

פעילות מוחית הקשורה להסקה לוגית בגאומטרייה בתלמידים בעלי רמות שונות של יכולת

ד"ר אילנה וויסמן

מרצה בכירה בחוג למתמטיקה במכללת שאנן ומנהלת מעבדה נירוקוגניטיבית לחקר יכולות ויצירתיות באוניברסיטת חיפה. מחקרה מתמקדים בחקר נירוקוגניטיבי (באמצעות EEG) הקשור לפתרון בעיות במתמטיקה ובחינת הבדלים אינדיווידואליים במהלך תהליך זה.



פרופ' מארק לייקין

פרופסור מן המניין בחוג לחינוך מיוחד ובחוג ללקויות למידה בפקולטה לחינוך באוניברסיטת חיפה. בעל תואר שני מהמחלקה ללקויות למידה, האוניברסיטה הפדגוגית הממלכתית של סנט פטרסבורג, רוסיה. כיום הוא גם מנהל מעבדת המחקר לחקר נירוקוגניטיבי של יצירתיות, יכולות ומחוננות באוניברסיטת חיפה ויו"ר הקתדרה לחינוך מיוחד של קוני-לוננפלד. מחקריו מתמקדים ברכישה ועיבוד של שפה דו-לשונית, מרכיבי שפה בתהליכי קריאה נורמליים וחריגים, פיתוח יצירתיות ונירוקוגניציה של מחוננים.



פרופ' רוזה לייקין

פרופסור מן המניין לחינוך מתמטי וחינוך מחוננים בפקולטה לחינוך, אוניברסיטת חיפה. כיום היא נמצאת בתפקיד דיקן הפקולטה ועורכת בכירה של כתב העת הבין-לאומי International Journal of Science and Mathematics Education. הקימה את מרכז חמ"ה - מרכז הבין-תחומי לחקר מחוננות והצטיינות. מחקרה של פרופ' לייקין מתמקדים ביצירתיות ויכולת מתמטית, עיצוב משימות, פוטנציאל מקצועי של מורים. היא מקדמת שילוב של מחקר נירוקוגניטיבי בתחום החינוך המתמטי.



פעילות מוחית הקשורה להסקה לוגית בגאומטרייה בתלמידים בעלי רמות שונות של יכולת

אילנה וייסמן, מרק לייקין ורוזה לייקין

תקציר

עיבוד מתמטי הקשור לפתרון בעיות גאומטריות קצרות הדורשות הסקה לוגית נבדק בקרב תלמידים הנבדלים ברמות של מחוננות כללית (G) ומצוינות במתמטיקה (EM) באמצעות פוטנציאלים חשמליים הקשורים באירועים (ERP – Event Related Potentials). שישים ושבעה בנים תלמידי תיכון השתתפו במחקר. משתתפי המחקר חולקו לארבע קבוצות מחקר מרכזיות שתוכננו על פי שילובים שונים של גורמי G ו-EM. לגורמים G ו-EM הייתה השפעה דומה על דיוק וזמן תגובה: תלמידי מצטיינים במתמטיקה (EM) ותלמידים מחוננים כללית (G) היו מדויקים יותר בהשוואה לעמיתיהם שלא מצטיינים במתמטיקה (NEM) ולא מחוננים (NG), בהתאמה. בו זמנית גורמים G ו-EM השפיעו אחרת על מדדים אלקטרו-פיזיולוגיים, עם אינטראקציה מובהקת בין גורמים G ו-EM הקשורה לאמפליטודות ERP בחלק משלבי פתרון בעיה. על סמך ההבדלים שנמצאו, אנו מציעים שהמחקר שלנו מראה שגורמים G ו-EM קשורים זה בזה אך מראים שהתכונות שונות בטבען. אנחנו מציעים שחלוקה לקבוצות יכולת במתמטיקה בבית הספר חייבת להביא בחשבון הצטיינות במתמטיקה ומחוננות כללית בו בזמן, כלומר גורם EM וגם גורם G.

מילות מפתח: פתרון בעיות בגאומטרייה; הסקה לוגית; מחוננות; מצוינות במתמטיקה; נוירוקוגניציה; אירועים מעוררי פוטנציאלים חשמליים (ERP).

מבוא

אין הגדרה שמקובלת על הכול עבור מחוננות מתמטית (Davis & Rimm, 2004). בדרך כלל, מחוננות מתמטית קשורה לביצועים מצוינים במתמטיקה או למחוננות כללית (Leikin, 2014). מחקרים על מחוננות בכלל או על מחוננות מתמטית בפרט משתמשים בקריטריונים מגוונים לבחירת אוכלוסיית המחקר וברוב הפעמים הישגים גבוהים במתמטיקה בבית הספר נחשבים מחוץ (אינדיקטור) למחוננות מתמטית (Ziegler & Raul, 2000). המונחים 'מחוננות מתמטית', 'יכולת מתמטית גבוהה', 'פוטנציאל מתמטי גבוה' ו'מצוינות במתמטיקה' נחשבים לרוב למונחים נרדפים (Leikin, 2020). תכונות של אנשים עם יכולת מתמטית גבוהה בדרך כלל מקושרות ליכולת טובה בעיבוד מידע מתמטי

ובפתרון בעיות, כולל חשיבה לוגית מתקדמת (Krutetskii, 1976).

לייקין ולייקין (Leikin & Leikin, 2009) הציעו להבחין בין מחוננות כללית למצוינות מתמטית שהם קשורים זה לזה אך שונים זה מזה באופיים ושיערו כי מחוננות מתמטית היא שילוב של שניהם. כדי לבחון השערה זו, הם הציגו מבנה של 2x2 המורכב מגורמים מחוננות כללית (G) ומצוינות במתמטיקה בית ספרית (EM), וערכו מחקר רב-ממדי בקנה מידה גדול בתלמידים בני 17–18 עם כל מיני שילובים של רמות של EM ו-G (Leikin & Lev, 2013; Leikin, Leikin et al., 2013; Leikin, Waisman et al., 2013; Paz-Baruch et al., 2014; Paz-Baruch et al., 2016; Leikin et al., 2016; Waisman et al., 2014).

