Alfarriba & Mathis, 1997), אך נחוצה עוד עבודה שיטתית רבה בטרם יובן התהליך במלואו. שאלה קשורה היא האם קיימים הבדלים בין שיטות הוראה או הקשרי למידה שונים בהשפעתם על תהליך זה? אין עדיין תשובות לשאלות אלו בגוף המחקר הנוכחי, אך יש לקוות כי בשנים הקרובות יתפרסמו מחקרים העוקבים מקרוב אחר

התפתחות הייצוגים הקוגניטיביים בקרב לומדי שפה שנייה, ויאפשרו הבנה טובה יותר של תהליכי השינוי המתרחשים ברמת הייצוג הקוגניטיבי.

הסוגיה השנייה שהוצגה לעיל, קרי בשאלת מנגנוני ההפעלה והסלקציה בין שפות בקרב דוברים דו לשוניים, זכתה אף היא להתעניינות רבה בשנים האחרונות. הדיון בסוגיה זו מתחלק בין מחקרים העוסקים בהפקת שפה מדוברת ומחקרים העוסקים בהבנת שפה, בין אם מדוברת ובין אם כתובה. בשני התחומים תוצאות המחקרים הניסויים שיפורטו בהמשך נוגדות במידה רבה את האינטואיציה של דוברים דו-לשוניים. תחושתנו כאשר אנו קוראים בשפה מסוימת היא שרק מילים באותה השפה נכנסות למודעות, וכי אנו מצליחים לשלוט באופן מוחלט בתהליך הקריאה, כך שמילים מן השפה השנייה אינן מתעוררות כלל. בתחום הפקת השפה התחושה היא דומה פעמים רבות, בעיקר בקרב דוברים בעלי רמת שליטה טובה בשתי השפות. כלומר, אנו בוחרים באיזו שפה ברצוננו להתבטא (בחירה אשר מוכתבת על פי בן השיחה וההקשר החוץ לשוני) ובה אנו מדברים. עם זאת, יש ביכולתנו לעבור במהירות ובקלילות משפה לשפה, לעיתים קרובות במסגרת אותו המשפט. ולעיתים אנו חווים גם תחושה של חדירה בלתי רצונית של מלה משפה מסוימת בעוד אנו מנסים להתבטא בשפה השנייה (תופעה זו מתרחשת בעיקר כאשר אנו דוברים את השפה בה אנו פחות בקיאים). בכל אופן, הממצאים מראים באופן משכנע ביותר כי בקרב דו-לשוניים, ישנה הפעלה מתמדת ובו-זמנית של שתי השפות גם בעת הקריאה וגם בעת הדיבור (Costa, 2005; Dijkstra, 2005). ארחיב כעת על ניסוי אחד שבחן קריאה וניסוי שני שבחן דיבור בקרב דו-לשוניים, ואשר תוצאותיהם תומכות באפשרות שבקרב דוברים דו-לשוניים ישנה הפעלה מתמדת של שתי השפות.

המחקר הראשון בוצע על ידי Van Hell & Dijkstra (2002) בהולנד, והתמקד בסטודנטים אשר היו דוברי הולנדית ילידים ולמדו אנגלית בתור שפה שנייה, וצרפתית בתור שפה שלישית. המאמר מתאר שלושה ניסויים, ואנו נתמקד בניסויים שתיים ושלוש, שהיו זהים זה לזה מבחינת תוכנם ונבדלו רק במאפייני המשתתפים בניסוי. בניסוי 2 השתתפו סטודנטים אשר למדו צרפתית

בבית הספר התיכון בלבד, ואי לכך שליטתם בצרפתית הייתה נמוכה מאשר באנגלית. בניסוי 3 השתתפו סטודנטים אשר המשיכו בלימודי הצרפתית גם באוניברסיטה, והגיעו לרמה גבוהה בצרפתית, כך שידיעותיהם בשפה זו השתוו לידיעותיהם באנגלית. נקודה קריטית להבנת הניסוי היא כי גיוס המשתתפים נעשה כך שמטרת הניסוי הוסתרה מהם והם לא ידעו כי לידיעותיהם בשפות נוספות, מלבד הולנדית, יש חשיבות כלשהי.

הניסוי נערך כולו בהולנדית, ובמהלכו הוצגו למשתתפים רצפי אותיות על גבי מסך מחשב, והם התבקשו לציין עבור כל אחד האם הוא מהווה מילה בשפה ההולנדית או לאו (מטלה הנקראת החלטה לקסיקלית). חלק מן המילים שהוצגו למשתתפים בהולנדית היו cognates – כלומר, מילים החולקות כתב, צליל ומשמעות עם מילים בשפה אחרת. כך, המלה bakker בהולנדית היא דומה בצליל ובכתב למלה baker באנגלית – משמעות שתיהן היא אופה. בדומה, המלה muur בהולנדית היא דומה בצליל ובכתב למלה muur בצרפתית – משמעות שתיהן קיר. יש להדגיש כי מילים בהולנדית היו דומות בצליל ובכתב למילות התרגום באנגלית או בצרפתית אך אף פעם לא בשתי השפות (אופה בצרפתית הוא boulanger, וקיר באנגלית הוא wall). כמו כן הוצגו לנבדקים מילים בהולנדית שאינן דומות לתרגומן באף אחד מן השפות האחרות.

השאלה המחקרית הייתה האם יימצאו הבדלים בזמני התגובה של הנבדקים למילים בהולנדית, מתוקף היותן דומות למילים בשפה אחרת שהנבדק מכיר. בפרט, אם המילים המוצגות יעוררו את ייצוגיהן גם באנגלית או בצרפתית, ולא רק בהולנדית, יש לצפות לתגובה מהירה יותר. מאידך, העדר הבדלים בזמני התגובה בין מילים שהן קוגנייט לבין מילים שאינן קוגנייט יעידו שהנבדקים אכן מפעילים רק את הלקסיקון ההולנדי שלהם, ושככל הנראה אין הפעלה של הלקסיקון האנגלי או הצרפתי.

התוצאות הראו כי עבור הנבדקים בניסוי 2, אשר דברו אנגלית על בוריה אך ידיעותיהם בצרפתית היו מוגבלות יותר, נמצאו זמני תגובה מהירים יותר רק למילים הולנדיות שהיו דומות לתרגומיהן באנגלית, אך לא למילים שדמו לתרגומיהן בצרפתית. לעומת זאת, הנבדקים בניסוי 3

אשר שלטו היטב גם באנגלית וגם בצרפתית, הגיבו מהר יותר למלים בהולנדית אשר היו דומות לתרגומיהן בשתי השפות הללו.

תוצאות אלו מראות כי מילים אשר מוצגות לנבדקים בשפת אימם, שהיא השפה החזקה ביותר שלהם, מבלי שיש להם ידע כלשהו על מטרות הניסוי ועל מאפייני הגירויים, מעוררות במקביל אינפורמציה השייכת לשפה שאינה רלוונטית לביצוע ואשר היא שפתם החלשה יותר של הנבדקים. המסקנה שאליה הגיעו החוקרים היא כי מערכת הבנת השפה הכתובה בקרב רב-לשוניים היא באופן בסיסי לא-סלקטיבית לשפה, ומובילה לעירור אינפורמציה בכל השפות שאדם דובר, גם אם אינן רלוונטיות לביצוע המטלה העומדת על הפרק. יש לציין כי כל השפות שנחקרו בניסוי זה חולקות את אותה מערכת כתב, עובדה אשר בוודאי יש לה תרומה מסוימת לממצאים בדבר הפעלה של מילים בלקסיקונים השונים. עם זאת, ישנם ממצאים המראים שגם בקרב דוברי עברית ואנגלית, שפות אשר אינן חולקות אותה מערכת כתב, ניתן למצוא עדויות על אקטיבציה בו-זמנית של שתי השפות, ושל חוסר סלקציה בזמן קריאה אשר מתבסס על דמיון בפונולוגיה (Gollan, Frost & Forester, 1997). עם זאת, נמצא כי יש צורך ברמת שליטה מינימאלית בשפה זרה לפני שניתן לראות השפעות שלה על ביצועים בשפת האם.

הניסוי השני שיתואר בפירוט נוגע לשאלת האקטיבציה של שתי השפות בעת דיבור, ונערך על ידי Costa et al. (2000), בקרב דוברי ספרדית וקטלנית בברצלונה. ניסוי זה שוב ניצל את קיומן של מילות תרגום הדומות פונולוגית בין שתי השפות, וספציפית הציג תמונות של חפצים יומיומיים ששמותיהם בשתי השפות דומים או שאינם דומים. המשתתפים בניסוי התבקשו לומר בקול רם את שמו של שם העצם המוצג בכל אחת מן התמונות (מטלת שיום). החוקרים מדדו את פרק הזמן שעבר מרגע הצגת התמונה ועד שהנבדק החל לבטא את שמה, והשוו את זמני התגובה לתמונות כגון חתול (gato בספרדית, ו-gat בקטלנית), שהן דומות בשתי השפות, לעומת תמונות כגון שולחן (mesa בספרדית ו-taula בקטלנית), ששמן שונה בשתי השפות. הנבדקים שיימו את כל התמונות בספרדית, וביצעיהם הושוו לאלה של דוברים ספרדית שאינם

דוברים קטלנית. ההשערה המחקרית הייתה שאם זמני השיום לתמונות ששמותיהן בספרדית דומות לתרגום השם בקטלנית יהיו קצרים מזמני השיום לתמונות ששמן שונה בשתי השפות, הרי שיש בכך עדות לאקטיבציה של שם התמונה בקטלנית למרות שהנבדק מבצע מטלה בספרדית בלבד. מסקנה זו מתבססת על כך שאקטיבציה של שתי מילים דומות בשתי השפות מקלה על ביצוע השיום, בעוד אקטיבציה של שתי מילים שונות בשתי השפות תיצור תחרות בין המילים ותעכב את השיום. ממצאי המחקר תמכו בהשערה – זמני השיום לתמונות ששמן דומה בשתי השפות היו קצרים באופן מובהק מזמני השיום לתמונות האחרות, אך ורק בקרב הדוברים הדו לשוניים ולא בקרב קבוצת הביקורת של דוברי הספרדית שאינם דוברים קטלנית. דפוס זה מעיד על כך שבמערכת הקוגניטיבית של דו-לשוניים ישנה אקטיבציה של מלים בשפה שבה הם אינם מתכוונים לדבר. ניסוי זה מוסיף על הניסוי הקודם שתואר, ומהווה עדות לכך שלא רק מערכת הבנת השפה היא באופן בסיס לא סלקטיבית, אלא שתיאור זה תקף גם לגבי מערכת הפקת השפה בקרב דו לשוניים.

תקופה קריטית לרכישת שפה שנייה

רוב המבוגרים מתקשים ברכישת שפה שנייה, אולם ילדים הנחשפים לשפה שנייה בגיל צעיר מצליחים לרכוש אותה בקלות יחסית, ולעיתים אף להגיע לרמת שליטה בשפה הדומה לזו של דוברים ילידים, כולל מבטא מושלם. אין כמעט מי שחולק על עובדה זו, ולמרות זאת מתקיים בספרות הפסיכו-בלשנית בשנים האחרונות דיון ער לגבי שורש התופעה. עיקר המחלוקת נסוב סביב השאלה האם ניתן לייחס את ההשפעה של גיל חשיפה לשפה שנייה על מידת ההצלחה ברכישתה לתקופה קריטית בהתפתחות, או שמא ישנם גורמים אחרים האחראים לתופעה זו. מהי תקופה קריטית? על פי הגדרתו של (Birdsong, 2005), תקופה קריטית בהתפתחות מתאפיינת בטווח גילאים מוגדר שבו יש לאורגניזם רגישות מיוחדת לגירוי סביבתי מסוים, אשר חשיפה אליו מניעה אירוע התפתחותי ספציפי. לשם דוגמא, בקרב זני ציפורים מסוימים, ישנו לוח

התפתחות ביולוגי אשר מכתוב באופן מלא את רכישת יכולות השירה. לגבי יכולות אנושיות מקובל לרוב להתייחס לתקופות רגישות, שבהן יש למידה אופטימאלית של תחום כלשהי. המשמעות של תקופה רגישה, לעומת תקופה קריטית, היא שהאדם יכול ללמוד את היכולת הספציפית גם מחוץ לטווח הגילאים המסוים, אולם תוך השקעת מאמץ רב יותר ולרוב עם תוצאה סופית טובה פחות. בתחום השפה השערת התקופה הרגישה גורסת כי עד לגיל מסוים יש לנו יכולת ללמוד שפה נוספת מעבר לשפת האם בקלות רבה, ולכאורה ללא השקעת מאמץ, אולם בסביבות גיל 15 (המספר משתנה בין חוקרים שונים) יש ירידה חדה ביכולת זאת, כך שמהגרים למדינה חדשה לאחר גיל זה יתקשו ברכישת השפה החדשה וסביר שלעולם לא יגיעו לרמת דובר ילידי, לפחות בתחומים מסוים של השפה כגון תחביר ומבטא בהגייה (DeKeyser, 2000).

אילו היבטים של התפתחות המח יכולים להוביל לתופעה של תקופה רגישה לרכישת שפה? ידוע למשל כי מבנה המוח וקשרים בין תאי עצב ניתנים לשינוי ביתר קלות בגילאים מוקדמים לעומת גילאים מאוחרים. אחרים גורסים שקיימת מודולה מוחית ספציפית שתפקידה רכישת שפה, והיא המאפשרת לבני אנוש לרכוש את שפת אימם באופן מהיר ומוצלח כל כך בילדות (Chomsky, 1990). על פי תיאוריה זו איבר השפה נותר נגיש במהלך הילדות המוקדמת, אולם במהלך ההתפתחות הוא מאבד פונקציונאליות ולכן למבוגרים קשה לרכוש שפה – הם איבדו נגישות לאיבר המוחי הייחודי שיכול לבצע את המטלה בצורה הטובה ביותר.

הגישה הנגדית טוענת שאמנם ישנה השפעה ברורה של גיל על יכולות רכישת שפה השנייה, אבל לא ברור שהנתונים תומכים בקיומה של תקופה קריטית או תקופה רגישה בהכרח. הסברים אלטרנטיביים מדגישים את ההבדלים בין ילדים מהגרים ומבוגרים מהגרים. לרוב, לילדים הזדמנויות רבות יותר להשתמש בשפה החדשה, והסובבים אותם פונים אליהם בשפה פשוטה וברורה, אשר מקילה על הלמידה. פעמים רבות ילדים גם חשים פחות בושה בעת שימוש לא מושלם בשפה החדשה ולפיכך למעשה משתמשים בה הרבה יותר ולכן מגיעים לרמה טובה

יותר. ישנם גם שיקולים של היטמעות וזהות, אשר עשויים למנוע מדוברים מבוגרים לסגל לעצמם את השפה החדשה באופן מושלם מתוך רצון לשמור על תחושת שייכות והזדהות עם המדינה והשפה ממנה הגיעו. אפשרות נוספת היא כי אצל מבוגרים ישנה ירידה כללית ביכולות הלמידה, אשר אינה ספציפית לשפה, אלא מתבטאת בקשת רחבה של כישורים קוגניטיביים. ולבסוף, שנות שימוש בשפת אמם בהשוואה לילדים, סובלים מהתקבעות (entrenchment) של השפה הראשונה אשר מפריעה באופן אקטיבי למאמצי רכישת השפה החדשה.

כיצד ניתן להכריע במחלוקת זו? הגישה המובילה גורסת שיש לנתח בדקדקנות את האופן שבו גיל החשיפה משפיע על רמת השפה השנייה ולבדוק האם ההתפלגות מעידה על נקודה מסוימת בהתפתחות שבה ניתן לזהות שינוי מורגש בקשר בין שני המשתנים, כפי שינבאו גישות של תקופה קריטית או רגישה. כלומר, האם למשל מי שנחשף לשפה שנייה לאחר גיל 15 מגיע לרמת שליטה נמוכה יותר באופן מובהק מאשר אלה שנחשפים לשפה השנייה לפני גיל זה. מאידך, אם רואים ירידה הדרגתית מתמדת בהישגי השפה השנייה בתלות בגיל החשיפה, ללא נקודת "שבר" ספציפית, הרי שככל הנראה לא ניתן לייחס את השפעת הגיל לתקופה קריטית אלא להתבגרות קוגניטיבית כללית ואולי לגורמים נוספים, אשר הוזכרו לעיל.

מחקר רחב היקף שדווח לאחרונה (Hakuta, Bialystok & Wiley, 2003) התבסס על אינפורמציה שנאספה על ידי מרשם האוכלוסין האמריקאי, לגבי יותר משני מיליון מהגרים לארה"ב אשר שפת אימם ספרדית או סינית. בשתי קבוצות האוכלוסייה הללו נמצא שגיל ההגירה לארה"ב והחשיפה לשפה האנגלית ניבאו במידה רבה את מידת השליטה בשפה האנגלית. כלומר, ככל שהמהגרים הגיעו לארה"ב בגיל צעיר יותר כך רמתם באנגלית הייתה גבוהה יותר. עד כאן, אין בממצאים אלו כל הפתעה. אולם, הממצא המשמעותי ביותר היה שלא ניתן היה לזהות אף נקודת "שבר" מובהקת, כלומר לא היה רגע בהתפתחות שבו חלה ירידה משמעותית ביכולות רכישת האנגלית. הקשר בין גיל ההגירה לבין רמת האנגלית היה קשר

ליניארי, שהראה ירידה מתמדת ומונוטונית ברמת האנגלית עם עליה בגיל ההגירה. בנוסף, נתוני המחקר מעידים גם על חשיבות רבה לרמת ההשכלה – רמת השכלה גבוהה הובילה לשיפור רמת האנגלית אליה הגיעו המהגרים, בכל טווח הגילאים.

מחקר זה אינו תומך בהשערת התקופה הקריטית, שכן הממצאים מראים דווקא שהשפעת הגיל על רכישת שפה שנייה היא ליניארית ומתמשכת, ונובעת ככל הנראה מהתבגרות קוגניטיבית כללית, מגורמים סביבתיים ומההשלכות של שימוש ארוך שנים בשפת האם. על פי מחקר זה לא ניתן לייחס את השפעת הגיל על רכישת שפה שנייה להתפתחות והתבגרות של מבנים מוחיים ספציפיים. עם זאת, יש לציין כי הדיון בסוגיה זו נמשך, עם ממצאים לכאן ולכאן, וטרם הוכרע.

מחקרי הדמיה מוחית של ארגון שפה בקרב דו-לשוניים

פיתוחן של טכניקות מתקדמות להדמיה מוחית ולזיהוי של אזורים פעילים במוח בעת ביצוע מטלות קוגניטיביות שונות, הרחיב באופן משמעותי את תחום המחקר של תפקודי שפה בקרב דו לשוניים. בעבר, השערות לגבי המיקום המוחי של פונקציות לשוניות שונות התבססו אך ורק על דפוסי הפגיעה והשימור של השפות השונות אצל דוברים דו-לשוניים אשר סבלו מפגיעה מוחית (Paradis, 1995). בסעיף זה יוצגו ממצאים בולטים של מחקרי הדמיה מוחית פונקציונאלית (fMRI), בהם נמדדת זרימת הדם לאזורים שונים במוח בעת ביצוע מטלות שונות, במקרה שלנו מטלות לשוניות. זרימת דם מוגברת מהווה מדד לפעילות מוחית אינטנסיבית יותר באזור מוחי מסוים.

אחת השאלות המרכזיות שנבחנו במחקר בתחום זה היא מידת הדמיון והשוני בדפוסי העיבוד של השפה הראשונה והשנייה במוחם של דו לשוניים. במסגרת מחקרים אלו מבצעים נבדקים מטלה מסוימת גם בשפת אימם וגם בשפה השנייה שרכשו, ודפוסי הפעילות המוחית מושוים. ברוב מחקרי ההדמיה שיתוארו התבצעה השוואה בין נבדקים דו לשוניים אשר נבדלים

זה מזה בהיסטוריית רכישת השפה שלהם, ובפרט בשני גורמים עיקריים: הגיל בו החלו ברכישת השפה השנייה, ורמת השליטה שלהם בשפה השנייה. במימד הראשון ההשוואה היא בין דו-לשוניות מוקדמת, שמשמעה חשיפה לשפה השנייה בילדות המוקדמת או אף מינקות, לעומת דו-לשוניות מאוחרת, שמשמעה לימוד השפה השנייה בגיל הנעורים או בבגרות. במימד השני ההשוואה הין בין דו-לשוניים שהגיעו לרמת שליטה גבוהה ביותר בשפה השנייה, לעיתים עד רמת שפת אם, לבין דו-לשוניים שרמת שליטתם בשפה השנייה היא בינונית. יש להדגיש כי לא כל הצירופים של שני המימדים הם אפשריים. כלומר, כמעט ולא קיימים דו-לשוניים מוקדמים אשר רמת שליטתם בשפה השנייה אינה גבוהה ביותר. לעומת זאת, במצב של רכישה מאוחרת ניתן בהחלט למצוא דוברים אשר מגיעים לרמה גבוהה ביותר של שליטה בשפה השנייה, כפי שתואר לעיל, בדיון בגיל הקריטי לרכישת שפה שנייה.