מחקרים המתמקדים במאפיינים קוגניטיביים מראים שגורם G קשור לחשיבה אנלוגית, רכישת מידע חדש, יישום של אסטרטגיות מגוונות בפתרון בעיות (Steiner & Carr, 2003), זיכרון לטווח קצר, כן למהירות עיבוד (Paz-Baruch et al., 2014), ואילו גורם EM קשור לזיכרון מרחבי-חזותי (Paz-Baruch et al., 2016). כמו כן נמצא כי קיים מתאם גבוה בין מנת משכל (IQ) לזמן תגובה (RT – Reaction Time) על משימות כרונומטריות וטען כי זמן תגובה במשימות אלו יכול לשמש מדד של מנת המשכל (Jensen, 2006).

במהלך השנים נעשו כמה מחקרים לחקר הבסיס הנוירופיזיולוגי של מחוננות כללית ובפרט מחוננות מתמטית (כאשר האוכלוסייה של מחוננים מתמטית זוהתה בעיקר באמצעות הישגיהם הגבוהים במתמטיקה). באמצעות מתודולוגיית הדמיה תפקודית של המוח באמצעות תהודה מגנטית (fMRI – Functional Magnetic Resonance Imaging) מצאו החוקרים כי מוחם של אנשים מחוננים הוא בעל המיספרה ימנית מפותחת (Prescott et al., 2010) וקישוריות מוגברת בין חלקי המוח (Descio et al., 2011), וכן בעל יכולת להפעיל אזורים מוח מותאמי משימה בדרך מתוזמנת ומתואמת היטב בעת עשיית רוטציות מנטליות או משימות לא מתמטיות אחרות (O'Boyle, 2005). באמצעות מתודולוגית רישום חשמלי של גלי המוח באמצעות אלקטרודות שמניחים על גבי הקרקפת (EEG – Electroencephalography) על



כ-100 אלפיות שנייה לאחר הצגת גירוי כלשהו ומבטא חישה ותפיסה של הגירוי, וגם רכיב P300, גל חיובי המופיע כ-300 אלפיות שנייה לאחר הגירוי ונחשב למשקף תהליכים המעורבים בהערכת גירוי או סיווג וכן תהליכי זיכרון. רכיבים מאוחרים החל מ-300 אלפיות שנייה (או פוטנציאלים מאוחרים) קשורים לקשב סלקטיבי, לתהליכים הכוללים סיווג או עדכון ייצוגי זיכרון של גירויים ופעילות קבלת החלטות (Luck, 2014).

מחקרי ERP דיווחו כי לאנשים אינטליגנטים היה זמן חביון של רכיבי ERP קצר יותר (למשל, Jolij et al., 2007) ואמפליטודות ERP נמוכות יותר (Polich & Kok, 1995), ואילו מחקרים אחרים מצאו שאמפליטודות ERP (במיוחד של P300) גבוהות יותר אצל אנשים בעלי אינטליגנציה גבוהה יותר בהשוואה לאלה עם אינטליגנציה נמוכה יותר (Hill et al., 2011; Zhang et al., 2007).

על סמך סקירת ספרות זו שיערנו כי כל אחד מגורמי G ו-EM יכול לעודד יעילות עצבית בעת פתרון בעיות מתמטיות. עם זאת, במחקר הקודם שלנו מצאנו שפעילות חשמלית במהלך פתרון משימות שקשורות לפונקציות הייתה הכי נמוכה בקבוצת נבדקים G-EM, מחוננים שגם מצטיינים במתמטיקה (Waisman et al., 2014).

היות שיש הבדלים אינדיווידואליים בתהליכים קוגניטיביים הקשורים למתמטיקה, אפשר להשתמש בשיטות של מדעי המוח הקוגניטיביים כדי להבין טוב יותר איך הבדלים אלה באים לידי ביטוי בביצועים מתמטיים (De Smedt & Verschaffel, 2010). שימוש במדעי המוח יכול לעזור בחקירת תופעה של מחוננות מתמטית שלא הוגדרה היטב. שיטת אירועים מעוררי פוטנציאלים (ERP) מאפשרת מעקב מתמשך ורציף אחר פעילות קוגניטיבית (Neville et al., 1993) כאשר רכיבי ERP מסוימים קשורים לתהליכים קוגניטיביים למיניהם. לכן השתמשנו בשיטת אירועים מעוררים פוטנציאלים (ERP) מתוך התמקדת במדדים אלקטרו-פיזיולוגיים והתנהגותיים שקשורים בהסקה לוגית בגאומטריה בקבוצות משתתפים שנבדלים ברמות של G ו-EM.

תלמידים בעלי יכולת גבוהה במתמטיקה נבדלים מתלמידים אחרים ביכולת להסקה לוגית בנושא קשרים איכותיים ומרחביים (Deal & Wismer, 2010; Gardner, 1976; Krutetskii, 2006). מחקרי מוח קודמים הוכיחו כי יכולת חשיבה יוצאת מן הכלל בקרב אנשים בעלי כישרון מתמטי נתמכת ברשת מוחית מאורגנת בדרך אחרת (למשל, Desco et al., 2011). לאחר תצפיות אלו, החלטנו לבחון את הפעילות המוחית של תלמידים במהלך פתרון משימות גאומטריות הדורשות הסקה לוגית.

גבינס וסמית (Gevins & Smith, 2000) הראו כי רמות של אינטליגנציה כללית קשורות לעוצמת הפעילות החשמלית של המוח ולהתפלגות של פעילות זו על גבי הקרקפת. יש עדויות חזקות שאנשים בעלי אינטליגנציה גבוהה יותר מציגים פעילות מוחית נמוכה יותר (יעילה יותר) בהשוואה לאנשים בעלי אינטליגנציה נמוכה יותר במהלך ביצוע משימות קוגניטיביות (Neubauer & Fink, 2009). תופעה זאת ידועה בשם "השערת יעילות עצבית" (neural efficiency hypothesis). מחקרים מצאו כי תופעת היעילות העצבית קשורה גם למומחיות של אנשים בתחום מסוים (במקרה שלנו מצוינות במתמטיקה) (Grabner et al., 2006). יש לציין כי יש חוסר עקביות בממצאים הנוגעים למידת הפעילות המוחית בקשר למומחיות: חלק מהמחקרים מדווחים על עלייה בפעילות המוח לאחר התרגול בעוד אחרים טוענים ההפך (Kelly & Garavan, 2005). במחקר של וייסמן ואחרים (Waisman et al., 2023) נמצא כי תלמידים שמצטיינים במתמטיקה (EM) הציגו פעילות חשמלית (EEG) גבוהה יותר בהשוואה לזו של תלמידים שלא מצטיינים במתמטיקה (NEM). אחד ההסברים לחוסר עקביות זו הוא כי היעילות העצבית מושפעת מאופי וקושי המשימה, למשל, מידת המעורבות של זיכרון לטווח ארוך בפתרון (Neubauer & Fink, 2009). כלומר יעילות עצבית באה לידי ביטוי כאשר אנשים מתמודדים עם משימות בעלי קושי (סובייקטיבי) נמוך עד בינוני. עם זאת, כאשר מורכבות המשימה עולה לרמת קושי גבוהה, אנשים אינטליגנטים יותר כנראה משקיעים משאבים קוגניטיביים רבים בהשוואה לאנשים אינטליגנטים פחות (Dunst et al., 2014). יתר על כן, מחקרים נוירוקוגניטיביים החוקרים את השפעת האימון על המוח מצאו כי היעילות העצבית תלויה גם כמות ואיכות של הלמידה (Neubauer & Fink, 2009).

בחלק מהמחקרים הנוירוקוגניטיביים בתחום האינטליגנציה נעשה שימוש במתודולוגיית אירועים מעוררים פוטנציאלים חשמליים (ERP – Event related potentials). שיטה זו מתמקדת במדדים האלקטרו-פיזיולוגיים שמשקפים שינויים בפעילות החשמלית של מערכת העצבים המרכזית הנובעים מגירויים חיצוניים או מתהליכים קוגניטיביים שנעשים במוח. מדדים אלה מספקים מידע על התהליך הקוגניטיבי בזמן אמת לפני ההופעת התגובה החיצונית (Neville et al., 1993). מחקרי ERP הצליחו להגדיר כמה גלים חשמליים (הנקראים רכיבים) שמאפיינים עיבודים קוגניטיביים למיניהם. למשל, רכיב P100, גל חיובי בעל אמפליטודה (משרעת) מקסימלית שמופיעה



התמקדו במשתתפים בוגרים. הם לא עסקו בהנמקה לוגית בגאומטרייה, הם גם לא בחנו הבדלים אינדיווידואליים הקשורים לרמות מגוונות של יכולות מתמטיות. המחקר שלנו מנסה לעסוק בסוגיות אלה.

השערות המחקר

על סמך סקירת הספרות שהוצגה לעיל ותוצאות המחקרים הקודמים שלנו שיערנו ש-G ו-EM הם מאפיינים הקשורים זה בזה אך שונים זה מזה, ובחנו את ההשערות האלה:

השערה 1: ברמה התנהגותית

לגורמי G ו-EM יש אפקט מובהק על דיוק תגובות (Acc - Accuracy) ועל זמן לתגובות נכונות (RTc - Reaction Time for Correct responses) בקרב קבוצות משתתפי המחקר G ו-EM, יחסית למשתתפי קבוצות NG ו-NEM:

א1. Acc גבוה יותר

ב1. RTc קצר יותר

השערה 2: ברמה נוירוקוגניטיבית

א2. זמני חביון (זמן מהופעת הגירוי עד לנקודת קיצון של אמפליטודת הרכיב Latency) של P100 קצרים בקרב משתתפי קבוצות G ו-EM מאשר בקרב משתתפי קבוצות NG ו-NEM.

ב2. אמפליטודות ERP של פוטנציאלים מאוחרים נמוכות יותר (דבר שקשור לתופעת היעילות העצבית) בקרב משתתפי קבוצות G ו-EM מאשר בקרב משתתפי קבוצות NG ו-NEM.

השערה 3: שילובים של גורמי G ו-EM מחזקים הבדלים בביצועים בארבע הקבוצות העיקריות של המשתתפים הן במדדים התנהגותיים הן במדדים אלקטרו-פיזיולוגיים. תלמידים בקבוצה G-EM בעלי ביצועים טובים יותר בהשוואה לתלמידים בקבוצות NG-EM, G-NEM ו-NG-NEM בכל המדדים שהוזכרו בהשערות 1 ו-2.

השיטה

מטרת מחקר זה למצוא דמיון והבדלים במדדים התנהגותיים ואלקטרו-פיזיולוגיים הקשורים בפתרון בעיות גאומטריות קצרות הדורשות הסקה לוגית בתלמידים שנבדלים זה מזה ברמת מחוננות כללית (G) והצטיינות במתמטיקה (EM). במחקר זה כללנו ארבע קבוצות של משתתפים (G-EM, NG-EM, G-NEM, NG-NEM). בדקנו דיוק (Acc), זמן לתגובות נכונות (RTc), אמפליטודות, זמני חביון והתפלגות של פוטנציאל חשמלי על פני הקרקפת.

לפיתוח חשיבה לוגית יש תפקיד חשוב בלימודי מתמטיקה ולהפך (Durand-Guerrier et al., 2012). כאן מורים למתמטיקה וחוקרים בתחום החינוך המתמטי מעניקים חשיבות ללימודי גאומטרייה בתוכנית הלימודים במתמטיקה בגלל תפקידה בטיפוח חשיבה לוגית וויזואלית (Ayalon & Even, 2010; Pólya, 1973). יש קשר הדוק בין חשיבה לוגית לחשיבה דדוקטיבית – התהליך שבו אדם מסיק מסקנות (מסקנות הכרחיות מבחינה לוגית) הנשענות על עובדות שידועות מקודם (נתונים או הנחות יסוד) (Nunes et al., 2007), כמו למשל בהוכחות מתמטיות (Hanna & de Villiers, 2012).

כמה מחקרים בחינוך מתמטי התמקדו בפיתוח חשיבה דדוקטיבית של תלמידים (Hoyels & Küchemann, 2002) או בסיווג של אובייקטים גאומטריים (מרובעים) כדוגמה של חשיבה דדוקטיבית בגאומטרייה (Fujita, 2012). מחקרים מגוונים הציעו כי לעיתים קרובות הלומדים מתקשים בהגדרות הפורמליות של הצורות כולל הבנה של יחסי הייררכייה ביניהם (Erez & Yerushalmy, 2006; Fujita, 2012). כמו כן נמצא כי לעיתים קרובות חשיבה בגאומטרייה אצל סטודנטים מושפעת במידה ניכרת מדימוי מושג של צורות גאומטריות (Vinner, 1991).