גם במחקרי הדמיה מוחית ישנו עניין במימדים שונים של עיבוד שפה. ראשית, מחקרים אשר בהם נתבקשו נבדקים לבצע מטלות הפקת שפה (שיום תמונות או מילים, חזרה על מילים, הפקת משפטים וכו') מצאו כי מידת הדמיון בדפוס הפעולה המוחית בעת הביצוע בשפה הראשונה והשנייה תלויה בעיקר ברמת השליטה בשפה השנייה, ומושפעים במידה פחותה מגיל הרכישה. כך, נמצא דמיון רב בין אזורי המוח שהיו פעילים בעת הפקת מילים בשפה הראשונה ובשפה השנייה בקרב דו-לשוניים אשר רמת שליטתם בשפה השנייה גבוהה, ודפוס זה נשמר בין אם רכשו את השפה השנייה בגיל צעיר או בגיל מבוגר יחסית. לעומת זאת, אצל דו-לשוניים אשר רמת שליטתם בשפה השנייה הייתה בינונית בלבד הייתה פעילות מוחית נרחבת יותר בזמן ביצוע בשפה השנייה לעומת ביצוע בשפה הראשונה, ופעילות זו חרגה מגבולות אזורי השפה הקלאסיים במוח (Abutalebi et al., 2005). כך, מחקר אשר בחן 6 רב-לשוניים, אשר דיברו כל אחד ארבע שפות (Briellmann et al., 2004), ואשר בו ביצעו הנבדקים מטלת הפקת שפה בכל אחת מן השפות, מצא כי ככל שמידת שליטתם בשפה מסוימת הייתה נמוכה יותר כך הייתה פעילות רחבה יותר בהמיספירה השמאלית של המוח, ובפרט באזורים הפרה-פרונטאליים.

מחקרי הדמיה בתחום הבנת השפה מניבים תמונה מורכבת מעט יותר. שתי מטלות עיקריות המשמשות במחקרים אלו הם החלטה סמנטית והחלטה דקדוקית. החלטה סמנטית היא מטלה בה נבדקים רואים או שומעים משפט ועליהם להחליט הוא בעל משמעות, או שהם רואים מלה ועליה להחליט האם היא שייכת לקטגוריה מסוימת, למשל בעלי חיים. החלטה דקדוקית היא מטלה בה נבדקים קוראים או שומעים משפט, ועליהם להחליט האם המשפט הוא בעל מבנה תקין. לדוגמא, המשפט "דני ראה אתמול כלב חום" הוא תקין, בעוד המשפט "*דני ראה אתמול כלב חומה" אינו תקין, משום ששם התואר אינו תואם במין לשם העצם אותו הוא מתאר. במחקרים אחרים הנבדקים אינם מתבקשים לבצע מטלה מסוימת, אלא פשוט מאזינים לסיפורים באחת משתי השפות שהם דוברים בזמן שמתבצעת הסריקה המוחית.

הממצאים מראים כי תמונת הפעילות המוחית שונה, בתלות בתנאי הניסוי. דו לשוניים אשר שלטו היטב בשפתם השנייה (בין אם למדו אותה בגיל מוקדם או מאוחר) הראו דפוסי פעילות דומים מאד בעת האזנה לסיפורים בשפה הראשונה ובשפה השנייה. כמו כן, מטלת ההחלטה הסמנטית בשתי השפות הובילה לדפוסי פעילות דומים בקרב אוכלוסיה זו. לעומת זאת, בקרב דו לשוניים אשר רכשו את השפה השנייה בגיל מאוחר ושלטו בה במידה בינונית בלבד, עיבוד בשפה הראשונה הוביל לדפוסי פעילות שונים מאלה אשר נמדדו בזמן עיבוד השפה השנייה. באופן כללי, בעת האזנה לסיפור בשפה השנייה גויסו אזורי מוח נרחבים יותר מאשר בעת האזנה לסיפור בשפה הראשונה, וכמו כן נמצאה שונות רבה בין נבדקים באזורים הפעילים בעת ביצוע בשפה השנייה (Dehaene et al., 1997). ממצאים אלו מדגישים שוב כי, ככל הנראה, המשתנה המשפיע ביותר על אזורי המוח השותפים בעיבוד השפה הראשונה והשנייה בקרב דו לשוניים הוא מידת שליטתם בשתי השפות, יותר מאשר הגיל בו רכשו את השפה השנייה.

תוצאה אחת חורגת מן המסקנה לעיל. מחקרם של Wartenburger et al. (2003) השוו מטלות של שיפוט סמנטי (האם המשפט הזה הגיוני?) ושיפוט דקדוקי (האם המשפט הזה נכון דקדוקית?) בקרב שלוש קבוצות של דו לשוניים, דוברי איטלקית כשפת אם, אשר נבדלו זו מזו

בגיל שבו רכשו גרמנית, ובמידת שליטתם בגרמנית. מטלת השיפוט הסמנטי הניבה את הדפוס שתואר לעיל, קרי מידת דמיון רבה באזורי העיבוד של איטלקית ושל גרמנית בקרב אותם נבדקים ששליטתם בגרמנית הייתה גבוהה. אולם, במטלת השיפוט הדקדוקי נמצא כי דווקא גיל הרכישה הוא המשמעותי יותר. כלומר, רק בקרב אותם נבדקים אשר רכשו איטלקית וגרמנית במקביל מינקות נמצא כי העיבוד הדקדוקי של שתי השפות מתבצע באותם אזורים במוח. בקרב דו לשוניים אשר נחשפו לא נחשפו לגרמנית מינקות (חשיפה ראשונה אחרי גיל 6) נמצא כי נדרשו אזורי מוח נרחבים יותר לעיבוד דקדוקי בגרמנית לעומת אלו ששימשו לביצוע מטלה זו באיטלקית.

לסיכום, ניתן לומר כי הייצוג המוחי של שתי השפות בקרב דוברים דו לשוניים אינו אחיד, ומושפע הן מרמת השליטה של דובר מסוים בכל אחת מן השפות והן מן הגיל בו נרכשה כל אחת מהן שפות. ממצאים אלו עולים בקנה אחד עם הידע המצטבר לגבי יכולותיו של המוח להמשיך ולהשתנות לאורך כל החיים, בניגוד לגישות מוקדמות יותר שגרסו כי המוח פלסטי רק בגילאים הצעירים ובבגרות מאבד את גמישותו. ומסקנות אלו מובילות אותנו לסעיף הבא והאחרון בפרק זה, האם ניתן לזהות דפוסים מיוחדים במוחם והתפקוד הקוגניטיבי של דו-לשוניים אשר נחשפו לשתי שפות בילדות המוקדמת אשר חורגים ממערכת השפה עצמה?

השלכות קוגניטיביות של דו לשוניות

כפי שהודגם לעיל, ישנן עדויות מחקריות לכך שבקרב דוברים דו-לשוניים ישנה הפעלה בו-זמנית מתמדת של שתי המערכות הלשוניות. מצב עניינים זה מטיל עומס על המערכת הקוגניטיבית של הדובר הדו-לשוני אשר נדרשת להתמודד עם התחרות הנוצרת בין שתי המערכות הלשוניות, התמודדות אשר נחסכת מדוברים חד לשוניים. כך, על המערכת הקוגניטיבית של הדובר הדו לשוני למצוא דרך להימנע מהסחות על ידי השפה שאינה רלוונטית בכל רגע נתון, וכן לאפשר מעבר תכוף וחלק בין מערכת לשונית אחת לשנייה. כיצד זה נעשה?

ישנן עדויות לכך שדוברים דו לשוניים נסמכים על הפונקציות הניהוליות הכלליות, הקשורות באונה הפרה-פרונטאלית, על מנת ליישב את התחרות המתעוררת במערכת הלשונית. פונקציות ניהוליות (Executive Function) הן המאפיינות את התפקודים הקוגניטיביים הגבוהים כגון חשיבה מורכבת, תכנון, גמישות מחשבתית, זיכרון עבודה והימנעות מהסחות. כך, דובר דו לשוני מסוגל לעבור מהתבטאות בשפה אחת להתבטאות בשפה השנייה באופן הדומה ליכולתו להחליף בין ביצוע מטלות שונות (פיזיות או מנטאליות). למשל, אם בעודנו קוראים עיתון מצלצל הטלפון אנו מסוגלים להפסיק את הקריאה ולעבור לשוחח עם האדם שהתקשר אלינו. במקביל, דו-לשוניים מסוגלים להתעלם או להתגבר על הסחות שמגיעות מן המערכת הלשונית הלא רלוונטית כמו שכולנו מסוגלים להתרכז בקריאת העיתון ולהתעלם מצלצול הטלפון אם אנחנו נמצאים בבית הקפה ויודעים שהטלפון שצלצל לא שייך לנו.

השאלה המרתקת העולה מן ההקבלה בין תפקידן של הפונקציות הניהוליות בחיי היומיום לבין תפקידן בניהול המערכת הלשונית של דו לשוניים היא האם מתוקף השימוש ה"עודף" שעושים דו-לשוניים בפונקציות הניהוליות (בהשוואה לחד-לשוניים כמובן) ניתן למצוא עדויות לכך שיש לדוברים דו לשוניים יתרון על חד לשוניים בעילותן של פונקציות אלו? שאלה זו נחקרה בקרב ילדים דו לשוניים, בקרב מבוגרים צעירים בגילאי ה-20 וכן בקרב האוכלוסייה המתבגרת, ובכל המקרים הללו התשובה היא חיובית: הדוברים הדו-לשוניים הפגינו יתרונות מסוימות בפונקציות הניהוליות בהשוואה לחד-לשוניים בני גילם.

מטלה אחת אשר שימשה בחקר שאלה זו בקרב שלוש קבוצות הגיל היא מטלת הסיימון (Bialystok, 2009). במטלה זו מתבקשים נבדקים להגיב לריבוע המופיע על מסך המחשב – אם הריבוע כחול עליהם ללחוץ על כפתור התגובה הימני, ואם הריבוע הוא אדום עליהם ללחוץ על כפתור התגובה השמאלי. היתרון במטלה זו הוא שהיא מתאימה לטווח גילאים רחב ביותר, מ-3 ועד לזקנה מופלגת. בזמן ביצוע המטלה, הריבועים הצבעוניים יכולים להופיע במרכז המסך או באחד משני הצדדים, ימין או שמאל, ועל הנבדקים למעשה להתעלם מן המיקום המרחבי של

הריבוע על המסך ולהמשיך להגיב אך ורק לצבעו. מניסויים רבים שהשתמשו במטלה זו נמצא כי כאשר הריבוע מופיע באותו צד שעל הנבדק להגיב (בהתבסס על הצבע) התגובה מהירה יותר, ואילו כאשר הריבוע מופיע בצידו הנגדי של המסך התגובה איטית יותר. זו עדות לכך שאין באפשרותנו להתעלם לחלוטין ממימד המיקום המרחבי, אף על פי שהוא אינו רלוונטי לביצוע המטלה.

בניסויים שהשוו את ביצועיהם של חד לשוניים ודו לשוניים במטלת הסיימון, נמצא כי באופן כללי דו-לשוניים מוסחים פחות מן המימד המרחבי, הלא רלוונטי, שכן הם מפגינים פער קטן יותר מאשר חד לשוניים בין המקרים בהם הריבוע מופיע בצד התואם לתגובה לבין המקרים בהם הריבוע מופיע בצד והנגדי לצד התגובה. ממצאים אלו תקפים עבור ילדי גן (בגילאי 3-5), עבור סטודנטים (גילאי ה-20) ועבור אוכלוסיה מתבגרת (גילאי 60-80), ומעידים על תפקוד יעיל יותר של הפונקציה הניהולית של התעלמות מהסחות. בכל המקרים, ההסבר שניתן לממצא זה הוא שבקרב דו-לשוניים ישנו שימוש יומיומי בפונקציות הניהוליות בהסדרת התחרות המתעוררת בתוך המערכת הלשונית, שימוש אשר מוביל לתפקוד משופר.

בנוסף, דו-לשוניים מפגינים גמישות מחשבתית רבה יותר מאשר חד לשוניים. ילדי גן דו-לשוניים מפגינים יכולת טובה יותר בביצוע מטלות קוגניטיביות הדורשות התמודדות עם מצבי קונפליקט (לרוב התעלמות ממידע מסיח) (Carlson & Meltzoff, 2008), וכן יכולים בקלות רבה יותר לעבור מביצוע מטלה אחת לביצוע מטלה אחרת (Martin-Rhee & Bialysok, 2008). מחקר שבדק סוגיה זאת בקרב סטודנטים חד לשוניים ודו לשוניים מצא כי הסטודנטים הדו-לשוניים הפגינו יתרון מובהק ביכולתם להחליף באופן תדיר בין ביצוע שתי מטלות (שיפוטי צבע ושיפוטי צורה) לעומת החד-לשוניים (Prior & MacWhinney, in press). הסטודנטים הדו לשונים הפגינו גמישות מנטלית מוגברת שהתבטאה בכך שלקח להם פחות זמן להגיב כאשר השתנתה המטלה מאשר לקח לחד לשוניים להגיב בתנאים דומים. גם ממצא זה מיוחס לניסיון החיים של הדו-לשוניים, אשר במהלכו הם נדרשים פעמים רבות במהלך כל יום להחליף בין שפה

אחת לשנייה, מציאות אשר מביאה לאימון רב של הפונקציות הניהוליות העומדות בבסיס הגמישות המנטלית ולכן לתפקוד יעיל יותר של פונקציות אלו.

לבסוף, מחקר חלוצי יחיד עד כה השווה בין מבוגרים בגיל הזקנה שהראו סימנים ראשונים של מחלת האלצהיימר, ואשר היו חד לשוניים או דו לשוניים (Bialystok, Craik & Freedman, 2007). החוקרים מצאו כי אנשים אשר השתמשו בשתי שפות לאורך חייהם דיווחו לראשונה על קשיים בזיכרון ובתפקוד בגיל 75 בממוצע, ארבע שנים מאוחר יותר מאשר אנשים חד-לשוניים. כלומר, ניסיון החיים הדו לשוני מהווה גורם המגן מפני התדרדרות קוגניטיבית בזקנה. ההסבר שניתן הוא כי המערכת הקוגניטיבית של אדם אשר לאורך כל חייו השתמש בשתי שפות (או יותר) "עבדה" קשה יותר מאשר זו של אדם חד לשוני. באנלוגיה פשטנית משהו למערכת השרירים, אפשר לומר כי הדו-לשוניים מאמנים את מוחם יותר לאורך חייהם ולכן המוח והמערכת הקוגניטיבית משמרים רמת תפקוד גבוהה יותר גם בזקנה. ממצאים אלה עולים בקנה אחד עם מחקרים אחרים אשר מצאו שגם סוגים אחרים של פעילות קוגניטיבית (פתרון תשבצים, עבודה מאתגרת אינטלקטואלית) מהווים גורם מגן מפני התדרדרות קוגניטיבית בזקנה. ניתן לראות, אם כן, כי מצטברות עדויות לכך שניסיון החיים הדו-לשוני משפיע על התפקודים הקוגניטיביים הכלליים, באופן אשר חורג מתפקודי השפה הספציפיים. חשוב להדגיש כי המחקר בתחום זה עדיין בחיתוליו, וישנן שאלות רבות שעדיין איננו מסוגלים לתת להן מענה.

סיכום

בפרק זה הצגתי על קצה המזלג ממצאים עדכניים מחקר הדו-לשוניות ורכישת שפה שנייה מפרספקטיבות של פסיכולוגיה קוגניטיבית ומדעי העצב. ניתן לחשוב על ההשלכות של מחקר זה בתחומים שונים. ראשית, בתחומי הוראת שפה שנייה, בין אם הוראת עברית לתלמידים ששפת אימם אינה עברית, או הוראת אנגלית כשפה זרה. מודלים עדכניים של ייצוג שפה שנייה תומכים באפשרות שבתחילה השפה השנייה נסמכת על המערכת הלשונית של השפה הראשונה, אך בהמשך עם התפתחות המיומנות הופכת השפה השנייה למערכת עצמאית יותר. שנית, יש

לקחת בחשבון את הממצאים אודות הבדלים קוגניטיביים בין דוברים חד לשוניים ודו לשוניים בהערכת הישגיהם של תלמידים דו לשוניים. לבסוף, הצטברות של עדויות לגבי האפקטים המיטיבים של דו לשוניות על התפקוד הקוגניטיבי לאורך החיים עשויות להשפיע על המדיניות הלשונית הרשמית בישראל ולהוביל לתמיכה רבה יותר בשימור וחיזוק דו-לשוניות.

- Abutalebi, J., Cappa, S.E. & Perani, D. (2005). What can functional neuroimaging tell us about the bilingual brain? In J.F. Kroll & A.M.B DeGroot, (Eds.) *Handbook of Bilingualism: Psycholinguistic Approaches*, USA: Oxford University Press, pp. 497-515.
- Altarriba, J. & Mathis K.M. (1997). Conceptual and lexical development in second language acquisition. *Journal of Memory and Language*, 36, 550-568.
- Bialystok, E. (2009). Bilingualism: The good, the bad and the indifferent. *Bilingualism: Language and Cognition*, 12, 3-11.
- Bialysok, E., Craik, F.I.M. & Freedman, M. (2007). Bilingualism as a protection against the onset of symptoms of dementia. *Neuropsychologia*, 45, 459-464.
- Birdsong, D. (2005). Interpreting age effects in second language acquisition. In J.F. Kroll & A.M.B DeGroot, (Eds.) *Handbook of Bilingualism: Psycholinguistic Approaches*, USA: Oxford University Press, pp. 49-67.
- Briellmann, R.S., Saling, M.M., Connell, A.B., Waites, A.B., Abbott, D.F. & Jackson, G.D. (2004). A high-field functional MRI study of quadri-lingual subjects. *Brain and Language*, 89, 531-542.
- Chomsky, N. (1990). On the nature, use and acquisition of language. In W.G. Lycan (Ed.), *Mind and Cognition: A Reader*, Cambridge, MA: Blackwell, pp. 627-646.
- Carlson, S.M. & Meltzoff, A.N. (2008). Bilingual experience and executive functioning in young children. *Developmental Science*, 11, 282-298.

- Costa, A. (2005). Lexical access in bilingual production. In J.F. Kroll & A.M.B DeGroot, (Eds.) *Handbook of Bilingualism: Psycholinguistic Approaches*, USA: Oxford University Press, pp. 308-325.
- Costa, A., Caramazza, A. & Sebastián-Gallés, N. (2000). The cognate facilitation effect: Implications for models of lexical access. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, 26, 1283-1296.
- De Groot, A.M.B. (1992). Bilingual lexical representation: A closer look at conceptual representations. In R. Frost & L. Katz (Eds.) *Orthography, Phonology, Morphology and Meaning*. Amsterdam: Elsevier.
- Dehaene, S., Dupoux, E., Mehler, J., Cohen, L., Paulesu, E., Perani, D., Van de Moortele, P.F., Lehericy, S. & Le Bihan, D. (1997). Anatomical variability in the cortical representation of first and second language. *NeuroReport*, 8, 3809-3815.
- DeKeyser, R.M. (2000). The robustness of critical period effects in second language acquisition. *Studies in Second Language Acquisition*, 22, 499-533.
- Dijkstra, T. (2005). Bilingual word activation and lexical access. In J.F. Kroll & A.M.B DeGroot, (Eds.) *Handbook of Bilingualism: Psycholinguistic Approaches*, USA: Oxford University Press, pp. 179-201.
- Doughty, C. & Long, M. H. (2003). *The Handbook of second language acquisition*. Blackwell publishing.