במחקר הנוכחי ניסינו לנתח פעילות מוחית הקשורה להסקה לוגית בגאומטרייה (בעיות על מרובעים) דבר שלא נחקר קודם. מחקרים נוירוקוגניטיביים הקודמים (בעיקר מחקרי fMRI) שעסקו בהסקה לוגית, השתמשו בעיקר במשימות הדורשות הסקה לוגית בהתבסס על הנחות לא קשורות למתמטיקה, לדוגמה, "אם צורה היא ריבוע אז היא אדומה. הצורה היא ריבוע. לכן היא אדומה" (Qiu et al., 2007). הממצאים עמדו על הבדלים במיקום ובחוזק של פעילות מוחית הקשורה להסקה לוגית (Mathieu et al., 2015).

עם זאת, נראה שהפעילות המוחית במהלך הסקה לוגית תלויה בהליך הניסויי (Prado et al., 2011). רק מחקרי EEG מוגבלים עסקו בחקר פעילות חשמלית הקשורה לחשיבה דדוקטיבית (Bonfond & Van Der Henst, 2007; Qiu et al., 2003). רובם ניסו לאפיין את רכיבי ה-ERP שנגרמו באמצעות העיבוד הקשור בטיעונים דדוקטיביים. המחקרים מצאו שרכיב N200 מבוטא הכי הרבה ורכיב P300 מבוטא הכי פחות בתגובה על אי-התאמה לשונית בין הנחת היסוד ובין המסקנה, בעוד P300 היה בולט יותר כאשר הנחת היסוד והמסקנה התאימו. הם פירשו את תוצאות אלה בכך שהמשתתפים כבר הסיקו את המסקנה על סמך ההנחה העיקרית שהוצגה. שימו לב שרוב מחקרי מוח קודמים על חשיבה לוגית



משתתפים

המאמר מדווח על ממצאים שהתקבלו עם ניסוי מעבדה עם 67 משתתפים מארבע קבוצות המחקר. הקבוצות נבנו על סמך תהליך דיגום קפדני המתואר להלן:

1200 תלמידים שלמדו מתמטיקה בכיתות י' וי"א (בגילים 16–18) ברמה של 5 יח"ל או ברמה של 4 יח"ל נבחנו במבחן Progressive Matrix Test Raven's Advanced Scholastic (Raven, 2000) ובמבחן כללית (SAT-M) Assessment Test in Mathematics (SAT-M) לאבחון הצטיינות במתמטיקה. השתמשנו במבחן RPMT מקוצר שהכיל 30 פריטים עם הגבלת זמן של 15 דקות ובגרסה קצרה של ה-SAT-M שהכיל 35 פריטים עם הגבלת זמן של 30 דקות (Zohar, 1990).

תלמידי G נבחרו מכיתות מחוננים בתיכון. תלמידים אלה עשו בכיתה ג' בחינה ארצית ואובחנו בעלי מנת משכל (IQ) מעל 130. נוסף על כך השתמשנו במבחן RPMT לאימות גורם G אצל תלמידים ולשילוב תלמידים מכיתות רגילות בקבוצת G. למחקר נבחרו תלמידים מכיתות מחוננים עם ציוני RPMT של מעל 26 (מתוך 30). תלמידים שלא אובחנו מחוננים, נכללו בקבוצה G אם הם קיבלו 28 (מתוך 30) במבחן RPMT (1% מהאוכלוסייה הכללית). תלמידים הכלולים בקבוצת EM למדו מתמטיקה ברמה של 5 יח"ל עם ציון מעל 90 (מתוך 100, על סמך הערכת המורים שלהם). בקבוצה EM נכללו תלמידים עם ציון SAT-M מעל 26 (2% מהאוכלוסייה הכללית). תלמידים בקבוצת NEM למדו מתמטיקה ב-4 יח"ל עם ציון מעל 90. בפעמים שבהן ציון המתמטיקה בבית הספר ב-5 יח"ל היה מעל 94 הושמטו הקריטריונים של ציון SAT-M. סטודנטים שנכללו בקבוצת NEM למדו מתמטיקה ב-5 יח"ל עם ציון מתחת ל-80 או ב-5 יח"ל עם ציון מעל 90 וקיבל ציון SAT-M מתחת ל-22.

במאמר זה אנו מדווחים על ממצאים עבור 67 מתבגרים בנים בעלי יד ימין דומיננטית (הגיל הממוצע הוא 16.01, כאשר $SD = 0.73$, ללא הבדלים מובהקים בין קבוצות) וללא לקויות למידה שעבורם נתוני ה-EEG נאספו ללא רעש. בארבע קבוצות נכללו 16 תלמידי G-EM שאובחנו מחוננים ומצטיינים במתמטיקה; 19 תלמידי G-NEM שאובחנו מחוננים אך לא מצטיינים במתמטיקה; 17 תלמידי NG-EM שהצטיינו במתמטיקה אך לא מחוננים; 15 תלמידי NG-NEM שזוהו לא מחוננים ולא מצטיינים במתמטיקה. המחקר קיבל אישורים של ועדת הלסינקי, משרד החינוך וועדת אתיקה של אוניברסיטת חיפה.

הליך המחקר

מבחן ממוחשב שתוכנן באמצעות תוכנת E-Prime (Schneider et al., 2002) כלל 60 משימות (30 משימות עם תשובה נכונה ו-30 משימות עם תשובה לא נכונה). מקור המשימות הוא בתוכנית הלימודים בבית ספר. הן עוצבו על פי תאוריית אסטרטגיות פתרון הבעיות של פויה (Pólya, 1973) שכוללות ארבעה שלבים: הבנת הבעיה, תכנון ובניית שלבי הפתרון, ביצוע התוכנית והסתכלות לאחור (בדיקת הפתרון). במחקר שלנו כל משימה הוצגה בשלושה שלבים: S1 – הצגת סיטואציית הבעיה, S2 – הצגת שאלה ו-S3 – הצעת תשובה. בעוד S1 ו-S2 תואמים להבנת הבעיה ותכנון שלבי הפתרון, S3 מתאים לשלב הסתכלות לאחור במודל של פויה. השלב של תכנון התוכנית / ביצוע פתרון נותח באמצעות מדדי ERP. כל המשימות הוצגו מבחינה ויזואלית במרכז מסך המחשב בתווים שחורים על רקע אפור בתוך ריבוע לבן בעל ממדים של 5 ס"מ × 5 ס"מ. רצף האירועים ודוגמאות של המשימה מוצגים באיור 1.