- Francis, W.S. (2005). Bilingual semantic and conceptual representation. In J.F. Kroll & A.M.B. De Groot (Eds) *Handbook of Bilingualism: Psycholinguistic Approaches*. New York: Oxford University Press, pp. 251-267.
- Gollan, T., Forester, K.I. & Frost, R. (1997). Translation priming with different scripts: Masked priming with cognates and non-cognates in Hebrew-English bilinguals. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 23, 1122-1139.
- Hakuta, K., Bialystok, E. & Wiley, E. (2003). Critical evidence: A test of the critical-period hypothesis for second language acquisition. *Psychological Science*, 14, 31-38.
- Kroll, J.F. & Tokowicz, N. (2005). Models of bilingual representation and processing: Looking back and to the future. In J.F. Kroll & A.M.B DeGroot, (Eds.) *Handbook of Bilingualism: Psycholinguistic Approaches*, USA: Oxford University Press, pp. 531-554.
- MacWhinney, B. (2005). A Unified model of language acquisition. In J.F. Kroll & A.M.B DeGroot, (Eds.) *Handbook of Bilingualism: Psycholinguistic Approaches*, USA: Oxford University Press, pp. 49-67.
- Martin-Rhee, M.M. & Bialystok, E. (2008). The development of two types of inhibitory control in monolingual and bilingual children. *Bilingualism: Language and Cognition*, 11, 81-93.
- Paradis, M. (ed.) (1995), *Aspects of Bilingual Aphasia*. Oxford: Pergamon Press.
- Prior, A. & MacWhinney, B. (in press). A bilingual advantage in task switching. *Bilingualism: Language and Cognition*

- Van Hell, J.G. & DeGroot, A.M.B (1998). Conceptual representation in bilingual memory: Effects of concreteness and cognate status in word association. *Bilingualism: Language and Cognition*, 1(3), 193-211.
- Van Hell, J.G. & Dijkstra, T. (2002). Foreign language knowledge can influence native language performance in exclusively native contexts. *Psychonomic Bulletin and Review*, 9, 780-789.
- Wartenburger, I., Heekeren, H.R., Abutalebi, J., Cappa, S.F., Villringer, A. & Perani, D. (2004). Early setting of grammatical processing in the bilingual brain. *Neuron*, 9, 159-170.

נוירו קוגניציה של עיבוד מידע נומרי ודיסקלקוליה התפתחותית

אבישי הניק

המחלקה לפסיכולוגיה, מרכז זלוטובסקי לחקר העצב, המרכז לחקר הבסיס הנוירוקוגניטיבי של קוגניציה נומרית, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

בשני העשורים האחרונים נכרת התעניינות רבה בחקר קוגניציה נומרית. הכוון המרכזי במחקר מתאפיין בניסיון להבין את התהליכים המנטליים הבסיסיים המעורבים מחד ואת המבנים המוחיים המשרתים אותם מאידך. היינו, הנסיון הוא לאתר את אבני הבניין שעל בסיסן נבנית הבנת חשבון. המחקר מקיף גם פגמים והתפתחות לא תקינה. כאן, מופיעה קריאה לחקות את ההצלחות בתחומים אחרים, כמו חקר קשיי הקריאה, דיסקליסיה, על מנת להבין את הבסיס לפגמים בחשבון ולאפשר תכניות טיפול מתאימות. אנו נתחיל בהצגה של מושגים בסיסיים ואחר כך נעבור לדיסקלקוליה התפתחותית.

תהליכים בסיסיים

מקובל לחשוב שמספר תהליכים מנטליים בסיסיים מעורבים בזהוי גודל של קבוצה או חפץ.

מניה

כאשר נבדקים מתבקשים לדווח על מספר הפריטים המוצגים להם, זמן התגובה (ז"ת) עולה והדיוק יורד ככל שמספר הפריטים עולה. אולם, העליה בז"ת אינה רציפה, כאשר מספר הפריטים קטן מחמש הנבדקים מדייקים ומציגים שינוי מזערי בז"ת. לעומת זאת, כאשר מספר הפריטים עולה מ 6 ואילך, הדיוק יורד ומופיעה עליה חדה בז"ת (Kaufman, Lord, Reese, & Volkman, 1949; Piazza, Giacomini, Le Bihan, & Dehaene, 2003; Piazza,

Mechelli, Butterworth, & Price, 2002). בהתאם מקובל להבחין בין שני תהליכים לזיהוי גודל קבוצה, האחד הוא סוביטיזינג ומשמש לטווח קטן של גרויים (עד 4 פריטים) והשני הוא מניה המשמשת כאשר מספר הפריטים גדול יחסית.

בסוביטיזינג מדובר על תפיסה מהירה של מספר קטן של פריטים. מהירות התגובה עולה בכ 50 אלפיות שניה (א"ש) לכל פריט. (Trick & Pylyshyn, 1994; Trick & Pylyshyn, 1993). סוביטיזינג הוא תהליך מהיר מדויק, אוטומטי ולא קשבי. לעומת זאת, מניה היא תהליך סדרתי ממושך בו מושקע קשב. במניה ז"ת עולה בלמעלה מ 200 א"ש לכל פריט נוסף. הראשונים אשר היצעו את המושג סוביטיזינג, הנגזר מהמילה הלטינית *subitus* שמשמעה "פתאומי" היו Kaufman ושותפיו (Kaufman et al., 1949) אולם הם לא היו הראשונים שעסקו בנושא. תשעים שנה לפני Hamilton (1859) התעניין בשאלה כמה עצמים יכולה המערכת הקוגניטיבית להקיף בבת אחת? התשובה שלו היתה שמדובר בשישה פריטים (עמודים 176-177). Kaufman ושותפיו הגיעו למסקנה שונה במעט. הם הציגו לנבדקים מספר משתנה של פריטים (בין 1 ל 200 נקודות) למשך 200 אלפיות שניה וביקשו מהם להעריך את מספר הפריטים, ולציין מה רמת הביטחון שלהם בתשובתם. הם הציגו שהשינוי המשמעותי בביצוע הנבדקים בהתייחס למהירות התגובה הדיוק והביטחון שלהם משתנים באופן משמעותי סביב 6 פריטים. זמן התגובה קצר יותר, הדיוק והביטחון גבוהים יותר כאשר מספר הפריטים קטן מ 6. לפיכך הם הציגו ש"סוביטיזינג הוא מה שקורה כאשר מספר הפריטים קטן מ 6" (עמ' 521). היום מוסכם שטווח הסוביטיזינג הוא של בין 3 ל 4 פריטים ואינו 6 או 5.

כפי שצוין, יש חוקרים הסבורים שסוביטיזינג ומניה הם שני תהליכים שונים איכותית המבוססים על מנגנונים שונים. לעומת זאת, יש אחרים הסבורים שמדובר בשני קצוות של אותו רצף (Balakrishnan & Ashby, 1991, 1992). נסיונות לתת מענה למחלוקת זו באמצעות הדמיה מוחית הובילו לתוצאות מעורבות. היו שמצאו שאזורים מחויים שונים גילו פעילות בתגובה לטווחים שונים של גרויים (Sathian et al., 1999): גרויים בטווח הסוביטיזינג הפעילו בעיקר את

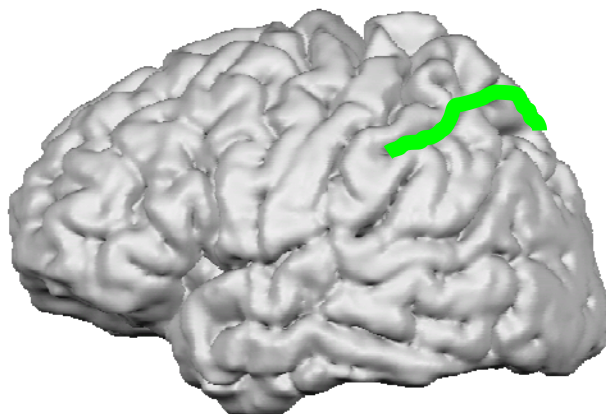
קליפת המוח העורפית אמצעית (middle occipital extrastriate cortex) והחלק העליון של האונה הקדקדית (parietal), ואילו המניה הפעילה רשת דו-צדדית רחבה של אזורים שהכילה את האונה העורפית, החלק העליון של האונה הקודקדית, ואזורים באונה הקדמית הימנית. לעומתם, היו שמצאו שאותם אזורים הופעלו גם עבור מניה וגם עבור סוביטיזינג (Piazza et al., 2002): רשת של אזורים שכללה את האונה הערפית המרכזית, העמק התוך קודקודי האחורי (posterior intraparietal sulcus) למרות שהאקטיבציה היתה גדולה יותר עבור גרויים בטווח המניה מאשר בטווח הסוביטיזינג. תוצאות אלה תומכות בטענה שההבדלים בין טווחי הגרויים היא כמותית ולא איכותית והם נשענים על אותה רשת עצבית המגיבה בעצמה שונה לטווחי הגרויים השונים.

מאמץ מחקר נכר הופנה לבדיקת ההבדלים בין סוביטיזינג למניה אולם התוצאות, הן במסגרת המחקר ההתנהגותי והן במסגרת המחקר המוחי אינם מאפשרים לקבוע האם מדובר בתהליכים המבוססים על מנגנונים נפרדים או שמדובר בשני קצוות של אותו רצף. עם זאת, קיימת הסכמה שיש הבדל משמעותי בין שני התהליכים.

השוואת כמויות ומספרים

בזהו גודל וכמות מעורבים גם תהליכים של השוואה. היינו, תהליכים המובילים להחלטה באיזו קבוצה יש יותר עצמים או איזה עצם או מספר גדול יותר מבין העצמים המוצגים. נניח שמוצגות שתי ספרות או שני מערכי נקודות להשוואה. לדוגמא, מוצגות הספרות 3 ו 5 והנבדק מתבקש לומר מהר ככל האפשר איזו ספרה גדולה יותר בערכה הנומרי. במקרה של נקודות מוצגות שתי קבוצות של נקודות והנבדק מתבקש לומר באיזו קבוצה יש יותר נקודות. התפקיד הזה אינו קשה ונבדקים נותנים תשובותיהם מהר. אולם, כאשר מודדים ז"ת גם בוגרים מיומנים מציגים **אפקט מרחק**. כלומר, התגובה מהירה יותר כאשר המרחק בין הגרויים המשווים גדול יותר (למשל 8 ו 3) מאשר כאשר המרחק ביניהם הוא קטן (למשל 3 ו 5).

התופעה הזאת, אינה אופיינית רק למספרים, היא מופיעה עבור גרויים רבים אחרים כמו השוואת גובה של צלילים, השוואת בהירויות של גרויים ועוד (Moyer & Landauer, 1967). באשר לגרויי ספרות הוצע (Dehaene, 1997) שהאפקט נובע מכך שמספרים מיוצגים במערכת הקוגניטיבית על ציר מנטלי ועליו מספרים קרובים מיוצגים קרוב זה לזה ואילו מספרים רחוקים מיוצגים רחוק זה מזה. על כן, קשה להבחין בין מספרים קרובים וקל להבחין בין מספרים רחוקים, ויכולת ההבחנה הזאת משתקפת במהירות התגובה של הנבדקים. ראוי לשים לב, שהמרחק מן הגרויים מעובד אף שאין הוא אמור להשפיע על ההחלטה 8 גדול מ 3 ו 5 גדול מ 3 ולעובדה ש 8 גדול יותר אין כל משמעות לגבי המטלה בה מדובר. למרות זאת, המידע (הלא-רלבנטי) על הפער מעובד על ידי הנבדקים ומשפיע על החלטתם. כאשר מידע לא רלבנטי משפיע על תגובות הנבדקים מקובל לחשוב שמידע זה מעובד באופן אוטומטי. כלומר, העיבוד אינו צורך משאבי קשב או צורך משאבי קשב מועטים יחסית, והוא מתרחש גם כאשר הנבדק מעוניין להתעלם מן המידע הזה. אף שההבט שצוין (אי הרלבנטיות למטלה) מקובל כמאפיין תהליכים אוטומטיים יש הדורשים הבטים נוספים על מנת להגדיר תהליך כאוטומטי. למשל, דרישה שעל התהליך להתרחש ללא כוונה כלל (Tzelgov, Henik, Sneg, & Baruch, 1996)



ציור מספר 1 מבט צדדי על המחצית השמאלית של המוח. העמק התוך קודקודי (IPS) מסומן בירוק.

מחקרים שבחנו את מעורבות מוחית בהשוואת ספרות הציעו שהעמק התוך קודקודי (intraparietal sulcus – IPS) (ראה ציור מספר 1) מעורב בהשוואת גדלים של ספרות (Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003; Fias, Lammertyn, Reynvoet,

(Dupont, & Orban, 2003) ושאזור זה מכיל ייצוג אבסטרקטי (לא מושפע מאופן הצגת הגרוי) של כמויות (Dehaene, Dehaene-Lambertz, & Cohen, 1998; Dehaene et al., 2003; Piazza, Pinel, Le Bihan, & Dehaene, 2007) אף שברור שה IPS מעורב בעיבוד מידע נומרי, הוצע שמבנים מוחיים נוספים מעורבים גם כן בעיבוד כזה (Cohen Kadosh et al., 2005; Gobel, Walsh, & Rushworth, 2001; Kaufmann et al., 2006; Nieder, Freedman, & Miller, 2002) ושאופן ייצוג הכמויות יכול להשפיע על הפעילות ב IPS (Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, Kaas, Henik, & Goebel, 2007). למשל, מחקרי הדמיה מוחית מצביעים על כך שהרכס הזוויתי (Angular gyrus) ביחד עם האזור הקדמי של האונה השמאלית, מעורבים בהגייה של מספרים ותרגילים פשוטים, בקישור של כמויות עם המספרים המייצגים אותם (למשל 3 יחידות עם הספרה הכתובה "3" או הספרה המושמעת "שלוש") ובפתרון מהיר ואוטומטי (כלומר שאינו דורש חישוב) של תרגילים פשוטים כגון $2 \times 3 = 6$ (Venkatraman, Ansari, & Chee, 2005). עבודות מהשנים האחרונות מצביעות על קשר הדוק בין ה IPS והרכס הזוויתי. למשל במחקר שבו נעשה שימוש בהדמיה מוחית, מרגרט דלזר ושותפיה (Delazer et al., 2003) אימנו מספר משתתפים בתרגילי כפל מורכבים (למשל $7 \times 12 =$). הם מצאו שלאחר מספר שבועות של אימון, יש מעבר מפעילות ב IPS, שהיתה קיימת לפני האימון, לפעילות מוגברת ברכס הזוויתי השמאלי לאחר האימון. ממצא זה מצביע על מעבר מפיתרון תרגילים שמבוסס על עיבוד של כמויות לפיתרון תרגילים שמבוסס על שליפה מיידית ואוטומטית של התרגיל מהזיכרון, בדיוק כפי שמילים נשלפות (ראה גם Ischebeck, Zamarian, Egger, Schocke, & Delazer, 2007; Ischebeck et al., 2006).

מיומנות ואוטומטיות בעיבוד מידע נומרי

דרך מקובלת לבחון מיומנות ואוטומטיות של תהליכים מנטליים היא בעזרת מצבי קונפליקט. אחת הדוגמאות לתפקיד כזה הוצגה בתחילת המאה הקודמת על ידי Stroop

(MacLeod, 1991; Stroop, 1935). Stroop הציג לנבדקים מילות צבע בצבעים שונים וביקש מהם לומר מהר ככל האפשר מה צבע הדיו ולהתעלם מן המילה הכתובה. למשל, כאשר הופיעה המילה אדום כתובה בירוק התשובה צריכה היתה להיות "ירוק". ניתן לדבר על חוסר תואמות בין המימדים (אדום בירוק) ועל מצב ניטרלי – לא מילה כמו סדרה של ש-ינים כתובים בירוק (ששש בירוק). במצב הלא תואם נוצר קונפליקט בין שני המימדים ואילו במצב הניטרלי המימד הלא רלבנטי מיוצג בעזרת גרוי חסר משמעות סמנטית. על כן, לא מפתיע שמתקבל הבדל בזמני התגובה כך שנבדקים מגיבים מהר יותר למצב הניטרלי מאשר למצב הלא תואם. ניתן לדבר על כך שהמילה הלא רלבנטית מפריעה לעיבוד הצבע ומאטה את תגובת הנבדקים. ניתן להוסיף עוד תנאי ניסויי בדמות מילה המופיעה בצבע שהיא מציינת. למשל, המילה ירוק בצבע ירוק. מדובר במצב תואם ואין זה מפתיע שהנבדקים מגיבים במצב זה מהר יותר מאשר במצב הניטרלי. שעה שהפער במהירות התגובה בין המצב הלא תואם למצב הניטרלי נקרא הפרעה הפער בין המצב הניטרלי למצב התואם נקרא זרוז. מצבי קונפליקט כאלה שימשו לבדיקת קשב סלקטיבי והרושם המתקבל הוא שהנבדקים נכשלים במיקוד הקשב שכן הם אינם יכולים להתעלם לחלוטין ממשמעות המילה. ראוי לשים לב שכאשר המילה מוצגת בשפה לא מוכרת האפקט לא מתקבל. כלומר, האפקט הזה מותנה במיומנות שפתית של הנבדקים, אם הם מיומנים האפקט יופיע אך כאשר אין הם מיומנים האפקט לא יופיע או יהיה קטן יחסית (Tzelgov, Henik, & Leiser, 1990). לפיכך, משמש תפקיד זה ותפקידים דומים לבדיקת המיומנות והאוטומטיות של עיבוד מימדי גרוי. תפקיד כזה נוצר עבור השוואת ספרות.

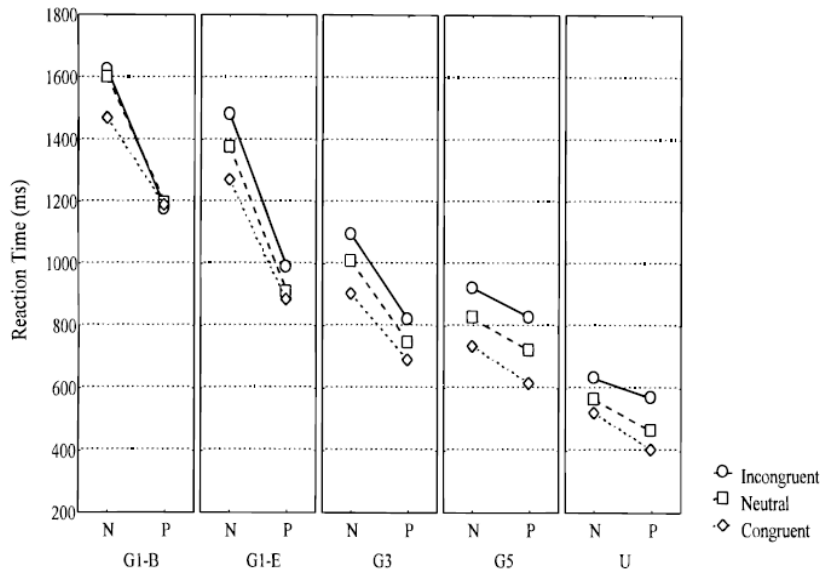


הבט מרכזי ברכישת מיומנות נומרית קשור בהבנת מערכת הסמלים המייצגים כמויות וגדלים. הספרות הן סמלים המציגים כמויות, גדלים, וכדומה. עם זאת ראוי לשים לב שלספרות עצמן יש גודל פיזי מסוים. בציור מספר 2 מודגם הרעיון הזה על ידי ספרה 8 קטנה שמטפסת על ספרה 3 גדולה. אם הספרות אמנם קשורות בייצוג של גדלים פיזיים אזי הגודל

הפיזי הזה עשוי להשפיע על התגובה של נבדקים העוסקים בהשוואת ספרות. על מנת לבדוק זאת ניתן להציג לנבדקים שתי ספרות ולשנות בו זמנית גם את ערכן הנומרי וגם את גדלן הפיזי. בנסיבות אלה כאשר הספרה שערכה גדול יותר גם גדולה יותר פיזית (למשל, 3 5) אנו מדברים על מצב תואם ולעומת זאת כאשר הספרה שערכה גדול יותר קטנה יותר פיזית (למשל, 3 5) אנו מדברים על מצב לא תואם. הניטרלי משתנה לפי התפקיד, כאשר הנבדקים מתבקשים להגיב למימד הנומרי ולהתעלם מהגדלים הפיזיים של הספרות המצב הניטרלי מיוצג על ידי שתי ספרות שונות שגדליהן הפיזיים זהים (למשל, 3 5) וכאשר הנבדקים מתבקשים להגיב למימד הפיזי ולהתעלם מערכן הנומרי של הספרות המצב הניטרלי מיוצג על ידי אותה ספרה בגדלים שונים (למשל, 5 5). לפני מספר שנים (Henik & Tzelgov, 1982) עשינו שימוש ברעיון הזה ובחנו את ההשפעה של שני המימדים האחד על השני. כצפוי, מצאנו שהמימד הפיזי משפיע על התגובה למימד הנומרי ולהפך. ההשפעה של ההתאמה בין שני המימדים על מהירות התגובה של הנבדקים נקראת **אפקט תואמות הגודל**. יתר על כן, שעה שאפקט Stroop עבור מילים אינו סימטרי, האפקט עבור ספרות הוא סימטרי. כלומר, כאשר מדובר על מילות צבע בצבע, המילה הלא-רלבנטית משפיעה על עיבוד מימד הצבע אך לא להפך. מה שנקרא "סטרוף הפוך", השפעה של הצבע הלא רלבנטי על קריאת המילה, הוא אפקט קטן מאוד ולעתים קרובות לא מובהק סטטיסטית. לעומת זאת, אפקט תואמות הגודל הוא סימטרי. הערך הנומרי של הספרות, כאשר אינו רלבנטי, משפיע על שיפוטי גודל וכמו כן, הגודל הפיזי של הספרות, כאשר אינו רלבנטי, משפיע על עיבוד המימד הנומרי. כמו אפקט המרחק, גם אפקט תואמות הגודל מערב את ה (Ashkenazi, Henik, Ifergane, & Shelef, 2008; Cohen Kadosh, Cohen IPS, Kadosh, Linden et al., 2007; Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, Schuhmann et al., 2007). (Cohen Kadosh et al., 2005; Gobel et al., 2001; Nieder et al., 2002)