איור 1: רצף האירועים ודוגמאות של המשימה

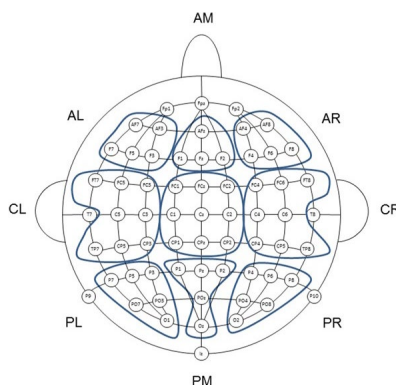


כזמן הממוצע שהושקע לאימות תשובה (בשלב S3) בכל משימות המבחן.

ניתוח של מדדים אלקטרו־פיזיולוגיים

ERPs נותחו באמצעות תוכנה לניתוח פעילות חשמלית Brain Vision Analyzer (Brain-products). ERPs סוננו במצב לא מקוון בטווח התדרים של 0.53–30 הרץ. פרקי זמן עם שינויים באמפליטודה העולים על ± 80 מיקרו־ולט בכל אלקטרודה לא הובאו לחישוב. תנועות העיניים תוקנו באמצעות אלגוריתם מתאים (Gratton et al, 1983). רכיבי גל של ה־ERP היו נעולים בזמן להתחלה של S1, S2 ו־S3. בשל ההבחנה בין השלבים המגוונים בפתרון בעיות (Pólya, 1973), ניתחנו את ה־ERPs עבור כל שלב בנפרד. ERP התקבלו באמצעות מיצוע של פעילות חשמלית בפרקי זמן של 200 אלפיות השנייה לפני הגירוי ועד 1200 אלפיות השנייה עבור S1, 2200 אלפיות השנייה עבור S2 ו־5000 אלפיות השנייה עבור S3. בניתוח לא נכללו משימות אם הנבדקים לא הגיבו בתוך 5000 אלפיות השנייה (כלומר משך התצוגה של חלון התשובה – S3). כ־40 משימות היו זמינות עבור כל משתתף ובכל שלב לקבלת ERP.

משטח הקרקפת חולק לתשעה אזורי אלקטרודות: שמאל קדמי (AL), אמצעי קדמי (AM), ימין קדמי (AR), שמאל מרכזי (CL), מרכז אמצע (CM), ימין מרכזי (CR), אחורי שמאלי (PL), אחורי באמצע (PM), אחורי ימין (PR) (ראו איור 2).



איור 2: אזורי אלקטרודות עבור ניתוח הסטטיסטי

רכיב מוקדם (P100): עקבנו אחר ההצעה של לוק (Luck, 2014, p. 314–315) "לכלול רק את האלקטרודות שבהן רכיב ה־ERP קיים ולא לכלול את כל האלקטרודות על גבי הקרקפת" ו"לנתח רק אלקטרודות שבהן הרכיב בולט ביותר". לכן הגבלנו את הניתוח של P100 לאלקטרודות אחוריות. נוסף על ההבדלים בין הקבוצות בדקנו גורם בין נבדקי Laterality המצביע על הצד של הקרקפת (ימין או שמאל) שדומיננטי מבחינת הפעילות החשמלית.

ב־S1 קבוצה "X" של תכונות של משפחת מרובעים הוצגה בדרך מילולית. ב־S2, כדי לבנות שרשרת לוגית, הופיעה אחת משני סוגי השאלות: (א) "אפשר להוכיח כי המרובע הוא..." או (ב) "המרובע יכול להיות...". ב־S3 הוצג "Y" שם של מרובע. בשביל שאלות מסוג א נדרשו הנבדקים לבחון האם X משמש תנאי מספיק ל־Y. עבור שאלות מסוג ב התבקשו המשתתפים לברר האם Y יכול להשתייך למשפחה של מרובעים שקבעו תכונות X. כלומר ב־S3 בחנו הנבדקים את נכונות ההסקה ההגיונית שתוכננה משלושת השלבים האלה: S1, S2 ו־S3.

במהלך S3 החליט כל נבדק בלחיצה על מקשי מתאים שבמקלדת אם התשובה המוצעת הייתה נכונה או לא נכונה. זמן תגובה הוגדר זמן שעבר בין הופעת S3 ללחיצה על המקש המתאים. פרקי זמן ורצף האירועים נקבעו במחקר פיילוט (Leikin, Leikin et al., 2013). אלפא־קרונבך נקבע על פי קריטריונים של דיוק ונמצא די גבוה ($\alpha = .722$).