בשנים האחרונות שימש אפקט תואמות הגודל לבדיקות של מיומנות השימוש במערכת הנומרית והאוטומטיות שלה (Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, Linden et al., 2007;

Cohen Kadosh & Henik, 2006; Rubinsten, Henik, Berger, & Shahar-Shalev, 2002; Szucs & Soltesz, 2007). במחקר שנערך במעבדה שלנו לפני מספר שנים (Rubinsten et al., 2002) בדקנו שינויים התפתחותיים באפקט מתחילת כיתה א' ועד לאוניברסיטה. הממצאים מוצגים בציור מספר 3. ילדים בתחילת כיתה א' (G1-Beginning), סוף

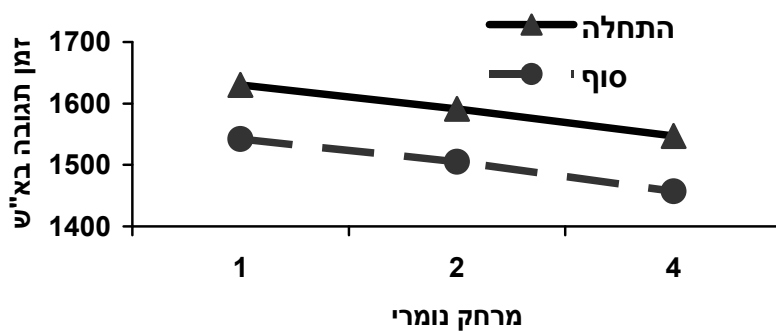


כיתה א' (G1-End), כיתה ג' (G3), כיתה ה' (G5), וסטודנטים באוניברסיטה (University), ראו בכל צעד ניסוי צמד של ספרות והתבקשו לציין, על ידי לחיצה על מתג, איזו

ספרה גדולה יותר מהר ככל האפשר. בבלוקים נפרדים הם התבקשו להתמקד בערכי הספרות ולהתעלם מהגודל הפיזי שלהן (בלוק נומרי - N) או להתמקד בגדלים הפיזיים ולהתעלם מהערכים הנומריים של הספרות (בלוק פיזיקלי - P). בציור 3 על הציר האפקטי מוצגות המטלות השונות (N או P) וכיתה. עבור כל צמד של כיתה ומטלה מוצגים שלושת תנאי הניסוי: תואם, ניטרלי ולא תואם. הציר האנכי מציג זמני תגובה בא"ש. באופן כללי זמני התגובה נעשים קצרים יותר עם העלייה בגיל. כצפוי, הסטודנטים מציגים אפקט תואמות גודל הן עבור שיפוטי גודל פיזי והן עבור שיפוטי גודל נומרי. יתר על כן, ניתן לראות שעבור כל אחת מן המטלות האפקט מרכב מזרוז (תואם קצר מניטרלי) ומהפרעה (הלא תואם ארוך מניטרלי). עבור שיפוטים נומריים הדפוס הזה של זרוז והפרעה מופיע החל מסוף כיתה א' שעה שבתחילת כיתה א' מופיע רק זרוז. חשוב יותר מבחינת העניין הנוכחי, שאפקט תואמות הגודל בבלוקים הפיזיקליים משתנה עם הגיל. הוא כלל לא קיים בתחילת כיתה א', בסוף כיתה א' הוא קטן באופן כללי ומבוסס כמעט

כולו על הפרעה ללא זרוז. בכיתה ג' הוא כבר דומה לדפוס שהופיע אצל הסטודנטים. ההתחזקות של אפקט תואמות הגודל בבלוקים הפיזיקליים עם העליה בכיתה/גיל נובעים משיפור בידע הנומרי והפנמת המערכת הסימבולית אצל הילדים. השיפור הזה מסומן על ידי אוטומטיות גדלה והולכת בעיבוד המימד הנומרי כאשר אינו רלבנטי. שתי נקודות ראויות לציון בהקשר הנוכחי

האחת קשורה בעיבוד מידע נומרי והשניה קשורה למתודולוגיה בה נעשה כאן שימוש. א) כאשר בוחנים שינויים באפקט תואמות הגודל ראוי לשאול מה קורה לאפקט המרחק. אחרי



ציור 4 - אפקט מרחק בכיתה א'

הכל, לא היינו מופתעים מאי הופעה של אפקט תואמות הגודל אם הילדים לא היו מכירים את המערכת הנומרית. על מנת לבחון זאת ניתן לבדוק שינויים באפקט המרחק עם הגיל. בדיקה של אפקט המרחק במהלך כיתה א' מורה כי אפקט המרחק קיים כבר אצל הילדים שמתחילים כיתה א' ואינו משתנה במהלך הלימודים בכיתה א', בסוף כיתה א' הוא נראה זהה לאפקט המרחק בתחילת כיתה א' (ראה ציור 4). היינו, אי הופעה של אפקט תואמות גודל בכיתה א' אינו נובע מחוסר הכרות עם המערכת הסימבולית המספרית אלא מכך שמערכת זו טרם הופנמה וטרם הפכה אוטומטית. הרושם הוא שהמערכת הנומרית שמוכרת לילדים כבר בתחילת כיתה א' ולרובם כבר בגיל הגן, מופנמת ונעשית אוטומטית יותר במהלך הלימודים בבית הספר היסודי. מחקר דומה שנערך במעבדה אחרת העלה תוצאות דומות (Girelli, Lucangeli, & Butterworth, 2000). ועוד, נראה שאפקט תואמות הגודל ואפקט המרחק אינם תלויים זה בזה ויתכן שהמערכות האחראיות על שני האפקטים האלה שונות. (ב) יתר על כן, בחינה ישירה של

אפקטים לא מאפשרת הפקת מידע מלא על ידע ועל כן יש צורך בשיטות מדידה עקיפות. במקרה הנוכחי, ניתן היה לבחון את ידע הילדים על ידי בדיקה של עיבוד מידע נומרי כאשר הוא רלבנטי, היינו בדיקת אפקט המרחק בבלוקים נומריים (כפי שהוצג לעיל ובציור 4). אילו הסתפקנו בבדיקה זו היינו מגיעים למסקנה שאין שיפר במיומנות או בידע המערכת המספרית במהלך כיתה א' ובין כיתה א' לכיתה ג'. אולם, בדיקה של עיבוד המידע הנומרי כאשר אינו רלבנטי (בדיקת אפקט תואמות הגודל) מעלה שיש שינויים משמעותיים בכיתות בית הספר היסודי. כלומר, הבדיקות העקיפות של עיבוד מידע שאינו רלבנטי מוסיפות לידע שלנו ומבהירות דברים שאחרת לא היה ניתן לעמוד עליהם.

חקר התהליכים המנטליים הבסיסיים המעורבים בקוגניציה נומרית והידע על הרקמות העצביות המשרתות את התהליכים האלה מסייע לחקר קשיים ובמיוחד לחקר ליקוי למידה המכונה דיסקלקוליה התפתחותית. אנו נפנה עתה להאיר התקדמות בחקר דיסקלקוליה התפתחותית שחלה בשנים האחרונות.

דיסקלקוליה התפתחותית

פסיכולוגים נעזרים בחקר פגמים שונים על מנת ללמוד על המערכת המנטלית המעורבת בתפקוד או התנהגות מסוימים. בהתאם, פגמים בקוגניציה נומרית נחקרים על מנת להבין את הקשיים המובילים לפגמים אלה ועל מנת לחקור קוגניציה נומרית באופן כללי. פגמים כזה הוא דיסקלקוליה התפתחותית (Developmental Dyscalculia – DD). מדובר בפגיעה בעיבוד מידע נומרי וחשבוני. אצל ילדים המאובחנים כסובלים מ DD שעורי החשבון בבית הספר מהווים אתגר שקשה להתמודד עימו. הם מתקשים בדברים שחבריהם לכיתה מוצאים פשוטים. ל DD מספר היבטים: 1) DD הינו ליקוי למידה ייחודי לתחום החשבון. היינו, ההגדרה דורשת שקריאה וכתובה יהיו בטווח הנורמלי (von Aster & Shalev, 2007). 2) DD מוגדר על ידי ציונים מאוד נמוכים במבחני הישג סטנדרטיים בחשבון (מתחת למאון השמיני או אפילו החמישי, שהינו שווה

ערך לציון תקן מתחת ל 78 (Shalev & Gross-Tsur, 2001). (3 למרות שההגדרה המדויקת של DD שונה מעט בקרב חוקרים וקלינאים שונים) (למשל מהו המבחן המתאים ביותר לאיבחון ומהו הציון המדויק שמגדיר DD), מוסכם על כולם שאחד מהקשיים שמאפיין DD באופן בולט הוא קושי בלמידה וזכירה של עובדות חשבון פשוטות (למשל, $3 + 4 = 7$) (4) הרושם הוא שמדובר בפגיעה ייחודית בתפקוד המוחי שגורמת להופעת בעיות בתהליכים בסיסיים של עיבוד מידע נומרי כמו עיבוד אוטומטי או סמוי (אימפליציטי) של כמויות או מספרים. סביר להניח ש DD מהווה תת קבוצה של הקטגוריה המכונה ב DSM-IV קושי בחשבון ועל פי ה ICD-10 של הקטגוריה המכונה קושי ייחודי במיומנות חשבון. הסיבה היא שהקטגוריות הדיאגנוסטיות האלה ('קושי בחשבון' ו'קושי ייחודי במיומנות חשבון') מכילות בנוסף ל DD גם יחידים שלהם קושי בהפעלת פרוצדורות חשבוניות ללא קשיים ייחודיים בעיבוד נומרי (למשל, כפל, חילוק ארוך, תהליכי המרה - העברה ופריטה). ראוי לשים לב ש DD שלא טופל ממשיך גם בבגרות (Wilson & Dehaene, 2007). סטודנטים באוניברסיטה הסובלים מ DD דורשים התערבות מרוכזת, אישית וממוקדת (דומה לזו הניתנת במקרה של קשיים בעיבוד פונולוגי) על מנת לשפר את הכישורים הבסיסיים שלהם, את הבנת מושגי הגודל, הכמות ואת האוטמטיות של העלאת ושימוש בעובדות חשבוניות פשוטות. ההערכות הנוכחיות מצביעות שכ 5-6% מהילדים יסבלו מקשי למידה ייחודי בחשבון. האומדן הזה בחשבון (Shalev & Gross-Tsur, 2001; Shalev, Manor, Auerbach, & Gross-Tsur, 1998), דומה לאומדן שניתן עבור דיסלקסיה התפתחותית (Wilson & Dehaene, 2007). אולם, בניגוד לדיסלקסיה, הקשי בחשבון קיבל תשומת לב מעטה בלבד אצל קלינאים וחוקרים כאחד למרות החשיבות של ידע בחשבון להצלחה בחיים.

מחקר רב יחסית הוקדש לחקר פונקציות קוגניטיביות כלליות כמו: זכרון עבודה פגום (Geary, 1993), פגמים במערכות קשב (Shalev, Auerbach, & Gross-Tsur, 1995), פגמים תפקודיים חזותיים-מרחביים (Bull, Johnston, & Roy, 1999), ופגמים באחזור מידע

כמו עובדות אריתמטיות מן הזכרון (Kaufmann, Lochy, Drexler, & Semenza, 2004). לאחרונה הוצע (Ansari & Karmiloff-Smith, 2002), שחקר DD צריך להתמקד באופרציות המנטליות הבסיסיות של הקוגניציה הנומרית. מחקר כזה אמור להאיר את האופרציות המנטליות הפגומות ועשוי לסייע לזרוז האבחון ויתכן אף לתכניות שיקום עבור גילאים צעירים.

פגמים מנטליים

נראה שפגם אצל DD הוא ספציפי למערכת הסמלים הספרתית. רושם זה נתמך על ידי מחקר שהתמקד בתהליכים נומריים בסיסיים, כמו אלה שנסקרו קודם לכן. מחקר שפורסם לפני מספר שנים (Landerl, Bevan, & Butterworth, 2004) הציג תוצאות של ספירת נקודות שאפשרו בחינה של טווח הסוביטיזינג והמנייה בנפרד. הרושם הוא שבטווח הסוביטיזינג (נקודה אחת עד שלוש נקודות) הפונקציה המתארת את הביצוע של DD היתה תלולה יותר מאשר הפונקציה שתארה ביצוע של נבדקי ביקורת ונבדקים שסבלו מדיסלקסיה. אולם, ההבדל הזה לא היה מובהק סטטיסטית. עבור טווח המנייה (4-10), ההבדלים בין הקבוצות היו מובהקים שולית ושוב נראה היה שהפונקציה של ה DD היתה תלולה מזו של נבדקי הביקורת. לאחרונה ערכנו מחקר על ילדים בכיתות ג' וד' הסובלים מ DD ועל ילדי בקורת מושווים בגיל ל DD (Ashkenazi, Mark-Zigdon, & Henik, in preparation). למשתתפים הוצגו מערכים של נקודות למשך 200 א"ש והם התבקשו להחליט, מהר ככל האפשר, מה מספר הנקודות שהוצגו. גם ז"ת וגם הדיוק הראו: (1) טווח הסוביטיזינג של DD היה מוגבל ל 3 פריטים שעה שהטווח של נבדקי הביקורת היה 4; (2) ילדים הסובלים מ DD היו איטיים יותר ועשו יותר טעויות מאשר נבדקי הביקורת בקצה העליון של טווח המנייה (עבור בין 7 ל 9 נקודות); (3) לא היה הבדל בין שתי הקבוצות בקצה התחתון של טווח המנייה (עבור 5 ו 6 נקודות). ראוי לשים לב שהתוצאה האחרונה הזאת (עבור 5-6 נקודות) מורה שהפגם בביצוע

אצל DD בטווח המניה אינו תוצאה של האטה כללית שמדרדרת עוד יותר בטווח המניה אלא היא ספציפית לקושי במניה.

באשר להשוואות של גרויים התוצאות אינן לגמרי ברורות. Berch ו Koontz (1996) השתמשו בהשוואה של נקודות ומצאו שילדים הסובלים מקשיי למידה בחשבון (ילדים המצויים מתחת למאון ה 25 ב Iowa Test of Basic Skills) מתקשים בטווח הסוביטיזינג. הם משתמשים באסטרטגיות מניה איטיות עבור מערכי נקודות קטנים של שלוש נקודות. Rousselle ו Noel (2007) מצאו שילדים הסובלים מ DD היו איטיים מחבריהם שאינם סובלים מ DD כאשר עסקו בהשוואה של ספרות ערביות שעה שלא היה הבדל בין הקבוצות לגבי השוואות של גרויים לא סימבוליים (קווים). לאחרונה פורסמה עבודה של הדמיה מוחית על ילדים הסובלים מ DD (Price, Holloway, Räsänen, Vesterinen, & Ansari, 2007). לילדים הוצגו שתי קבוצות ריבועים והם התבקשו להחליט איזו קבוצה מכילה יותר ריבועים. לא היה הבדל בין DD לבין הילדים שלא סבלו מ DD במהירות התגובה אולם היה הבדל בדיוק, הילדים הסובלים מ DD דייקו פחות. מחקר שנערך לאחרונה במעבדה שלנו (Ashkenazi, Mark-Zigdon, & Henik, submitted) בחנו ילדים בכיתות ג' וד' והשוונו ילדים הסובלים מ DD לאלה שאינם סובלים מהקושי הזה. עבור השוואות של מספרים חד-ספרתיים, הביצוע של שתי קבוצות הנבדקים היה דומה בז"ת אך, בדומה למחקר של Price ושותפים שתואר לעיל, היה הבדל באחוזי הטעויות – DD עשו יותר טעויות. בנוסף, ילדים התבקשו להשוות מספר דו ספרתי למספר קבוע (למשל, האם המספר שיוצג גדול או קטן מ 55). במקרה זה אלה הסובלים מ DD הציגו אפקט מרחק גדול יותר מאשר נבדקי הבקורת. מה המשמעות של אפקט מרחק גדול יותר? יתכן שילדים עם DD נזקקים לאסטרטגיות השוואה ראשוניות ואיטיות שאינן בשימוש אצל הילדים שהתפתחותם תקינה.

מה קורה

לעיבוד מידע נומרי

כאשר הוא אינו

רלבנטי? בדקנו

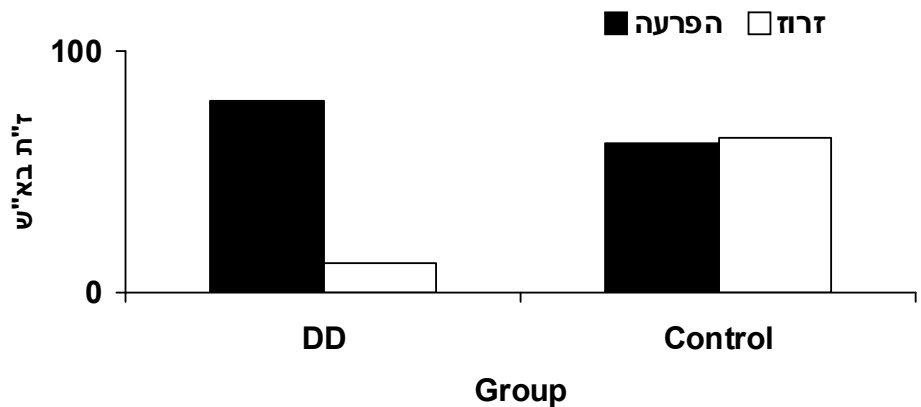
את אפקט תואמות

הגודל אצל

סטודנטים

הסובלים מ DD.

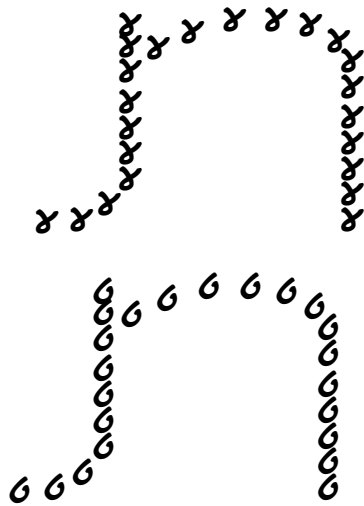
במחקר אחד



ציור 5 - זרוז והפרעה אצל DD וביקורת

(Rubinsten & Henik, 2005) מצאנו שסטודנטים אלה גילו אפקט תואמות גודל קטן, מאשר אצל סטודנטים שאינם סובלים מקשי למידה כלשהו, כאשר עסקו בהשוואות של גדלים פיזיים והתעלמו מהערך הנומרי. בנוסף לכך, האפקט שהתגלה אצל DD היה מבוסס על הפרעה ללא זרוז שעה שהאפקט אצל קבוצת הביקורת היה מבוסס הן על הפרעה והן על זרוז. דפוס זה מזכיר את הדפוס שנמצא אצל תלמידי בית ספר יסודי בסוף כיתה א', כפי שתואר קודם (ראה ציור 3). רכיבי ההפרעה והזרוז בקבוצת הביקורת ובקבוצת ה DD מוצגים בציור מספר 5. דפוסים דומים נמצאו בשתי מטלות נוספות שהוצגו בבלוקים נפרדים לשתי קבוצות הנבדקים. בבלוק אחד הנבדקים התבקשו להשוות שתי ספרות שהיו שונות בכהות שלהן והנבדקים התבקשו להחליט איזו ספרה כהה יותר. בבלוק נוסף הוצגו להם שתי ספרות שהמקום המרחבי שלהן היה שונה, אחת הופיעה מעל לשניה, והנבדקים התבקשו להחליט איזו ספרה גבוהה יותר. בשני המקרים, כאשר המימד הנומרי היה לא רלבנטי והנבדקים התבקשו להתעלם ממנו, אפקט תואמות הגודל אצל DD היה חסר את רכיב הזרוז והיה קטן מאשר אצל נבדקי הביקורת. הצענו כי הפגם אצל DD הוא בקשר בין גדלים או כמויות לבין מערכת הסמלים הנומרית.

ניתן לשאול האם הקושי שצוין מוגבל למערכת הנומרית או שהוא משותף למערכות סמלים אחרות? על מנת לבדוק זאת בחנו (Rubinsten & Henik, 2006) שלוש קבוצות של סטודנטים – כאלה הסובלים מ-DD, כאלה הסובלים מדיסלקסיה התפתחותית, וקבוצת ביקורת. בדקנו שני



ציור 6: גלובלי לעומת לוקלי

תפקידים, האחד היה התפקיד של הסטרופ הנומרי שבדרך כלל יוצר את אפקט תואמות הגודל והשני שדרש הפנית קשב לרמה גלובלית או לוקלית של גרוויי אותיות, תפקיד זה מבוסס על הצעה של דוד נבון (Navon, 1977). לנבדקים הוצגה בכל צעד ניסוי אות גדולה (רמה גלובלית של הגרווי) שהיתה בנויה מאותיות קטנות (רמה לוקלית של הגרווי), כמו ת בנויה ממספר גדול של ע קטנים (ראה ציור 6). האותיות הגדולות יכולות היו להיות מרכבות מאותיות דומות להן בהגוי (למשל, ת בנויה מ ט-ים), מאותיות שונות מהן בהגוי (למשל, ת בנויה מ ע-ים), או מלא-אותיות (צורות גיבסון הבנויות

מצרוף שברי אותיות ומספרים שאינן מוכרות לנבדקים). בבדיקות נפרדים, הנבדקים התבקשו לומר מהר ככל האפשר מהי האות הגדולה ולהתעלם מהאותיות הקטנות או להגיב לאותיות הקטנות ולהתעלם מן האות הגדולה. הצפיה היתה שיהיה קל יותר להתעלם מן הרמה הלא-רלבנטית כאשר לאות הלא רלבנטית צליל שונה מזה של האות הרלבנטית. ציפנו לקבל דיסוציאציה כפולה. היינו, DD יראו קושי בתפקיד הסטרופ הנומרי אך לא יראו כל קושי בתפקיד הגלובלי/לוקלי ואילו הנבדקים הסובלים מדיסלקסיה התפתחותית יגלו דפוס הפוך – אפקט דומה לביקורת בסטרופ הנומרי לצד אפקט שונה בתפקיד הגלובלי/לוקלי. הממצאים תאמו את הצפיה הזאת. DD הראו אפקט תואמות גודל מוקטן וחסר זרוז שעה שהן נבדקי הביקורת והן אלה שסבלו מדיסלקסיה התפתחותית הראו אפקט תואמות גודל כמקובל המבוסס על זרוז והפרעה. בתפקיד האותיות נבדקי הביקורת ואלה הסובלים מ-DD הראו האטה בתגובה כאשר האותיות

הלא רלבנטיות והרלבנטיות דמו בהגוי לעומת הצורות הלא מוכרות או כאשר האותיות היו פשוט שונות בהגוי. לעומת זאת הסטודנטים הסובלים מדיסלקסיה התפתחותית הציגו אפקט קטן יחסית של האותיות הלא רלבנטיות. כלומר, יש לנו פה דיסוציאציה כפולה בין עיבוד מידע נומרי לבין עיבוד אותיות. DD מתקשים בעיבוד מידע נומרי ולא מגלים כל קושי עם מערכת האותיות. שעה שאלה הסובלים מדיסלקסיה התפתחותית מתקשים בעיבוד אותיות אך לא בעיבוד ספרות. דפוס זה של תוצאות תומך בטענה שהפגם אצל DD הוא ספציפי למערכת הסמלים הספרתית ואינו משותף למערכות סמלים אחרות.

רקמות מוחיות המעורבות ב DD

מספר ממצאים מצביעים על הנסיבות הביולוגיות של DD. (Isaacs, ושותפיו, Isaacs, Edmonds, Lucas, & Gadian, 2001) מצאו שאזור מסוים של חומר אפור (תאי עצב), בחלק התחתון של האונה הקודקודית השמאלית, היה קטן אצל ילדים שנולדו פגים במשקל נמוך ובגיל בית ספר גילו קשיים בחשבון, מאשר אצל ילדים שנולדו עם משקל נמוך אך לא גילו כל קשי בחשבון. במבחן סטנדרטי של חשבון הילדים האלה השיגו ציונים נמוכים מהציונים אותם ניתן היה לנבא על בסיס רמת האינטליגנציה הכללית שלהם. במחקר אחר (Molko et al., 2003) השתתפו נבדקות עם סינדרום טרנר, סינדרום גנטי הנובע מחסר חלקי או שלם של אחד משני כרומוזומי X בפנוטיפ הנשי. הסינדרום הזה מאופיין על ידי קושי בתפיסה חזותית-מרחבית, בעיבוד מידע נומרי, ובהעדר פיגור וקושי מילולי. Molko ושותפיו דווחו שה IPS הימני אצל נבדקות אלה היה קצר יותר מה IPS השמאלי והיה קטן יותר ובעל שונות גדולה יותר מאשר ה IPS של נבדקות ביקורת.

עדות ישירות יותר למעורבות של ה IPS ב DD נמצאו במחקרים נוספים. אנו (Cohen, Kadosh, Cohen Kadosh, Schuhmann et al., 2007) פגענו באופן זמני ב IPS ובחנו שינויים באפקט תואמות הגודל. הפגיעה הזמנית במוח נעשתה על ידי שימוש בטכניקה המכונה

transcranial magnetic stimulation או בקצרה TMS. בטכניקה זו מפעילים שדה מגנטי בעל עוצמה סמוך לגולגולת ועל ידי כך גורמים לפגיעה זמנית ברקמה שמתחת לגולגולת. על מנת להציג את ה TMS לאזור המתאים ערכנו תחילה בדיקה של הדמיה מוחית (fMRI) אצל כל המשתתפים. כצפוי אפקט תואמות הגודל עורר אצל כל הנבדקים את ה IPS אולם האזור שהופעל וגודלו היו שונים אצל הנבדקים השונים. וכך, לגבי כל נבדק ה TMS הוצג לאורך ה IPS במקום שהתאים למה שנמצא בהדמיה המוחית. מצאנו שפגיעה זמנית ב IPS הימני ולא השמאלי מלווה בפגיעה באפקט תואמות הגודל. הפגיעה הזאת דומה לזו שנמצאה קודם לכן במחקר של רובינסטיין ושותפיה כפי שצינו קודם. מחקר נוסף (Price et al., 2007) בחן ילדים בכיתות ו' ו ז' בפינלנד והשווה ילדים הסובלים מ DD וילדים שאופיינו בהתפתחות נורמלית. בכל צעד בניסוי הוצגו לילדים שתי קבוצות של ריבועים והם התבקשו לציין מהר ככל האפשר איזו קבוצה מכילה יותר ריבועים. התוצאות ההתנהגותיות גילו השפעה גדולה יותר של מרחק נומרי על דיוק, אך לא על זמני תגובה, אצל DD לעומת נבדקי הביקורת. הדמיה מוחית גילתה אפקט מרחק גדול יותר בקבוצת הביקורת מאשר בקבוצת ה DD ב IPS הימני. מחקר נוסף שפורסם לאחרונה (Rotzer et al., 2008) בחן הבדלים במבנים מוחיים אצל ילדים הסובלים מ DD וילדים המאופיינים על ידי התפתחות תקינה. בקבוצה ה DD נמצאה ירידה בחומר האפור יחסית לקבוצת הביקורת ב IPS הימני, ובמספר מבנים מוחיים נוספים בקדמת המוח – anterior cingulate gyrus, left inferior frontal gyrus וב middle frontal gyrus בשתי ההמיספרות המוחיות. כמו כן נמצא פחות חומר לבן (רקמת תמיכה) אצל DD מאשר אצל ביקורת באונה הקדמית השמאלית ובאזור parahippocampal gyrus בצד ימין.

שונות במופע הקושי בחשבון ותחלואה נלווית

נראה שילדים שאובחנו כסובלים מ DD מתקשים בהוצאה לפועל של תהליכים בסיסיים הנדרשים לחשיבה חשבונית. יתר על כן, הקשיים האלה נראים קשורים לפגיעה ב IPS. אולם,

חשוב לזכור שמבנים מוחיים אחרים נמצאו קשורים לתהליכים בסיסיים אלה (Kaufmann et al., 2006) ומבנים אלה נמצאו אמנם פגומים בילדים הסובלים מ DD (Rotzer et al., 2008).

מה משמעותה של פגיעה ב IPS? בסקירת ספרות שפורסמה לפני מספר שנים הציג Walsh (2003) שלאונה הפריאטלית תפקיד בעיבוד גודל בתחומים שונים, "אני מציע כאן שזמן, מרחב וכמות הנם חלק ממערכת כללית של גודל." כלומר, אפשר שפגיעה ב IPS תוביל לקושי בעיבוד גודל או כמות ובקשרים בין גדל לבין מערכת הסמלים האמורה לסמן גדלים. זה עשוי להיות מקור משמעותי לקושי עבור הילדים ובסופו של דבר להוביל ל DD. יתר על כן, בדיון שלנו עד כה בחנו בעיקר עבודות שחקרו DD טהור שלא ערב פגיעות נוספות (כמו קושי בקריאה). אולם, באופן דומה לליקויי למידה אחרים, ההתנהגות של DD היא הטרוגנית ובמקרים רבים ילדים הסובלים מ DD סובלים גם מליקויי למידה אחרים (Rubinsten & Henik, 2009). אנו יודעים כבר שנים רבות שה IPS ומבנים מוחיים קרובים אליו עוסקים בעיבוד מידע אודות מיקומם המרחבי של חפצים (Mishkin, Ungerleider, & Macko, 1983; Ungerleider & Haxby, 1994) ויש להם תפקיד בתנועת גפיים מכוונת ראייה (Goodale, Milner, Jakobson, & Carey, 1991). אולם, הידע המצטבר מורה שה IPS מעורב גם בתהליכים קוגניטיביים נוספים (Hubbard, Piazza, Pinel, & Dehaene, 2005; Husain & Nachev, 2007). יתר על כן, האונה הקודקודית מעורבת בהבטים שונים של קשב. ה IPS והחלק העליון של האונה הקודקודית (superior parietal lobe – SPL) מעורבים בהפניית קשב (Corbetta & Shulman, 2002; Sapir, d'Avossa, McAvoy, Shulman, & Corbetta, 2005). בנוסף, ל IPS תפקיד בקשב לא מרחבי (Husain & Rorden, 2003) בברירה של גרויים (Cohen & Kadosh, Cohen Kadosh, Linden et al., 2007). לפיכך, פגיעה ב IPS עלולה לגרום לקושי בעיבוד מידע נומרי ובנוסף לפגיעה בקשב ובתהליכים מנטליים נוספים המערבים את המבנה הזה. מצב זה יראה כתחלואה נלווית (comorbidity). אולם, במקרה זה, הפגמים האלה נובעים מפתולוגיה מוחית יחידה ולא מפתולוגיות מוחיות מרובות כפי שניתן היה לחשוב לאור מגוון

הפגמים ההתנהגותיים. חשוב לציין שפגיעה באזורים מוחיים אחרים כמו הרכס הזוויתי או חלקים מקליפת המוח הקדמית, עלולים לפגוע גם הם במיומנויות חשבוניות בגלל המעורבות שלהם בעיבוד מידע נומרי. כפי שידוע לרבים DD וליקויי למידה אחרים הם הטרוגניים מאוד ולמעשה ניתן לומר כי הטרוגניות היא הכלל ולא היוצא מן הכלל. לפיכך, לא יפלא שחלק נכבד מן הילדים הסובלים מ DD סובלים גם מתחלואה נלווית כמו פגמים בקשב (ADHD) או קריאה (דיסלקסיה התפתחותית). לאחרונה עסקנו בעניין זה ובמנגונים המוחיים והקוגניטיביים המעורבים (Rubinsten & Henik, 2009).

סיכום

המטרה היא חקר התהליכים הבסיסיים המעורבים בקוגניציה נומרית ופגמים ב DD. חשוב לשים לב שחוקרים בוחנים את התהליכים האלה לא רק כאשר הם נדרשים לתפקיד אלא גם כאשר הם אינם רלבנטיים למטלה בה מדובר. במקרים רבים, פגמים אינם מתגלים כאשר משתתפים ממקדים את תשומת הלב שלהם במטלה אלא כאשר ההבט המסוים המעניין את החוקר אינו רלבנטי למטלה. במקרה זה, ההיבט הלא רלבנטי מעובד רק אם הוא אוטומטי. אנו מציעים שתהליכים אוטומטיים אלה עלולים להיות פגומים ב DD ונזק כזה עלול לא להתגלות כאשר הנבדקים מתמקדים בגרוי כך שהעיבוד אינו אוטומטי.

סקרנו עבודות שעסקו בפסיכוביולוגיה של קוגניציה נומרית. עבודות אלה הקיפו מחקרים התפתחותיים ומחקרים במבוגרים בלבד ועשו שימוש בטכנולוגיות שונות שסייעו לצפות במגוון ההיבטים של המעורבות המוחית בקוגניציה נומרית. שני דברים הנחו אותנו: כמו רבים אחרים אנו מתעניינים בחידת הקשר בין המוח להתנהגות, בנוסף, אנו מעוניינים לתרום להבנת הקוגניציה האנושית. בשנים האחרונות, הופיעו ויכוחים שונים לגבי חשיבות חקר המוח לתאוריה הקוגניטיבית (Posner, 2003; Wilkinson & Halligan, 2004). אנו מקווים שהראנו כי חקר המוח יכול לתרום להבנת המערכת הקוגניטיבית (ראה גם Berger, Tzur, & Posner, 2006).

Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, Linden et al., 2007; Cohen Kadosh & Henik,
(2007). אנו מציעים כי תהליכים קוגניטיביים ומבנים מוחיים צריכים להיות נחקרים במשולב כדי
לקבל נתונים תקפים שיקדמו את החשיבה שלנו לגבי המערכת הקוגניטיבית באופן כללי ולגבי
קוגניציה נומרית באופן ספציפי.

- Ansari, D., & Karmiloff-Smith, A. (2002). Atypical trajectories of number development: a neuroconstructivist perspective. *Trends in Cognitive Sciences*, 6, 511-516.
- Ashkenazi, S., Henik, A., Ifergane, G., & Shelef, I. (2008). Basic numerical processing in left intraparietal sulcus (IPS) acalculia. *Cortex*, 44, 439-448.
- Ashkenazi, S., Mark-Zigdon, N., & Henik, A. (in preparation). Subitizing and counting in developmental dyscalculia.
- Ashkenazi, S., Mark-Zigdon, N., & Henik, A. (submitted). Numerical distance effect in developmental dyscalculia.
- Balakrishnan, J. D., & Ashby, F. G. (1991). Is subitizing a unique numerical ability? *Perception & Psychophysics*, 50, 555-564.
- Balakrishnan, J. D., & Ashby, F. G. (1992). Subitizing: Magical numbers or a mere superstition? *Psychological Research*, 54, 80-90.
- Berger, A., Tzur, G., & Posner, M. I. (2006). Infant brains detect arithmetic errors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103, 12649-12653.
- Bull, R., Johnston, R. S., & Roy, J. A. (1999). Exploring the roles of the visual-spatial sketch pad and central executive in children's arithmetical skills: Views from cognition and developmental neuropsychology. *Developmental Neuropsychology*, 15, 421-442.

- Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., Kaas, A., Henik, A., & Goebel, R. (2007). Notation dependent and independent representations of numbers in the parietal lobes. *Neuron*, *53*, 307-314.
- Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., Linden, D. E. J., Gevers, W., Berger, A., & Henik, A. (2007). The brain locus of interaction between number and size: A combined functional magnetic resonance imaging and event-related potential study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*, 957-970.
- Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., Schuhmann, T., Kaas, A., Goebel, R., Henik, A., & Sack, A. T. (2007). Virtual dyscalculia induced by parietal-lobe TMS impairs automatic magnitude processing. *Current Biology*, *17*, 689-693.
- Cohen Kadosh, R., & Henik, A. (2006). A common representation for semantic and physical properties: A cognitive-anatomical approach. *Experimental Psychology*, *53*, 87-94.
- Cohen Kadosh, R., & Henik, A. (2007). Can synaesthesia research inform cognitive science? *Trends in Cognitive Sciences*, *11*, 177-184.
- Cohen Kadosh, R., Henik, A., Rubinsten, O., Mohr, H., Dori, H., van de Ven, V., Zorzi, M., Goebel, R., & Linden, D. E. J. (2005). Are numbers special? The comparison systems of the human brain investigated by fMRI. *Neuropsychologia*, *43*, 1238-1248.
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*, 201-215.

- Dehaene, S. (1997). *The number sense: How the mind creates mathematics*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Dehaene, S., Dehaene-Lambertz, G., & Cohen, L. (1998). Abstract representations of numbers in the animal and human brain. *Trends in Neurosciences, 21*, 355-361.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology, 20*, 487-506.
- Delazer, M., Domahs, F., Bartha, L., Brenneis, C., Lochy, A., Trieb, T., & Benke, T. (2003). Learning complex arithmetic—an fMRI study. *Cognitive Brain Research, 18*, 76-88.
- Fias, W., Lammertyn, J., Reynvoet, B., Dupont, P., & Orban, G. A. (2003). Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience, 15*, 1-11.
- Geary, D. G. (1993). Mathematical disabilities: cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin, 114*, 345-362.
- Girelli, L., Lucangeli, D., & Butterworth, B. (2000). The development of automaticity in accessing number magnitude. *Journal of Experimental Child Psychology, 76*, 104-122.
- Gobel, S., Walsh, V., & Rushworth, M. F. S. (2001). The mental number line and the human angular gyrus. *NeuroImage, 14*, 1278-1289.
- Goodale, M. A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D. P. (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature, 349*, 154-156.

- Hamilton, W. (1859). *Lectures on metaphysics and logic* (Vol. 1). Boston: Gould and Lincoln.
- Henik, A., & Tzelgov, J. (1982). Is three greater than five: The relation between physical and semantic size in comparison tasks. *Memory & Cognition*, *10*, 389-395.
- Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, *6*, 435-448.
- Husain, M., & Nachev, P. (2007). Space and the parietal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*, 30-36.
- Husain, M., & Rorden, C. (2003). Non-spatial lateralized mechanisms in hemispatial neglect. *Nature Reviews Neuroscience*, *4*, 26-36.
- Isaacs, E. B., Edmonds, C. J., Lucas, A., & Gadian, D. G. (2001). Calculation difficulties in children of very low birthweight: A neural correlate. *Brain*, *124*, 1701-1707.
- Ischebeck, A., Zamarian, L., Egger, K., Schocke, M., & Delazer, M. (2007). Imaging early practice effects in arithmetic. *NeuroImage* *36*, 993-1003.
- Ischebeck, A., Zamarian, L., Siedentop, C., Koppelstatter, F., Benke, T., Felber, A., & Delazer, M. (2006). How specifically do we learn? Imaging the learning of multiplication and subtraction. *NeuroImage* *30*, 1365-1375.
- Kaufman, E. L., Lord, M. W., Reese, T. W., & Volkman, J. (1949). The discrimination of visual number. *American Journal of Psychology*, *62*, 498-525.

- Kaufmann, L., Koppelstaetter, F., Siedentopf, C., Haala, I., E., H., Zimmerhackl, L.-B., Felber, S., & Ischebeck, A. (2006). Neural correlates of the number-size interference task in children. *NeuroReport*, *17*, 587-591.
- Kaufmann, L., Lochy, A., Drexler, A., & Semenza, C. (2004). Deficient arithmetic fact retrieval-storage or access problem? A case study. *Neuropsychologia*, *42*, 482-496.
- Koontz, K. L., & Berch, D. B. (1996). Identifying simple numerical stimuli: Processing inefficiencies exhibited by arithmetic learning disabled children. *Mathematical Cognition*, *2*, 1-23.
- Landerl, K., Bevan, A., & Butterworth, B. (2004). Developmental dyscalculia and basic numerical capacities: a study of 8-9-year-old students. *Cognition*, *93*, 99-125.
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, *109*, 163-203.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in NeuroSciences*, *6*, 414-417.
- Molko, N., Cachia, A., Riviere, D., Mangin, J.-F., Bruandet, M., Le Bihan, D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). Functional and structural alterations of the intraparietal sulcus in a developmental dyscalculia of genetic origin. *Neuron*, *40*, 847-858.
- Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgement of numerical inequality. *Nature*, *215*, 1519-1520.

- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, 9, 353-385.
- Nieder, A., Freedman, D. J., & Miller, E. K. (2002). Representation of the quantity of visual items in the primate prefrontal cortex. *Science*, 297, 1708-1711.
- Piazza, M., Giacomini, E., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2003). Single-trial classification of parallel pre-attentive and serial attentive processes using functional magnetic resonance imaging. *Proceedings of the Royal Society of London Biological Sciences*, 270, 1237-1245.
- Piazza, M., Mechelli, A., Butterworth, B., & Price, C. J. (2002). Are subitizing and counting implemented as separate or functionally overlapping processes? *NeuroImage*, 15, 435-446.
- Piazza, M., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2007). A magnitude code common to numerosities and number symbols in human intraparietal cortex. *Neuron*, 5, 293-305.
- Posner, M. I. (2003). Imaging a science of mind. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 450-453.
- Price, G. R., Holloway, I., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, 17, 1042-1043.
- Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., von Aster, M., Klaver, P., & Loenneker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 39, 417-422.

- Rousselle, L., & Noel, M.-P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: A comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition, 102*, 361- 395.
- Rubinsten, O., & Henik, A. (2005). Automatic activation of internal magnitudes: A study of developmental dyscalculia. *Neuropsychology, 19*, 641-648.
- Rubinsten, O., & Henik, A. (2006). Double dissociation of functions in developmental dyslexia and dyscalculia. *Journal of Educational Psychology, 98*, 854-867.
- Rubinsten, O., & Henik, A. (2009). Developmental dyscalculia: Heterogeneity may not mean different mechanisms. *Trends in Cognitive Sciences, 13*, 92-99.
- Rubinsten, O., Henik, A., Berger, A., & Shahar-Shalev, S. (2002). The development of internal representations of magnitude and their association with Arabic numerals. *Journal of Experimental Child Psychology, 81*, 74-92.
- Sapir, A., d'Avossa, G., McAvoy, M., Shulman, G. L., & Corbetta, M. (2005). Brain signals for spatial attention predict performance in a motion discrimination task. *Proceedings of the National Academy of Science, USA, 102*, 17810-17815.
- Sathian, K., Simon, T. J., Peterson, S., Patel, G. A., Hoffman, J. M., & Grafton, S. T. (1999). Neural evidence linking visual object enumeration and attention. *Journal of Cognitive Neuroscience, 11*, 36-51.

- Shalev, R. S., Auerbach, J., & Gross-Tsur, V. (1995). Developmental dyscalculia behavioral and attentional aspects: A research note. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 36, 1261-1268.
- Shalev, R. S., & Gross-Tsur, V. (2001). Developmental dyscalculia. *Pediatric Neurology*, 24, 337-342.
- Shalev, R. S., Manor, O., Auerbach, J., & Gross-Tsur, V. (1998). Developmental dyscalculia: What counts. Prospective 3-year follow-up. *Journal of Pediatrics*, 133, 358-362.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Szucs, D., & Soltesz, F. (2007). Event-related potentials dissociate facilitation and interference effects in the numerical Stroop paradigm. *Neuropsychologia*, 45, 3190-3202.
- Trick, L. M., & Pylyshyn, Z. P. (1994). Why are small and large numbers enumerated differently? A limited capacity preattentive stage in vision. *Psychological Review*, 101, 80-102.
- Trick, L. M., & Pylyshyn, Z. W. (1993). What enumeration studies can show us about spatial attention: evident for limited capacity preattentive processes. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 19, 33-51.
- Tzelgov, J., Henik, A., & Leiser, D. (1990). Controlling Stroop interference: Evidence from a bilingual task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 16, 760-771.

- Tzelgov, J., Henik, A., Sneg, R., & Baruch, O. (1996). Unintentional word reading via the phonological route: the Stroop effect in cross-script homophones. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22, 336-349.
- Ungerleider, L. G., & Haxby, J. V. (1994). 'What' and 'where' in the human brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 4, 157-165.
- Venkatraman, V., Ansari, D., & Chee, W. (2005). Neural correlates of symbolic and non-symbolic arithmetic. *Neuropsychologia*, 43, 744-753.
- von Aster, M., & Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 49, 868-873.
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 483-488.
- Wilkinson, D., & Halligan, P. (2004). The relevance of behavioural measures for functional-imaging studies of cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 67-73.
- Wilson, A. J., & Dehaene, S. (2007). Number sense and developmental dyscalculia. In D. Coch & G. Dawson & K. Fischer (Eds.), *Human Behavior, Learning and the Developing Brain: Atypical Development* (pp. 212-238). New York: Guilford Press.

היבטים התנהגותיים ונירופסיכולוגיים של המשגה בפיזיקה

מרים ריינר

הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל

הקדמה

פיסיקה נחשב לתחום קשה ללמידה. מעט בוחרים במקצוע זה כמרכזי בתיכון, ולא מעט נכשלים בלמידתו. מחקר בלמידת פיסיקה התמקד לאורך שנים רבות בהישגים או נגזרות שלהם. תחום מחקר מעניין במיוחד בפיסיקה הוכיח שתלמידים מראים תפישות מאוד עקשיות שמבטאות שוב ושוב בקונטקסטים שונים. למשל, אחת התפישות הידועות ביותר מתייחסת לתפישת תנועה של גופים והכוח הפועל עליהם. באופן גורף, ללא תלות בהשכלה ובגיל, הוכח שהלומדים תופשים תנועה במהירות קבועה, כמחייבת כוח ש"ישמר את התנועה". אם הכוח גווע לאפס, גם התנועה על פי תפישה זו גוועת לאפס. תפישה זו הינה כמובן מוטעית על פי חוקי הפיסיקה. תנועה של גוף במהירות קבועה, מתבצעת כאשר סכום הכוחות הפועל על הגוף הוא לאפס. תפישה זאת ידועה כתפישה אריסטוטליאנית של הקשר כוח-תנועה בטבע. קיומם של תפישות מוטעות בפיסיקה אינו מפתיע, מה שמפתיע הוא מידת הקונסיסטנטיות של תפישות אלו, לאורך שונות גבוהה של מצבים: רקע, השכלה ואיפיונים אישיים. יתרה מכך, כאשר לימדו תלמידים את הפיסיקה הנכונה, נמצא שהלומדים גילו התנגדות להחלפת התפישות שלהם בתפישות חדשות. גם לאחר למידה, במצבים רבים, העדיפו לומדים ליישם את תפישותיהם ה"נאיביות" שאינן תואמות את הפיסיקה.

משמעות ממצא זה הינה שהלומדים "ידעו" פיסיקה (מוטעית) עוד לפני שלמדו באופן פורמאלי. החוקרים כינו ידע זה כ"ידע בפיסיקה נאיבית". מהיכן למדו התלמידים תפישות אלו? מה מקורה של ה"פיסיקה הנאיבית"? אין תשובה מוגדרת היטב לשאלות אלו. חלק מהספקולציות טוענות שידע זה מעוגן בתוך מערכת התפישה היומיומית שלנו. התבוננות בגופים ביומיום, ובעיקר

אינטראקציה איתם (למשל התגוננות בפני כדור העומד לפגוע בנו), מחייבת אותנו ללמוד ולנבא את מסלול התנועה של הכדור, כך שנוכל להימנע מהתנגשות איתו.

פיסיקה הינה דיסציפלינה שלרוב נתפשת כמתמטית, מבוססת בעיקר על מניפולציות מתמטיות והסקה לוגית. פיסיקה מהווה מסגרת לתיאור של התנהגות גופים בטבע באמצעות אוסף של תבניות, כגון תבניות מתמטיות. עם זאת המשגת התנהגות גופים בטבע נעשית במידה רבה תוך התבוננות ואינטראקציה בין המתבונן, הלומד, לבין הטבע. אינטראקציה בין הלומד לטבע נעשית דרך מערך של חושים: רואים תנועה בליסטית של גופים, מרגישים את הכוח הדרוש כדי לזרוק כדור לסל, או להרים כוס קפה מלאה, קולטים את איוושת הזרימה של הנהר.

כיצד הופך מידע בעל אופי חושי ל"מושג"? מהם מקורות הידע הנאיבי בפיסיקה? כיצד נבנים מודלים סיבתיים המקשרים בין מושגים פיסיקאליים? והאם ניתן לקשר הליכים של למידה בפיסיקה עם הליכים מוחיים של עיבוד ותפישה חושית, זיכרון ואינטראקציה עם העולם הסובב? הסקירה המובאת בהמשך תציג היבטים התנהגותיים, קוגניטיביים ונוירו פסיכולוגיים של למידת פיסיקה.

ידע נאיבי בפיסיקה

כבר ב-1964 הראה Johnson כי נבדקים שלא עסקו בסמוך לבדיקה בפיזיקה התקשו לקשר בין מושגים שונים בפיזיקה (גם אם למדו את החומר המדובר בשנה שקדמה לבדיקה). בנוסף, הראה Johnson כי נבדקים שכלל לא התכוונו ללמוד פיזיקה הצליחו במבחן האסוציאציות פחות מנבדקים שכן התכוונו ללמוד פיזיקה. ידע בפיזיקה אינו אינטואיטיבי כפי שאולי ניתן לחשוב.

Macnamara & Austin (1993) טענו כי Piaget טעה בפירוש שנתן לקושי שהראו ילדים בבעיות שימור חומר (כמות, מסה ונפח). לטענתם, הקושי אינו נובע מהעובדה שילדים לפני גיל 8 חסרים יכולת הסקה מסוימת (כלומר: שאינם מסוגלים לייצג באופן מנטאלי את הפעולה ההפוכה שתחזיר את המצב לקדמותו), אלא מבורותם בפיזיקה. השאלה 'איזה תכונות של החומר נשמרות בעת שינוי צורתו' אינה שאלה טריוויאלית. כיצד ידע ילד קטן להבחין בין מסה

ונפח? השאלה האם חומר מוצק שומר על נפחו כאשר צורתו משתנה נחקרה ע"י פיזיקאים במאה ה-19 והתשובה אינה פשוטה. ישנם חומרים שנפחם משתנה דווקא בעת מתיחה. לכן, טוענים Macnamara & Austin (1993), מה שחסר לילדים הוא ידע בפיזיקה. מצד שני, Kwon & Lawson (2000) טענו כי רכישת מושגים תיאורטיים (כמו "לחץ אויר") בעת למידת מדעים, תלויה גם בהתפתחות יכולת הסקה דדוקטיבית-היפותטית, התלויה בתורה בהבשלה של האונות הפרה-פרונטאליות. במחקרם מצאו החוקרים קשר בין מדדים של יכולות המיוחסות לפעילות האונות הפרה-פרונטאליות (ובעיקר יכולת עיכוב) לבין הבנת מושגים פיזיקאליים בנושא לחץ אויר, אצל נערים בגילאי 13-17 אשר קיבלו את אותה ההדרכה. קשר זה הראה התפתחות (לא ליניארית) ביכולת ההסקה המדעית, אשר התרחשה בין הגילאים 14 ו-15, גיל אשר בו נמצאה התפתחות מואצת של האונות הפרה-פרונטאליות (Epstein & Toepfer, 1978).

Macnamara & Austin (1993) טענו גם שעובדות מסוימות בפיזיקה נטמעות באופן טבעי בילדים גם ללא למידה פורמאלית. לדוגמא, העובדה שסוכר הנמס במים ממשיך להתקיים בהם בצורה מסוימת נלמדת על-ידי ילדים לפני שהם מסיימים את בית הספר היסודי. לטענת הכותבים למידה כזאת אינה קשורה ליכולות הסקה מנטאליות, אלא לכך שעובדות פיזיקאליות מסוימות מעוגנות בדרך החשיבה וההתבטאות של המבוגרים. כלומר, עובדות המשמשות בחיי היום-יום יילמדו על-ידי הילד באופן לא פורמאלי. במקרה של הסוכר הנמס, הידע הזה הוא נכון, אך במקרה של תנועת אובייקטים, למשל, ידע שגוי, התואם למונחים אריסטוטליאניים (טרום-ניוטוניים) מופיע עד לגיל מבוגר (למשל: McCloskey & Kohl, 1983).

סדרת מחקרים בשנות השמונים (למשל: Caramazza, McCloskey, & Green, 1981; Champagne, Klopfer, & Anderson, 1980; Clement, 1982; McCloskey, 1983; McCloskey, Caramazza, & Green, 1980; McCloskey & Kohl, 1983; Viennot, 1979), הראתה טעויות דומות בניבוי תנועת אובייקטים אצל אחוז גבוה יחסית (כ-30%)

מהאוכלוסייה. לדוגמא: כאשר ביקשו מסטודנטים לבא את מסלול הכדור היוצא מצינור ספירלי המונח אופקית על שולחן, כ-30% טענו כי הכדור ימשיך לנוע בתנועה סיבובית גם כאשר אינו מוגבל יותר על-ידי דפנות הצינור. McCloskey ושות' טענו כי לנבדקים אלה "תיאוריה נאיבית" (כלומר: תיאוריה שלא נרכשה באופן פורמאלי) מגובשת וקוהרנטית. McCloskey ושות' השוו את התיאוריה הנאיבית שהחזיקו הנבדקים לתיאוריה הפרה-ניוטונית שנקראה "תיאורית התנופה" (Impetus Theory). ממצא זה התקבל גם כאשר נבדקים צפו בסימולציה דינאמית של מסלולי תנועה שונים (McCloskey & Kohl, 1983). McCloskey ושות' שיערו כי התיאוריה הנאיבית של התנופה נרכשה בעקבות ניסיון של אנשים עם אובייקטים מסתובבים (למשל: גלגל שממשיך להסתובב גם לאחר שכבר לא מופעל עליו כוח). הסברים התואמים את תיאורית התנופה נמצאו גם במחקרים על נפילת אובייקטים אצל ילדים לפני ואחרי לימודי פיזיקה פורמאליים (Eckstein & Kozhevnikov, 1997).

קוהרנטיות של ידע נאיבי

ביקורת חשובה על מסקנותיהם של McCloskey ושות' הייתה כי הטעויות הנצפות אינן נובעות מקיומה של תיאוריה נאיבית קוהרנטית ועקבית אלא מפיסות מידע נפרדות, חסרות עקביות ולעיתים סותרות. על כן ה"פיסיקה הנאיבית" אינה תיאוריה ערוכה ומאורגנת ככזאת. עם זאת, פיסות הידע המרכיבות אותה אכן "עובדות במציאות" (ראה תפישות אריסטוטלי אניות). (Cooke & Breedin, 1994; diSessa, 1983, 1988; Ranney, 1994; Ranney & Thagard, 1988). Ranney & Thagard (1988), למשל, מצאו כי אותם נבדקים נתנו תשובות התואמות את תיאוריית התנופה לחלק מהשאלות ותשובות התואמות את התיאוריה הניוטונית לשאלות אחרות. ביקורת נוספת שהועלתה כנגד ממצאיהם של McCloskey ושות' הייתה כי כאשר השאלה מנוסחת במונחים של "איזו תנועה נראית נכונה יותר" והאפשרויות השונות מוצגות באופן דינמי, אחוז הטעויות יורד (Kaiser, Proffitt, & Anderson, 1985), אך ראו: (McCloskey & Kohl, 1983). Kaiser, Proffitt, Whelan, & Hecht (1992) טענו כי צפייה

בתנועה דינמית תורמת לשיפור הניבוי אך רק כאשר קיים מימד אחד של אינפורמציה רלוונטית. בעיות המורכבות מיותר מימדים דינמיים (לדוגמא: בשאלה האם חפץ כבד המונח על סירת צעצוע יגרום למים במיכל לעלות יותר/פחות/אותו הדבר כמו בעת הנחת החפץ הכבד בתוך המים). לא נהנו מצפייה בהדגמה דינמית של האפשרויות השונות (ראו גם: Proffitt & Gilden, 1989).

ידע סמוי, ידע גלוי בפיסיקה

בהיות הידע הפיסיקאלי מבוסס בחלקו על תפיסה חושית, חלק מהידע שניתן לשייכו לידע בפיסיקה הוא סמוי. בשנות ה-90 נערכו מספר מחקרים שבחנו ידע סמוי של חוקים פיזיקאליים (להבדיל מהידע הגלוי שנבחן בשאלות נייר ועיפרון או בהצגה הדינמית של הבעיות). אחת הפרדיגמות בהן נבחן ידע סמוי על תנועת אובייקטים היא פרדיגמת הזיכרון של המומנטום המיוצג (Representational Momentum: RM). Freyd & Finke (1984) היו הראשונות שהציעו לבחון ניבוי סמוי של תנועה בעזרת פרדיגמת RM. בפרדיגמה זו מתבקשים נבדקים לשחזר את המיקום האחרון בו נצפה אובייקט אשר נע לפני היעלמותו במסלול מסוים. הממצא הבסיסי בפרדיגמה זו הוא כי זיכרוןם של הנבדקים למיקום האחרון בו נצפה האובייקט מוסט הלאה בכיוון התנועה. הזיכרון המוסט מעיד כי תנועת האובייקט המשיכה בזיכרוןם של הנבדקים (ולכן: מומנטום מיוצג).

במחקרים של מומנטום מיוצג נמצאו ממצאים מעניינים על פיזיקה נאיבית. למרבה ההפתעה, הידע הסמוי היה שגוי (לעיתים, גם במקרים בהם הידע הגלוי היה נכון). למשל, Freyd & Jones (1994) הראו דווקא פחות טעויות בניבוי גלוי של תנועת כדור היוצא מצינור ספיראלי ויותר מומנטום מיוצג לאורך המסלול הסיבובי (השגוי). כלומר, בפרדיגמת המומנטום המיוצג באים לידי ביטוי משתנים תפיסתיים כמו "המשכיות טובה" של תנועה. משתנים אלה יכולים גם להסביר חלק מהטעויות המבוצעות על-ידי נבדקים במבחני ידע גלוי. Hubbard (1995, 1996, 1997, 1998) הראה מומנטום מיוצג בבעיות של חיכוך, כבידה וכוח צנטריפוגלי. בכל המקרים

בהם לתיאורית התנופה ניבויים הנוגדים את העקרונות הניוטונים – המומנטום המיוצג פעל על-פי עקרונות תיאורית התנופה. באופן דומה, Kozhevnikov & Hegarty (2001) הראו שגם מומחים בפיזיקה, כמו נבדקים ללא רקע בפיזיקה, מסתמכים על היוריסטיקה הדומה לתיאורית התנופה כאשר לא ניתן להם זמן מספיק כדי לחשוב על תשובתם. היוריסטיקה זו נתמכת על-ידי התנסויות מחיי היום-יום בהם חיכוך והתנגדות האוויר גורמים לעצירת אובייקט נע.

Reed, & Vinson (1996) מצאו כי ידע קודם לגבי אופי התנועה הטבעית של אובייקטים מסוימים, משפיע על אפקט המומנטום המיוצג. באופן דומה Yerfaillie & d'Ydewalle (1991) הראו כי ציפייה לתנועה בכיוון מסוים יכולה להגדיל או להעלים את אפקט המומנטום המיוצג. כלומר, ידע קודם, ולא רק "המשכיות טובה" משפיעים על זיכרון מידי לתנועה. מעניין לשים לב כי כאשר אדם מצפה לתנועה בכיוון מסוים, מופעלים במוח אזורים שונים מאשר במצב בו אין ציפייה כזאת. Simó, Krisky & Sweeney (2005) מצאו כי במטלה הדורשת מעקב אחרי אובייקטים בתנועה בתנועות עיניים סקדיות, יש הבדל בין מצב בו הנבדק יודע מה תהיה התנועה הבאה לבין מצב שבו הנבדק אינו יודע. כאשר המעקב מבוסס על תפיסה בלבד, ללא ציפייה, נמצאה פעילות מוגברת באזורים ויזואליים ראשוניים באונה האוקסיפיטלית, באזור ה-Superior Parietal Gyrus, ובאזור ה-Frontal Eye Field (FEF). לעומת זאת, כאשר המעקב היה מבוסס גם על ציפיות, נמצאה פעילות מוגברת במרכזי בקרה פרונטאליים כמו באזורים הקורטיקליים - Dorsolateral Prefrontal, ו-Pre-supplementary Motor, וכן באזורים הקשורים לזיכרון מרחבי כמו Fronto-Parietal, Fronto-Thalamic Loop, ו-Hippocampus-inferior parietal Network.