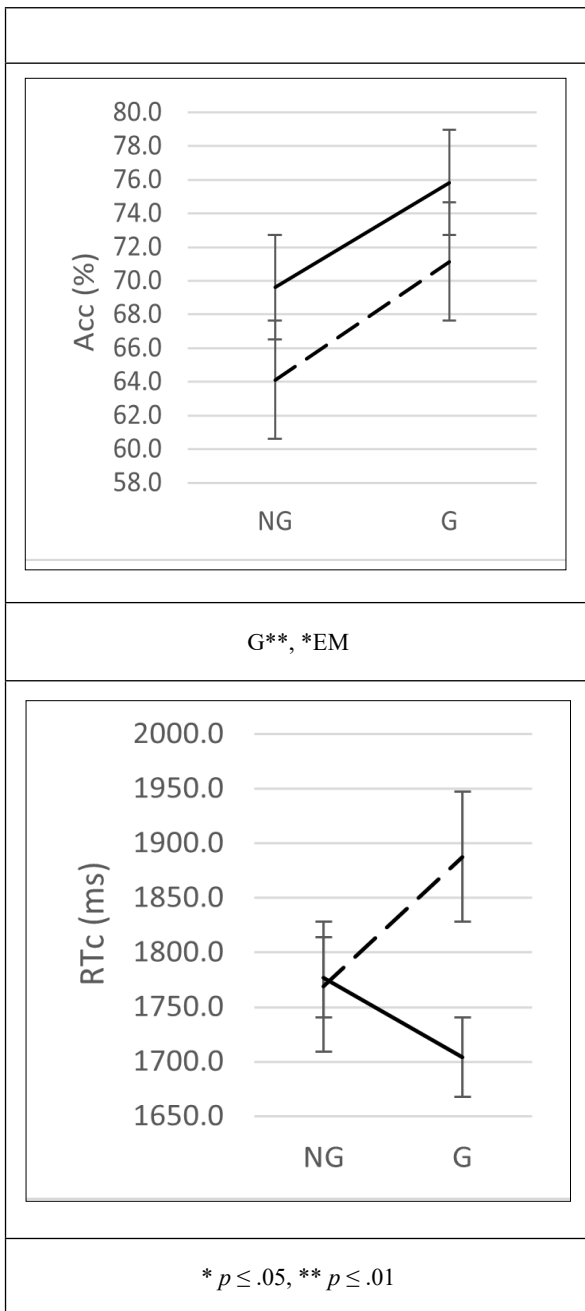
פעילות חשמלית על פני הקרקפת הוקלטה ברציפות באמצעות מערכת EEG בעלת 64 ערוצים BioSemi, Amsterdam, The) BioSemi ActiveTwo (Netherlands). המערכת פועלת בדרך זו: אלקטרודות מתחברות לכובע מתאים הכולל 64 אלקטרודות המאורגנות לפי מערכת 10–20 הבינ־לאומית. שתי אלקטרודות שטוחות מודבקות על צידי העיניים כדי לפקח על תנועות עין אופקיות. אלקטרודה שטוחה שלישית ממוקמת מתחת לעין שמאל כדי לנטר תנועות עיניים אנכיות ומצמוצים. איור 2 מתאר את מיקום האלקטרודות ואזורי האלקטרודות שנבחרו עבור ניתוח נתונים.

ניתוח נתונים

ניתוח נתונים התמקד בקווי הדמיון ובהבדלים בין ארבע הקבוצות של המשתתפים: G-EM, NG-EM, G-NEM ו־NG-NEM. ניתוח נתונים עבור מדדי ERP ועבור מדדים התנהגותיים נותח עבור תשובות עם תגובות נכונות. נבדקו הבדלים בין קבוצות בכל המדדים הנבדקים בעזרת ANOVA עבור גורם G וגורם EM כגורמים בין נבדקים. כאשר נמצא אפקט מובהק של גורם EM וגם של גורם G או כאשר נמצאה אינטראקציה מובהקת בין גורמי G ל־EM נעשו השוואות של G לעומת NG בקבוצות EM ו־NEM וגם EM לעומת NEM בקבוצות G ו־NG, בנפרד). להשוואות אלה נעשה תיקון Bonferroni עבור ערכי p .

ניתוח של מדדים התנהגותיים

בניתוח נבדקו דיוק (Acc) וזמן לתגובות נכונות (RTc). Acc נקבע באמצעות אחוז התגובות הנכונות של המשתתף על 60 משימות במבחן. זמן לתגובות נכונות (RTc) חושב



איור 3: Acc ו-RTc בארבע קבוצות משתתפים

ממצאים אלקטרו־פיזיולוגיים

רכיב מוקדם P100: טבלה 2 מתארת ממצאים מובהקים רכיב מוקדם P100. זיהינו את ה-P100 באלקטרודות אחוריות בשלבים S1, S2 ו-S3. לגורם G היה אפקט מובהק הן על זמן חביון הן על האמפליטודה של P100 ב-S3, על אמפליטודה בלבד של P100 ב-S2 ועל זמן חביון בלבד של P100 ב-S1. רכיב P100 הופיע לאחר מכן והיה בעל אמפליטודה גבוהה יותר בתלמידים מחוננים (G) מאשר בתלמידים לא מחוננים (NG).

פוטנציאלים חשמליים מאוחרים: ניתחנו את הפעילות החשמלית הממוצעות של רכיבים מאוחרים בפרק זמן של 350–650 אלפיות השנייה עבור S1 ו-220–350 אלפיות השנייה עבור S2 ו-S3. נוסף על ניתוחים עבור גורמי G ו-EM, עשינו ANOVA למדידות חוזרות על אמפליטודה הממוצעת של ה-ERP בהתחשב בשני גורמים בתוך נבדקים Caudality ו-Laterality. גורם Caudality מציין את חלוקת הקרקפת החל מהמצח ועד הצוואר לשלושה אזורים: קדמי, מרכזי ואחורי. גורם Laterality מציין את חלוקת הקרקפת לשלושה אזורים: ימני, אמצעי ושמאלי. הניתוח נעשה עבור כל אחד משלושת השלבים של משימה (S1, S2 ו-S3).

ממצאים

ממצאים התנהגותיים

מומצעים של Acc ו-RTc מוצגים בטבלה 1.

טבלה 1: סטטיסטיקה תיאורית עבור Acc ו-RTc בארבע קבוצות של משתתפים

כללי	Mean (SD)			
	NG	G		
72.6 (9.1)	69.6 (8.3)	75.8 (9.1)	EM	דיוק Acc (%)
68.0 (8.9)	64.1 (8.3)	71.1 (8.3)	NEM	
	67.0 (8.7)	73.3 (8.9)	כללי	
1741.6 (429.3)	1777.0 (440.6)	1704.0 (428.0)	EM	זמן לתגובות נכונות RTc (ms)
1835.0 (450.6)	1768.6 (523.5)	1887.5 (390.6)	NEM	
	1773.1 (473.3)	1803.6 (412.5)	כללי	

מצאנו שלגורמים EM ו-G הייתה השפעה מובהקת על ה-Acc. הדיוק של תלמידים מחוננים (G) היה גבוה באופן מובהק בהשוואה לזה של תלמידים לא מחוננים (NG) $[F(1,63) = 10.080, p < .01, \eta^2_p = .138]$. והדיוק של תלמידים מצטיינים במתמטיקה (EM) היה גבוה באופן מובהק בהשוואה לזה של תלמידים לא מצטיינים במתמטיקה (NEM) $[F(1,63) = 5.957, p < .05, \eta^2_p = .086]$ (ראו איור 3).