תפישות מוקדמות בפיזיקה: "פיזיקה של תינוקות"

במהלך עשרים השנים האחרונות, הגיעו חוקרים למסקנה שבניגוד לטענה המסורתית, תינוקות מחזיקים בציפיות מתוחכמות לגבי אירועים פיזיקאליים. מחקרים מאוחרים הציעו שאחד המנגונים התורמים לרכישת ידע פיזיקאלי על-ידי תינוקות הוא יצירת קטגוריות של אירועים, כמו

סגירות והכלה. נמצאו פערים התפתחותיים המעידים על כך שתינוקות רוכשים ציפיות הספציפיות לאירועים מסוג מסוים ולא דווקא באופן כללי. במחקר לדוגמה הציגו לתינוקות רצף אירועים מקטגוריות שונות של אירועים (למשל: סגירות, הכלה, כיסוי, וזיהוי המשתנה הרלוונטי לניבוי תוצאות). שני ממצאים עיקריים עלו במחקר זה. ראשית, אפילו תינוקות צעירים מאד מחזיקים בציפיות לגבי אירועים פיזיקאליים. שנית, ציפיות אלה עברו התפתחות מובהקת במשך שנת החיים הראשונה.

תינוקות בגיל 2.5 חודשים יכולים לזהות הפרה של אירועי סגירות, הכלה וכיסוי. לדוגמה, בניסוי סגירות, בני 2.5 חודשים צפו בעכבר צעצוע נעלם מאחורי מסך אחד ומופיע שוב מאחורי מסך אחר. התינוקות זיהו את הפרת הכלל באירוע זה, ממצא המלמד כי הם האמינו שהעכבר ממשיך להתקיים לאחר שנעלם מהעין, והסיקו שהוא לא יכול להעלם מאחורי מסך אחד ולהופיע מאחורי מסך אחר מבלי שהופיע ברווח בין שני המסכים (Aguiar & Baillargeon, 1999). בניסוי הכלה, בני 2.5 חודשים ראו נסיין מכניס חפץ לתוך מיכל. לאחר מכן הנסיין הזיז את המיכל קדימה והצידה, כך שחשף את העובדה שהחפץ נותר במקום בו עמד קודם המיכל. התינוקות הגיבו לאירוע זה בהעלאה של הקשב, ממצא המלמד על כך שהתינוקות האמינו שהחפץ המשיך להתקיים בתוך המיכל והסיקו שלא יכול היה לעבור דרך קירות המיכל (Hespos & Baillargeon, 2001).

בניסוי על כיסוי, בני 2.5-3 חודשים ראו ברווז צעצוע נח בקצה השמאלי של משטח. מרכז המשטח היה מוסתר על-ידי מסך גבוה מעט מהברווז. נסיין הניח כיסוי על הברווז, החליק את הכיסוי אל החלק השמאלי של אחורי המסך, הרים את הכיסוי מעל המסך, הזיז אותו ימינה, הוריד שוב את הכיסוי אל החלק הימני שמאחורי המסך, החליק אותו אל הצד הימני (הגלוי) של המשטח, ולבסוף – הרים את הכיסוי כדי לגלות את הברווז. התינוקות זיהו את ההפרה בתרחיש זה, דבר המלמד על כך שהאמינו שהברווז המשיך להתקיים לאחר שכוסה וציפו שיזוז עם הכיסוי כאשר הכיסוי נדחף אך לא כאשר הכיסוי הורם ושינה את מיקומו.

קבוצה, המחקרים האחרונים העלו שני ממצאים עיקריים. ראשית, לכל קטגוריית אירועים, תינוקות מזהים סדרה של משתנים המאפשרים להם לחזות את התוצאה באופן מדויק יותר ויותר במהלך הזמן. לדוגמא, בגיל 3.5 חודשים תינוקות מזהים גובה כמשתנה רלוונטי לסגירות. שנית, תינוקות אינם מקלילים על משתנה מסוים במעבר בין קטגוריות: הם לומדים בנפרד עבור כל קטגוריה. כאשר תינוקות מזהים משתנה מסוים בקטגוריה אחת של אירועים שבועות או חודשים לפני שהם מזהים את אותו משתנה בקטגוריה אחרת, ניתן להבחין בפערים בולטים בתגובותיהם לאירועים דומים משתי הקטגוריות. לדוגמא, בסדרת ניסויים אחת, בני 4.5 חודשים ראו נסיין מנמיך חפץ גבוה מאחורי (תנאי סגירות) או לתוך (תנאי הכלה) מיכל נמוך עד שרק הידית בקצה החפץ נותרה גלויה מעל המיכל. התינוקות זיהו את ההפרה בתנאי הסגירות אך לא בתנאי הכלה.

העדויות ההתפתחותיות מציעות כי ציפיות של תינוקות לגבי אירועים פיזיקאליים לא מיושמות באופן רחב לכל האירועים הרלוונטיים, אלא הן ציפיות ספציפיות לאירוע. תינוקות לא רוכשים עקרון כללי של גובה או שקיפות, הם מזהים משתנים אלה בנפרד בכל קטגוריית אירועים. אך אם תינוקות מסוגלים רק לרכוש ציפיות הספציפיות לאירוע, כיצד הם יכולים להחזיק בעקרונות כלליים על המשכיות ומוצקות בגיל כה מוקדם כמו 2.5 חודשים? אפשרות אחת היא שמנגנון הלמידה של תינוקות מותאם תחילה לרכישה של ציפיות כלליות, אך מייד מתפתח לכדי מנגנון המסוגל לרכוש רק ציפיות ספציפיות לאירוע. אפשרות אחרת היא שהעקרונות הכלליים שאנו רואים בתינוקות (כמו המשכיות ומוצקות) הם מולדים (Spelke, 1994).

הסבר חדש להסקה על אירועים פיזיקאליים מנסה להסביר את הצלחתם המוקדמת של תינוקות לעומת כישלונם המאוחר יותר בזיהוי המשכיות ומוצקות (Baillargeon, 2002). הסבר זה מבוסס על ארבע הנחות. ראשית, בעת צפייה באירוע פיזיקאלי, תינוקות בונים ייצוג (מנטאלי) פיזיקאלי מיוחד של האירוע המשמש אותם לחיזוי ופירוש תוצאותיו. שנית, כל המידע הכלול בייצוג הפיזיקאלי, אך רק מידע זה, הופך למושא לעקרונות הכלליים של התינוק. שלישית,

בשבועות הראשונים של החיים, הייצוגים הפיזיקאליים של תינוקות הם עדיין דלים: בעת ייצוג אירוע תינוקות כוללים בייצוג רק מידע בסיסי של מרחב וזמן. לדוגמא, בעת צפייה באירוע הכלה, תינוקות מייצגים חפץ המונמך לתוך מיכל. מידע זה תופס את מהות האירוע, אך מתעלם מרוב פרטיו (האם המיכל גבוה או רחב יותר מהחפץ, האם המיכל שקוף או אטום וכדומה). רביעית, כאשר תינוקות יוצרים קטגוריות של אירועים ולומדים איזה משתנים להחשיב באיזה קטגוריה, הם כוללים מידע על משתנים אלה בייצוגים הפיזיקאליים שלהם. כשהם צופים באירוע, תינוקות מייצגים את המידע הבסיסי על האירוע ומשתמשים במידע זה על מנת לקטלג אותו. בשלב זה הם ניגשים לידע קיים להם על הקטגוריה הנבחרת, ידע זה מציין את המשתנים שזוהו כרלוונטיים לקטגוריה ושלכן צריכים להיכלל בייצוג הפיזיקאלי.

על-פי הסבר זה, אפילו תינוקות צעירים מאד אמורים להצליח בזיהוי הפרה של המשכיות או מוצקות המכילים מידע על משתנים שתינוקות אלה עדיין לא כוללים בייצוגים הפיזיקאליים שלהם.

גילוי שינויים בלתי אפשריים: מחקר שנערך לאחרונה (Wang & Baillargeon, 2008) מציע כי תינוקות מגלים מקרים מסוימים אך לא את כל המקרים של שינויים "בלתי אפשריים", וכי מניפולציות על ההקשר בו הופיע האירוע יכולות לגרום לגילוי שינויים שלא היו מתגלים באופן אחר.

על פי התיאוריה הקיימת, כאשר תינוקות בונים את הייצוגים הפיזיקאליים שלהם, הם מייצגים תחילה את המידע הבסיסי על האירוע, המכיל מידע מרחבי-זמני ומידע מזהה. המידע המרחבי-זמני מציין כמה אובייקטים מעורבים באירוע, וכיצד סידורם במרחב משתנה כאשר האירוע מתקדם. מידע מזהה מספק מידע קטגוריאלי או אונטולוגי על כל אובייקט, כמו האם האובייקט מסתובב סביב עצמו או לא והאם האובייקט פתוח או סגור. לאחר שתינוקות ייצגו את המידע הבסיסי על האירוע, הם משתמשים בידע זה על-מנת לקטלג את האירוע. לאחר שקבעו מידע על איזה משתנים הם צריכים לכלול בייצוג הפיזיקאלי של האירוע, הם אוספים מידע זה באופן ישיר

מהאירוע (אם האובייקטים עדיין מוצגים) או על-ידי חקירת מערכת ייצוג אובייקטים (אם אינם מוצגים עוד). בשני המקרים המידע על המשתנים נכלל בייצוג הפיזיקאלי של האירוע ומפורש בהתאמה לחוקי המשתנה ולעקרונות הליבה. אירועים שאינם מתקדמים כצפוי מתויגים כהפרה. הפרה של שינויים, המערבת רק מידע בסיסי, מתגלה מוקדם, הרי אפילו תינוקות צעירים מאד יכולים לכלול מידע בסיסי זה בייצוג הפיזיקאלי של האירוע. כך, תינוקות צעירים מגלים את ההפרה כאשר מכסה מורם ומגלה שהצעצוע נעלם. בניגוד לכך, הפרה של שינויים המערבת מידע על משתנים מתגלה רק אם התינוק יכול לכלול מידע על המשתנים הללו בייצוג הפיזיקאלי של האירוע. כך, רק תינוקות שזיהו גובה, רוחב, צורה וצבע כמשתנים הרלוונטיים לכיסוי, יכללו מידע על משתנים אלה בייצוג הפיזיקאלי של האירוע ויגלו הפרה של שינוי המערבת משתנים אלה.

מודלים מנטאליים של תנועת גופים – היבטים פסיכו-פיסיים

חלק מהידע הפיזיקאלי הינו ידע על תנועת גופים, המעוגן במערכת הראיה. האם המשגה בפיסיקה תלויה בדרך כלשהי במנגנון הראיה באפיונו ובמגבלותיו? מחקרי פסיכו-פיזיקה הראו כי מערכת הראיה האנושית אינה רגישה ביותר להאצה של אובייקטים (Brouwer, Brenner, & Todd, 1981; Werkhoven, Snippe, & Toet, 1992; Smeets, 2002), וכי נזירות באזור MT (הידוע בחשיבותו לעיבוד תנועה) אצל קופים רגישים למהירות וכיוון התנועה אך רק מעט מאד להאצה (Lisberger, & Movshon, 1999). עם זאת, נמצא דיוק רב בלכידה של אובייקטים בנפילה חופשית בתנאים של כבידה לעומת אובייקטים בנפילה חופשית בתנאים של כבידה מופחתת (Lacquaniti, & Maioli, 1989; McBeath, Shaffer, & Kaiser, 1995; McIntyre, Zago, Berthoz, & Lacquaniti, 2001). בנוסף, רמזים ויזואליים לקיומה של כבידה תורמים לתפיסת טבעיות התנועה, לתפיסת מרחק וגודל של חפצים נופלים ולתפיסת תנועה ביולוגית (Jokisch, & Troje, 2003; Kim, & Spelke, 1992; Twardy, & Bingham, 1992; Watson et al., 2002). כמו כן, תינוקות מראים ציפייה להאצה של חפצים נופלים

והאטה של חפצים מתרוממים כבר בגיל 5-7 חודשים (Kim, & Spelke, 1992). כלומר, למרות חוסר הרגישות הפסיכו-פיזיקאלית בהבחנה, נראה כי קיימות עדויות רבות לכך שהאצה הנגרמת עקב הכבידה נלקחת בחשבון בתפיסה היוזאלית ובהתנהגות. Indovina ושות' (2005) הציעו כי מערכת התפיסה נעזרת במודל מנטאלי המחשב את השפעת הכבידה. לטענתם, מודל זה נמצא בקורטקס הוסטיבולרי ומופעל על-ידי גירויים ויזואליים של תנועה המתואמים עם הכבידה הטבעית. במחקרם נבדקים הגיבו באופן מדויק יותר לצעדים בהם חפץ נע בתנאי כבידה נורמאלי לעומת תנאי כבידה הפוך ($-1g$), וכמו כן, בתנאי הכבידה הנורמאלי נמצאה פעילות מוגברת (יחסית לתנאי ההפוך) ברשת העצבית הכוללת (בין היתר) את האינסולה והצומת הטמפורלית-פריאטלית, המהווים חלקים עיקריים בקורטקס הוסטיבולרי. מצד שני, בתנאי הכבידה ההפוך נמצאה פעילות מוגברת באזור Lateral Occipital Sulcus, הידוע כרגיש לתנועה. Indovina ושות' פירשו פעילות מוגברת זו כנדרשת לחישוב התנועה ללא עזרת המודל המנטאלי.

Tresilian (1995) הציע כי עיבוד של תנועת אובייקטים יכול להתרחש באחת משתי מערכות תפיסה שונות – הידע שקיים על העולם והידע המוטורי של פעולה בעולם זה. הצעה זו מתבססת על ממצאיהם של Mishkin, Ungerleider, & Macko (1983) ו-Goodale & Milner (1992) על קיומם של שני מסלולי תפיסה ויזואלית. על-פי Tresilian, פעולות תפיסתיות או קוגניטיביות נסמכות על ייצוגים מדויקים יותר או פחות של העולם החיצוני (ולכן יכולות לסבול מהטיות), בעוד שפעולה מוטורית על האובייקט הנע נסמכת על זיווג סנסורי-מוטורי ישיר של מידע ויזואלי בזמן אמת. ואכן, מחקרים שונים מצאו הבדלים דומים: Krist, Fieberg, & Wilkening (1993) הראו דיסוציאציה בין ביצועי ילדים ומבוגרים במטלה הדורשת הערכה וורבלית לבין ביצועיהם במטלה הדורשת ביצוע פעולה. בעת ביצוע פעולה המערבת תנועת אובייקט לא נצפו טעויות, בעוד שבהערכה וורבלית של אותה פעולה כן נצפו טעויות. באופן דומה, Brouwer, Franz, & Thornton (2004) מצאו הבדלים במידת המומנטום המיוצג בין מטלה ויזואלית לבין מטלת אחיזה.

בהתייחס לזיכרון לתנועת אובייקטים, Price & Gildea (2000) הציעו כי תנועת אובייקטים מיוצגת בזיכרון במונחים של העתקת מקום ולא במונחים של מאפייני התנועה. במחקרם, נבדקים צפו באובייקטים הנעים באופנים שונים מבלי שידעו כי זיכרוןם ייבחן. לאחר מטלה מסיחה, נבדקים הראו זיכרון טוב לתנועה שבעקבותיה שינה האובייקט את מיקומו, אך לא זכרו כלל תנועה שבעקבותיה נשאר האובייקט במקומו (כמו סיבוב על ציר). ממצאים אלה מעידים כי בעת צפייה בתנועת אובייקט אנשים מקדדים את תוצאות אותה תנועה, אך לא בהכרח את מאפייני התנועה עצמה.

גם כאשר אנשים אינם יכולים לדווח על ידע מסוים, אין הדבר אומר כי ידע זה אינו קיים בזיכרוןם. תחום המחקר של "ידע סמוי" הראה כי, למשל, למידת רצפים פרוצדוראליים מובילה להאטה בתגובות בעת חריגה מהרצף שנלמד, גם כאשר הנבדק אינו יכול לדווח על קיומו של רצף כזה (למשל: Nissen & Bullemer, 1987). מחקרי EEG מצאו כי רכיב המוכר כזיהוי של טעות (ERN) נמדד גם במקרים בהם הנבדק לא יכול היה לדווח על קיומו של רצף (Rüsseler, 2003; Kuhlicke, & Münte, 2003). Rüsseler and Rosler (2000) מצאו כי בעוד שנבדקים שהיו מודעים לקיומו של הרצף הראו הן הגדלה של רכיבי ERP N200 ו-P300, והן LRP, רכיב המעיד על הכנת תנועה לקראת התגובה הצפויה. נבדקים שלא היו מודעים לקיומו של הרצף הראו רק LRP, כלומר, הידע של נבדקים אלה היה פרוצדוראלי.

תפישת הסיבתיות בפיסיקה

לא רק המשגה הינה מרכזית בפיסיקה. המודל המנטאלי על התנהגות העולם מכיל בתוכו מרכיבים המתייחסים לסיבה ומסובב. זיהוי סיבתיות הכרחי להבנה ואינטראקציה עם העולם סביבנו. Hume הציע שהבנה של יחסים סיבתיים בין אירועים מחייבת הסקה על בסיס מקרים קודמים. לעומתו, Michotte (1963) הציע שתפיסת סיבתיות היא ישירה, אוטומטית ואולי אף מולדת. דוגמא ספציפית של סיבתיות מכאנית היא זו המתרחשת כאשר אובייקט פיזיקאלי מתנגש באובייקט אחר וגורם לשני לנוע. דוגמא זו נחקרה רבות ע"י Michotte (ובעקבותיו גם

אחרים) ונקראה "אפקט השיגור". בניסויים אלה נראה אובייקט A נע עד שהוא נוגע באובייקט B, אז אובייקט A עוצר ואובייקט B מתחיל לנוע. Michotte ראיין מבוגרים שצפו בגירויים מסוג זה ודיווחו שהם תופסים אותם כ-"A גרם לתנועה של B". באופן דומה, תנועת האובייקטים בתצוגה והיחס ביניהם צייתו לחוקי הפיזיקה והובילו לתפיסה של שיגור, משיכה, כפיית התרסקות, התפרצות וכדומה. תפיסת סיבתיות מתקבלת גם במערכים המציגים תנועה מדומה.

מחקרים אימתו את טענתו של Michotte, שתפיסת סיבתיות היא תוצאה של מאפייני הגירוי, כאשר רוב המחקר התמקד בהמשכיות בזמן (ראו סקירה מאת: Schlottmann et al., 2006). מחקרים אלה מצאו כי הצגת מערך המדמה סיבתיות יגרום לתפיסת סיבתיות, אך כל עיכוב של קטן (אף של 60 אלפיות שנייה) יכול להפחית מתחושת הסיבתיות. נמצא גם שישנה השפעה ללמידה.

Hubbard, Blessum, & Ruppel (2001) הראו כי כאשר אובייקט נע לעבר אובייקט ניח ולאחר המגע ביניהם האובייקט הראשון עוצר ואילו האובייקט השני מתחיל לזוז ("אפקט השיגור" של Michotte (1946/1963)), המומנטום המיוצג של האובייקט השני קטן יותר מאשר במקרה בו רק אובייקט אחד נע באותה מהירות ולאותו המרחק. החוקרים פירשו ממצא זה כהבדל בין מצב בו נבדקים מייחסים כוח הנעה לאובייקט עצמו (כאשר החל לזוז "בעצמו"), לבין מצב בו נבדקים מייחסים את כוח ההנעה לאובייקט אחר ש"דחף" את אובייקט המטרה. במקרה זה מחילים הנבדקים את תיאורית ה-Impetus הטרומ-ניוטונית לפיה האובייקט יאט עד לעצירה לאחר שמקור הכוח חדל לפעול עליו. ממצא זה מתיישב עם ממצאים בתחום הפיזיקה הנאיבית (ראו McCloskey, 1983 לעיל).

תפיסת סיבתיות זכתה לעניין מנקודות מבט התפתחותיות, השוואתיות ונירו-פסיכולוגיות. חוקרים שניסו להבין את ההבחנה האונטולוגית המוקדמת ביותר אצל תינוקות, טענו שתפיסת סיבתיות יכולה לעזור לתינוקות ללמוד על המבני הסיבתי של העולם ללא צורך בידע על סיבתיות (לדוגמא: Baron-Cohen, 1994; Leslie, 1988; Mandler, 1992; Premack, 1990). בעוד

שמסורת החשיבה הפיאז'טנית (1971/1974) ניבאה למידה איטית והדרגתית של מאפייני סיבתיות, עדויות מאוחרות הראו כי ילדים רוכשים ידע על העולם הפיזיקאלי במהירות רבה (Bullock, 1985; Corrigan & Denton, 1996). שימוש בטכניקת הביטואציה (התרגלות) הראה כי תינוקות בני 6 חודשים, אשר חסרים כל ניסיון רלוונטי, כבר מראים רגישות למקרים ספציפיים של סיבתיות ולא רק למבנה הכללי של מרחב זמן באירועים של שיגור כמתואר לעיל (Leslie & Keeble, 1987; Oakes, 1994). מגיל 3 ילדים מקשרים שיגור לסיבתיות מכאנית (Schlottmann, Allen, Linderoth, & Hesketh, 2002). ממצאים אלה מחזקים את הטענה שתפיסת סיבתיות קיימת בגיל צעיר מאד (על אף שקיים ויכוח מתמשך לגבי מקורה. ראו: Cohen, Amsel, Redford, & Casasola, 1998; Saxe & Carey, 2006).