לא נמצא אפקט מובהק של גורמים G ו-EM על RTc (זמן לתגובות נכונות), ולכן אוששה רק השערה 1א.

איור מציג Acc (פנל עליון) ו-RTc (פנל תחתון) בארבע קבוצות המשתתפים בתוספת מדד פיזור שגיאת התקן.



טבלה 2: ממצאים מובהקים הקשורים ל-P100

אפקטים ואינטראקציות	שלב בפתרון בעיה	זמן חביון של P100	אמפליטודה של P100
גורם G	S1	$L(G) > L(NG)$ $5.221^*, \eta_p^2 = .077$	$Amp(G) > Amp(NG)$ $5.865^*, \eta_p^2 = .085$
	S2		
	S3	$L(G) > L(NG)$ $7.500^{**}, \eta_p^2 = .106$	
G * EM	S2		$Amp(NG-EM) > Amp(NG-NEM)$ $Amp(G-EM) < Amp(G-NEM)$ $6.585^*, \eta_p^2 = .095$
	S3		$5.299^*, \eta_p^2 = .078$
Laterality * EM	S1		PL, PM: $Amp(EM) > Amp(NEM)$ PR: $Amp(NEM) > Amp(EM)$ $F(1.733, 109.205) = 5.632^{**}, \eta_p^2 = .082$

L - זמן חביון, Amp - אמפליטודה; $p \leq .05$, $p^{**} \leq .01$; $d.f. (1, 63)$; כאשר לא מצוין

האחוריות מימין הייתה גבוהה יותר ב-NEM בהשוואה לזו של משתתפי EM.

לפיכך הממצאים הנוגעים לאמפליטודות של P100 סותרים חלקית את השערה 2 מכיוון שזמני חביון של P100 בתלמידי G היו ארוכים באופן מובהק בהשוואה לאלה של תלמידי NG. אף על פי שלא עסקנו בחוזק של רכיבים מוקדמים בהשערות המחקר, היינו רוצים להדגיש כי נראה כי אמפליטודה של P100 הייתה גבוהה יותר באופן מובהק עבור תלמידי G.

פוטנציאלים מאוחרים: טבלה 3 מתארת ממצאים מובהקים הקשורים בפוטנציאלים מאוחרים שנמצאו בשלבים S1, S2 ו-S3 במסגרות הזמן המוגדרות.

נמצאה אינטראקציה מובהקת של גורם G עם גורם EM על אמפליטודה של P100 ב-S2 ו-S3. האמפליטודה של P100 ב-NG-NEM הייתה נמוכה באופן מובהק בהשוואה לזו של תלמידי G-NEM [עבור S2: $F(1,63) = 12.546, p < .001, \eta_p^2 = .166$ ועבור S3: $F(1,63) = 11.929, p < .001, \eta_p^2 = .159$]. בזמן שאמפליטודה של P100 ב-NG-EM הייתה דומה בהשוואה לזו של משתתפי G-EM. נוסף על כך מצאנו אינטראקציה מובהקת של גורם EM עם Laterality על אמפליטודה של P100 ב-S1. אמפליטודה של P100 באלקטרודות אחוריות משמאל (PL) ובאמצע (PM) הייתה גבוהה יותר בתלמידים EM בהשוואה לזו של תלמידי NEM, בעוד האמפליטודה באלקטרודות

טבלה 3: ממצאים מובהקים הקשורים לאמפליטודה ממוצעת של פוטנציאלים מאוחרים

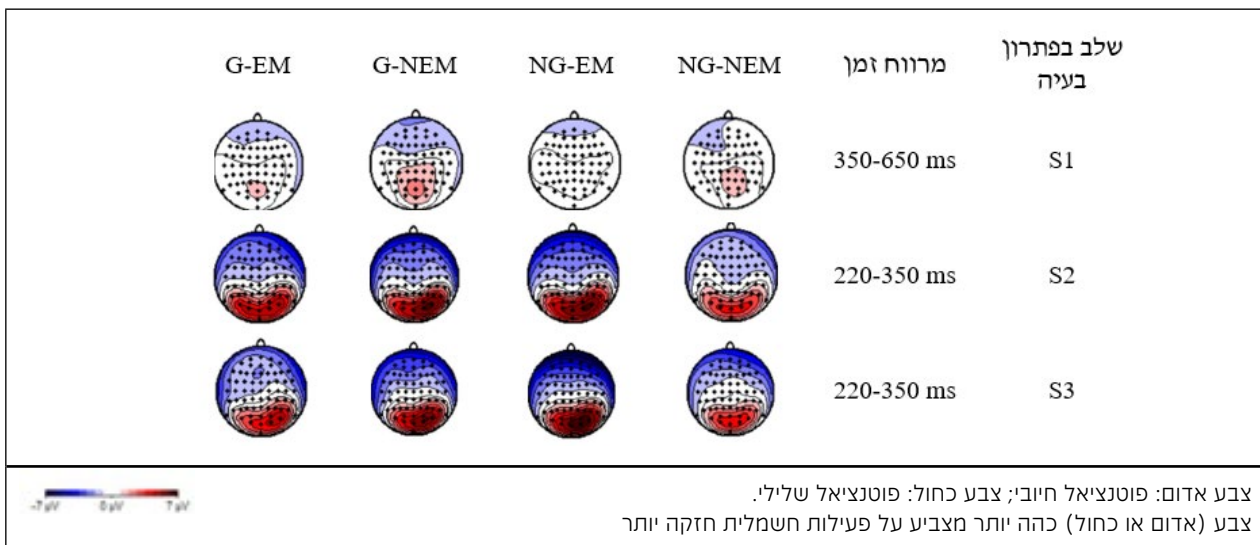
אפקטים ואינטראקציות	S1 350-650 ms	S2 220-350 ms	S3 220-350 ms
גורם EM $Amp(EM) > Amp(NEM)$	$F(1, 63) = 7.269^{**}$ $\eta_p^2 = .052$		
Caudality * EM A, P: $Amp(EM) > Amp(NEM)$ C: $Amp(EM) \sim Amp(NEM)$	$F(2, 126) = 3.425^*$ $\eta_p^2 = .052$		
Laterality * G R, L: $Amp(G) > Amp(NG)$ M: $Amp(G) < Amp(NG)$	$F(2, 126) = 4.086^*$ $\eta_p^2 = .061$		
G * EM $Amp(G-EM) < Amp(NG-EM)$ $Amp(G-NEM) > Amp(NG-NEM)$		$F(1, 63) = 4.557^*$ $\eta_p^2 = .067$	$F(1, 63) = 6.350^*$ $\eta_p^2 = .092$
Caudality * G * EM			$F(1.576, 99.280) = 3.712^*$ $\eta_p^2 = .056$