עדיין מתנהל ויכוח לגבי המאפיינים המבניים של תהליך תפיסת הסיבתיות. מחקרים רבים מאז Michotte תמכו בטענתו שתפיסת סיבתיות במערכים המדמים שיגור היא מהירה מאד (מתרחשת כ-250 א"ש לאחר האינטראקציה בין האובייקטים), אוטומטית ונובעת ממאפייני הגירוי (Scholl & Tremoulet 2000). על-פי מחקרים אלה, תפיסת סיבתיות מצייתת למאפיינים המוכרים של תהליכים המבוצעים באופן מבני ואינם מושפעים מתהליכי עיבוד מידע ברמה גבוהה.

Blakemore ושות' (2001) השתמשו ב-fMRI (functional magnetic brain imaging) כדי לחקור את הקשרים העצביים של תפיסת סיבתיות בתרחישי התנגשות מהסוג בו השתמש Michotte. התוצאות תמכו בהשערה שסיבתיות מכנית מסוג זה מעובדת באופן אוטומטי על-ידי מערכת הראייה. מכאן, שהפניית קשב לקיומה של סיבתיות לא משפיעה על העיבוד העצבי של סוג זה של סיבתיות. תרחישי השיגור בהם השתמשו Blakemore ושות' עוררו אזורים מוחיים כמו MT/V5 הידוע במרכזיותו בתפיסת תנועה, ה-superior temporal sulcus (STS), שנמצא כמכיל תאי עצב הרגישים לאינטראקציה של יד עם אובייקט (כאשר יש קשר סיבתי באינטראקציה זו), וה-Intraparietal sulcus השמאלי, באופן מובהק יותר מאשר תרחישים

דומים אך ללא שיגור. ממצאים אלה תומכים בטענה שמערכת הראייה משחזרת את המבנה הסיבתי של העולם על-ידי ייחוס תכונות של סיבתיות, ממש כמו שהיא משחזרת את המבנה הפיזיקאלי של העולם על-ידי ייחוס תכונות כמו תלת-ממדיות לאובייקטים. באופן ממוקד יותר, הממצאים הללו מציעים שיתכן והאזורים המוחיים שנמצאו פעילים (כמפורט לעיל) משחקים תפקיד חשוב באיתור סיבתיות בתרחישים ויזואליים.

מודלים ראשוניים לייצוג מנטאלי של סיבתיות התבססו על הסתברות אירועים (למשל: Haggmayer & Waldmann, 2000; Lagnado, Waldmann, Haggmayer & Sloman, 2004; Sobel, Tenenbaum, & Gopnik, 2006) או על תנאי לוגי המנוגד לעובדות (Counterfactual) (למשל: Lewis, 1973; Mackie, 1974; Kahneman & Tversky, 1982). מודלים אלה סיפקו הערכות קרובות לשיפוטי סיבתיות של בני אדם. עם זאת, על-פי Wolff (2007), הם מתארים את השפעת הסיבתיות ולא בהכרח את אופן ייצוג המנטאלי. מודלים קאוונטרפקטואליים מקשרים סיבתיות עם תנאים הכרחיים, בעוד שאנשים נוטים לקשר סיבתיות עם תנאים מספיקים (Mandel, 2003). בנוסף, שיפוטי סיבתיות יכולים להתבסס על התנסות אחת בלבד (למשל: Hubbard & Ruppel, 2002), ולכן לא ניתנים לתיאור על-ידי מודלים של הסתברות.

על מנת להתמודד עם הבעיות של שתי משפחות המודלים הללו, הוצעה משפחת מודלים אחרת, לה קרא Wolff (2007) "תיאוריות פיזיקאליסטיות". על פי מודלים אלה, סיבתיות מתוארת בעזרת ערכים פיזיקאליים כמו אנרגיה, מומנטום, כוחות וכדומה, אשר מועברים מהסיבה למסובב (ראו: Shultz, 1982; Leslie, 1994; Bullock, Gelman, & Baillargeon, 1982). לדוגמה, על-פי Leslie (1994), סיבתיות פיזיקאלית מיוצגת על-ידי תיאוריה של גופים, המתארת אובייקטים כמעבירים או מקבלים של מובן פרימיטיבי של כוחות. מודלים אלה מניחים שאנשים מודעים לקיומם של תהליכים בלתי ניתנים לצפייה ישירה (כגון אנרגיה וכוחות). מודעות זו מתבססת על אינטואיציה: אם אובייקט נזרק על אדם והאדם נפל, הרי שהאדם חש בכוח ולא

רק באובייקט. אילו אותו אובייקט היה נזרק בעוצמה חלשה יותר הייתה התחושה שלו שונה (Bigelow, Ellis, & Pargetter, 1988). התהליך של חישוב הכוחות מתוך המאפיינים הנצפים (הקינטיים) נקרא "Inverse dynamics" ונמצא כי בני אדם מצליחים לבצע תהליך זה לפחות במידה מסוימת (למשל: Kaiser, Proffitt, 1984; Kaiser & Proffitt, 1983; Clement, 1983; Whelan, & Hecht, 1992). עם זאת, ייצוג המנטאלי של הכוחות והאנרגיה אינו מדויק (כפי שתואר לעיל במחקריהם של McCloskey ושות'). רוב המודלים לא מייחסים חשיבות רבה למאפייני האובייקטים בסיטואציה, והם מוגבלים למקרים בהם יש מגע ישיר המאפשר העברת או קבלת כוח. לטעתנו של Wolff (2007), מודלים אלה (כמו קודמיהם) סובלים גם מקושי בהבחנה בין "סיבתיות" לבין אירועים אחרים המערבים העברת אנרגיה (כמו מניעה או עיכוב ואפשר (Enable)). כדי לפתור חיסרון זה, Wolff (2007) הציע את ה-Dynamics model (המבוסס על מודל קודם מאת Talmy, 1985, 1988) כמודל לייצוג מנטאלי של סיבתיות. גם מודל זה הינו מודל "פיזיקאליסטי", וככזה הוא מניח כי אנשים מייצגים סיבתיות באופן הדומה ליחסי הסיבתיות האמיתיים בעולם וכי אנשים יכולים להסיק על סיבתיות באירועים לא-פיזיקאליים על-ידי אנלוגיה לסיבתיות פיזיקאלית. אך שלא כמו מודלים קודמים, הוא אינו מקשר סיבתיות להעברת או החלפת "כמויות פיזיקאליות" (אנרגיה או כוח), אלא לדפוס של מספר כוחות יחד עם ווקטור מיקום המורה על המצב הסופי. למשל, בדוגמא הבאה: "תחתית הגומי תגרום לכוס להישאר במקומה", אין רצף אירועים של העברת או החלפת אנרגיה ובכל זאת מדובר בהסקה על סיבתיות. בדוגמא מוצג דפוס של כוחות שהופך את האירוע לסיבתי. יתרונו של המודל הוא שהוא מבחין בין אירועים בהם אנשים מייחסים סיבתיות לאירוע, לבין אירועים בהם אנשים אינם מייחסים סיבתיות (אלא מונחים קרובים, כמו "אפשר" או "מניעה").

סיכום

התחום העוסק בהבנת מודלים מנטאליים בפיסיקה נחקר מסורתית ע"י מחוננים למדע, פסיכולוגים ולאחרונה חוקרי מוח. הסקירה שהובאה כאן ניסתה לשקף שלושה היבטים אלו. חקר

למידת פיסיקה הינו מעניין במיוחד, שכן הוא משקף למידה פורמאלית – סימבולית המבוססת על מניפולציות מתימטיות, בדומה לזו המתרחשת במסגרת הבית-ספרית, עם בניית מודלים המבוססת על תפיסה חושית. השילוב בין השתיים וההתאמה ההדדית, הם אלו שעושים את חקר למידת הפיסיקה לכל כך מעניין, ורלוונטי גם לחקר החשיבה והמוח, לחקר למידת פיסיקה פורמאלית וליישומם לקידום ותגבור למידת הפיסיקה.

למשל, יישומים אפשריים הינם בתכנון האינטראקציה החושית בעולמות וירטואליים ללמידת פיסיקה, תוך שילובם עם ייצוגים מתמטיים. כך ניתן לאחד בין ייצוגים משני סוגים שהינם אבני יסוד בלמידת פיסיקה: סנסוריים וסימבוליים. איחוד זה יאפשר את שיפור הלמידה והתאמתה לתהליך הלמידה והתפישה החושי והטבעי.

- Aguiar, A., & Baillargeon, R. (1999). 2.5-month-old infants' reasoning about when objects should and should not be occluded. *Cognitive Psychology*, 39, 116–157.
- Baillargeon, R., & Wang, S. (2002). Event categorization in infancy. *Trends in Cognitive Sciences*, 6, 85–93.
- Bigelow, J., Ellis, B., & Pargetter, R. (1988). Forces [Abstract]. *Philosophy of Science*, 55, 614–630.
- Brouwer, A. M., Brenner, E., & Smeets, J. B. (2002). Perception of acceleration. *Psychophys.* 64, 1160-1168.
- Bullock, M., Gelman, R., & Baillargeon, R. (1982). The development of causal reasoning. In W. Friedman (Ed.), *The developmental psychology of time* (pp. 209–255). London: Academic Press.
- Caramazza, A., McCloskey, M., & Green, B. (1981). Naive beliefs in "sophisticated" subjects: Misconceptions about trajectories of objects. *Cognition*, 9, 117-123.
- Champagne, A. B., Klopfer, L. E., & Anderson, J. H. (1980). Factors influencing the learning of classical mechanics. *American Journal of Physics*, 48, 1074-1079.
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50, 66-71.

- Clement, J. (1983). A conceptual model discussed by Galileo and used intuitively by physics students. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 299–324). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Cooke, N. J., & Breedin, S. D. (1994). Constructing naive theories of motion on the fly. *Memory & Cognition*, 22, 474-493.
- Dehaene S, Cohen L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.
- diSessa, A. A. (1983). Phenomenology and the evolution of intuition. In D. Gentner & A. Stevens (Eds), *Mental models* (pp. 5-33). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- diSessa, A. A. (1988). Knowledge in pieces. In G. Forman & P. Pufall (Eds.), *Constructivism in the computer age* (pp.49-70). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Eckstein, S. G., & Kozhevnikov, M. (1997). Parallelism in the development of children's ideas and the historical development of projectile motion theories. *International Journal of Science Education*, 19, 1057-1073.
- Epstein, H. T., & Toepfer, C. F., Jr. (1978). A neuroscience basis for middle grades education. *Educational Leadership*, May, 656–660.
- Freyd, J. J., & Finke, R. A. (1984). Representational momentum. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10, 126-132.
- Freyd, J. J., & Jones, K. T. (1994). Representational momentum for a spiral path. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 20, 968-976.

- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15, 20–25.
- Hagmayer, Y., & Waldmann, M. R. (2000). Simulating causal models: The way to structural sensitivity. In L. R. Gleitman & A. K. Joshi (Eds.), *Proceedings of the Twenty-Second Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 214–219). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Hespos, S.J., & Baillargeon, R. (2001). Knowledge about containment events in very young infants. *Cognition*, 78, 204–245.
- Hubbard, T. L. (1995a). Cognitive representations of motion: Evidence for representational friction and gravity analogues. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 21, 241-254.
- Hubbard, T. L. (1995b) Environmental invariants in the representation of motion: Implied dynamics and representational momentum, gravity, friction, and centripetal force. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2, 322-338.
- Hubbard, T. L. (1996). Representational momentum, centripetal force, and curvilinear impetus. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 22, 1049-1060.
- Hubbard, T. L. (1997). Target size and displacement along the axis of implied gravitational attraction: Effects of implied weight and evidence of representational gravity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 23, 1484-1493.
- Hubbard, T. L. (1998). Representational momentum and other displacement in memory as evidence for nonconscious knowledge of physical principles. In

- S. Hameroff, A Kaszniak, & A. Scott (Eds.), *Toward a science of consciousness: II. The 1996 Tucson discussion and debates* (pp. 505-512). Cambridge, MA: MIT Press.
- Hubbard, T. L., Blessum, J. A., & Ruppel, S. E. (2001). Representational momentum and Michotte's (1946/1963) "Launching effect" paradigm. *Journal of Experimental Psychology: learning, Memory, and Cognition*, 27, 294-301.
- Hubbard, T. L., & Ruppel, S. E. (2002). A possible role of naïve impetus in Michotte's "launching effect": Evidence from representational momentum. *Visual Cognition*, 9, 153–176.
- Indovina, I., Maffei, V., Bosco, G., Zago, M., Macaluso, E., & Lacquaniti, F. (2005). Representation of Visual Gravitational Motion in the Human Vestibular Cortex. *Science*, 308, 416-419.
- Johnson, P. E. (1964). Associative meaning of concepts in physics. *Journal of Educational Psychology*, 55, 84-88.
- Jokisch, D., & Troje, N. F. (2003). Biological Motion. *Journal of Vision*, 3, 252-262.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1982). The simulation heuristic. In D. Kahneman, P. Slovic, & A. Tversky (Eds.), *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases* (pp. 201–210). Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Kaiser, M. K., & Proffitt, D. R. (1984). The development of sensitivity to causally-relevant dynamic information. *Child Development*, 55, 1614–1624.

- Kaiser, M. K., Proffitt, D. R., & Anderson, K. A. (1985). Judgments of natural and anomalous trajectories in the presence and absence of motion. *Journal of Experimental Psychology: Learning, memory, and Cognition*, 11, 795-803.
- Kaiser, M. K., Proffitt, D. R., Whelan, S. M., & Hecht, H. (1992). Influence of Animation on Dynamical Judgments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 669-690.
- Kaiser, M. K., Proffitt, D. R., Whelan, S. M., & Hecht, H. (1992). The influence of animation on dynamical judgments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 669-690.
- Kim, I. K., & Spelke, E. S. (1992). Taking the intentional stance at 12 month of age. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 385-396.
- Kozhevnikov, M. & Hegarty, M. (2001). Impetus beliefs as default heuristics: Dissociation between explicit and implicit knowledge about motion. *Psychonomic Bulletin & Review* 2001, 8, 439-453.
- Krist, H., Fieberg, E. L., & Wilkening, F. (1993). Intuitive physics in action and judgment: The development of knowledge about projectile motion. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 19, 952-966.
- Kwon, Y.-J., & Lawson, A. E. (2000). Linking Brain Growth with the Development of Scientific Reasoning Ability and Conceptual Change during Adolescence. *Journal of Research in science teaching*, 37, 44-62.
- Lacquaniti, F., & Maioli, C. (1989). Adaptation to suppression of visual information. *Journal of Neuroscience*, 9, 134-140.

- Lagnado, D. A., Waldmann, M. R., Hagmayer, Y., & Sloman, S. A. (2006).
Beyond covariation: Cues to causal structure. In A. Gopnik & L. Schulz
(Eds.), *Causal learning: Psychology, philosophy, and computation*. Oxford,
England: Oxford University Press.
- Leslie, A. M. (1994). ToMM, ToBy, and agency: Core architecture and domain
specificity. In L. Hirschfield & S. Gelman (Eds.), *Mapping the mind:
Domain specificity in cognition and culture* (pp. 119–148). Cambridge,
England: Cambridge University Press.
- Lewis, D. (1973). Causation. *Journal of Philosophy*, 70, 556–567.
- Lisberger, S. G., & Movshon, J. A. (1991). Visual motion analysis. *Journal of
Neuroscience*, 19, 2224-2233.
- Mackie, J. L. (1974). *The cement of the universe*. Oxford, England: Oxford
University Press.
- Macnamara, J. & Austin, G. (1993). Physics and Plasticine. *Canadian
Psychology*, 34, 225-230.
- Mandel, D. R. (2003). Judgment dissociation theory: An analysis of differences in
causal, counterfactual, and covariational reasoning. *Journal of
Experimental Psychology: General*, 132, 419–434.
- McBeath, M. K., Shaffer, D. M., & Kaiser, M. K. (1996). How baseball outfielders
determine... *Science*, 268, 569-574.
- McCloskey, M. (1983). Naive theories of motion. In D. Centner & A. L. Stevens
(Eds.), *Mental models* (pp. 299-324). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.

- McCloskey, M., Caramazza, A., & Green, B. (1980). Curvilinear motion in the absence of external forces: Naive beliefs about the motion of objects. *Science*, 210, 1139-1141.
- McIntyre, J., Zago, M., Berthoz, A., & Lacquaniti, F. (2001). Does the brain model Newton's law?. *Nature Neuroscience*, 4, 693-697.
- Michotte, A. (1963). *The perception of causality* (T. R. Miles & E. Miles, Trans.). New York: basic Books. (Original work published 1946).
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, 6, 414-417.
- Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, 19, 1-32.
- Price C. M., & Gildea D. L. (2000). Representations of Motion and Direction. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 18-30.
- Proffitt, D. R., & Gildea, D. L. (1989). Understanding natural dynamics. *Journal of Experimental Psychology: Human, Perception and Performance*, 15, 384-393.
- Ranney, M. (1994). Relative consistency and subjects' "theories" in domains such as naive physics: Common research difficulties illustrated by Cooke and Breedin. *Memory & Cognition*, 22, 494-502.
- Ranney, M., & Thagard, P. (1988). Explanatory coherence and belief revision in naive physics. In *Proceedings of the Tenth Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 426-432), Hillsdale, NJ: Erlbaum.

- Reed, C. L., & Vinson, N. G. (1996). Conceptual Effects on Representational Momentum. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 839-850.
- Rüsseler, J., Kuhlicke, D., & Münte, T. F. (2003). Human error monitoring during implicit and explicit learning of a sensorimotor sequence. *Neuroscience Research*, 47, 233-240.
- Rüsseler, J. & Rösler, F. (2000). Implicit and explicit learning of event sequences: evidence for distinct coding of perceptual and motor representations. *Acta Psychologica*, 104, 45-67.
- Shultz, T. R. (1982). Rules of causal attribution. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 47(1, Serial No. 194), 1–51.
- Simó, I. S., Krisky, C. M., & Sweeney J. A. (2005). Functional Neuroanatomy of Anticipatory Behavior: Dissociation between Sensory-driven and Memory-driven Systems. *Cerebral Cortex*, 15, 1982-1991.
- Sobel, D. M., Tenenbaum, J. B., & Gopnik, A. (2004). Children's causal inferences from indirect evidence: Backwards blocking and Bayesian reasoning in preschoolers. *Cognitive Science*, 28, 303–333.
- Spelke, E.S. (1994). Initial knowledge: Six suggestions. *Cognition*, 50, 431–445.
- Talmy, L. (1985). Force dynamics in language and thought. In W. Eilfort, P. Kroeber, & K. Peterson (Eds.), *Papers from the parasession on causatives and agentivity at the 21st regional meeting, Chicago Linguistics Society* (pp. 293–337). Chicago: Chicago Linguistics Society.

- Talmy, L. (1988). Force dynamics in language and cognition. *Cognitive Science*, 12, 49–100. Visula information about moving objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 975-986.
- Tresilian, J. R. (1995). Perceptual and cognitive processes in time-to-contact estimation: Analysis of prediction-motion and relative judgment tasks. *Perception and Psychophysics*, 57, 231–245.
- Twardy, C. R., & Bingham, G. P. (2002). Trajectories. *Percept. Psychophys.* 64, 956-965.
- Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education*, 1, 205-221.
- Wang, S. & Baillargeon, R. (2008). Detecting impossible changes in infancy: a three-system account. *Trends in Cognitive Sciences*, 12, 17–23.
- Watson, J. S., Banks, M. S., von Hofsten, C., & Royden, C. S. (1992). Biological Motion. *Perception*, 21, 69-79.
- Werkhoven, P., Snippe, H. P., & Toet, A. (1992). Detecting Change of Velocity. *Vision Research*, 32, 2313-2319.
- Wolff, P. (2007). Representing Causation. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136, 82–111.
- Verfaillie K., & d'Ydewalle, G. (1991). Representational Momentum and Event Course Anticipation in the Perception of Implied Periodical Motions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17, 302-513.

Zago, M. & Lacquaniti, F. (2005). Cognitive, perceptual and action-oriented representations of falling objects. *Neuropsychologia*, 43, 178–188.