Amp - אמפליטודה, R - ימין, M - אמצעי, L - שמאל, A - קדמי, C - מרכזי, P - אחורי



בשלב S2 ו-S3 נמצאה אינטראקציה מובהקת של גורם G עם גורם EM במרווח זמן של 220–350 אלפיות שנייה. האמפליטודה של תלמידי NG-NEM הייתה נמוכה יותר בהשוואה לזו של תלמידי G-NEM, בזמן שהאמפליטודה של תלמידי G-EM הייתה דומה לזו של תלמידי NG-EM. ההבדל המובהק באמפליטודה הממוצעת בין תלמידי NG-NEM לתלמידי G-NEM נמצא ב-S3 $[F(1, 63) = 7.222, p < .01, \eta_p^2 = .103]$. נוסף על כך בשלב S3 נמצאה אינטראקציה מובהקת של Caudality עם גורמי G ו-EM. האמפליטודה הממוצעת בתלמידי G-NEM הייתה גבוהה באופן מובהק מזו של תלמידי NG-NEM באלקטרודות אחוריות לפיכך $[F(1, 63) = 8.136, p < .01, \eta_p^2 = .114]$. התוצאות של המחקר שלנו לא מאוששות השערה 3 מכיוון שתלמידי G-EM לא הציגו פעילות חשמלית נמוכה מובהקת לעומת קבוצות מחקר אחרות. איור 4 מציג מפות טופוגרפיות של התפלגות הפוטנציאל החשמלי על גבי הקרקפת במהלך פוטנציאלים מאוחרים בארבע קבוצות תלמידים בשלושת שלבים של פתרון הבעיה.

בשלב S1 במרווח הזמן של 350–650 אלפיות השנייה, נמצא אפקט מובהק של גורם EM. האמפליטודה עבור תלמידי EM הייתה גבוהה באופן מובהק מזו של תלמידי NEM. נוסף על כך נמצאה אינטראקציה מובהקת של Caudality עם גורם EM. האמפליטודה בתלמידי EM הייתה גבוהה יותר בהשוואה לזו של תלמידי NEM בחלקים הקדמיים והאחוריים של הקרקפת, בעוד האמפליטודה בתלמידי NEM הייתה דומה לזו של תלמידי EM בחלקים המרכזיים. ההבדל המובהק באמפליטודה בין תלמידי EM לבין תלמידי NEM נמצא בחלקים הקדמיים של הקרקפת $[F(1, 63) = 7.854, p < .01, \eta_p^2 = .111]$. יתר על כן, נמצאה אינטראקציה מובהקת של Lateralality עם גורם G. האמפליטודה של תלמידי G הייתה גבוהה יותר באזורים השמאליים והימניים בהשוואה לזו של תלמידי NG. בו בזמן נצפתה אצל תלמידי NG אמפליטודה גבוהה יותר באזורים האמצעיים של הקרקפת. ממצאים אלה מפריכים את השערה 2. אמפליטודות של ERP בתלמידי EM גבוהות בהשוואה לאמפליטודות של תלמידי NEM. עוד לא נמצא אפקט של גורם G.



איור 4: התפלגות של פוטנציאלים מאוחרים על פני הקרקפת עבור ארבע קבוצות משתתפים ב-S1, S2 ו-S3

דין

מחקר זה היה מכוון לפיתוח הבנה טובה יותר של המושג יכולות מתמטיות גבוהות. לשם כך בחנו ביצועי תלמידים שנבדלו בשילובים של מחוננות כללית (G) והצטיינות במתמטיקה (EM). בפתרון בעיות הקשורות להסקה לוגית בנושא מרובעים. ביצועי פתרון בעיות נותחו באמצעות דיוק (Acc) וזמן לתגובות נכונות (RTc), וכן באמצעות מדדים אלקטרו-פיזיולוגיים כגון אמפליטודות והתפלגות על הקרקפת של פוטנציאלים חשמליים המתעוררים

נוסף על כך כדי לחקור את הקשר הכללי בין ביצועים התנהגותיים להשפעות ה-ERP בתלמידי NEM, ביצענו ניתוחי מתאם בין אמפליטודות הממוצעות באזורי האלקטרודות האחוריות ב-S3 וה-RTc. נצפה מתאם חיובי בין אמפליטודה ממוצעת באזור אלקטרודות אחוריות אמצעיות PM במרווח זמן של 350–220 אלפיות שנייה ודיוק Acc $(r = .343, p < .05)$. מתאם זה מראה שאמפליטודה גבוהה ב-S3 קשורה בדיוק גבוהה בביצוע המשימה.



חוזק הפוטנציאל החשמלי בעת פתרון בעיה

בניתוח נתונים התנהגותיים גורמים EM ו-G הם בלתי תלויים יחסית מכיוון שיש להם השפעות אחרות על עיבוד בעת פתרון בעיות. שילוב של גורמי EM ו-G (בקבוצה G-EM) גורמים לעלייה ב-Acc. יתר על כן, ההשערה כי הצטיינות במתמטיקה ומחוננות קשורות זו בזו אך נבדלות במהותן, הופכת אפילו יותר בולטת כאשר אנו מנתחים את הנתונים האלקטרו-פיזיולוגיים. ניתוח הפוטנציאלים המוקדמים והמאוחרים של פעילות חשמלית במוח במהלך פתרון בעיות קצרות בגאומטרייה הדורשות הסקה לוגית מראה תופעות מעניינות הקשורות לגורמי G ו-EM בשלושת השלבים בפתרון בעיות (S1, S2 ו-S3). גם G וגם EM השפיעו באופן מובהק על אמפליטודות וזמני חביון של פוטנציאלים מוקדמים, וגם על אמפליטודות ממוצעות של פוטנציאלים מאוחרים (ראו טבלאות 2 ו-3). ההשפעה העיקרית של גורם G התקבלה ב-P100. כמו כן נצפתה אינטראקציה מובהקת בין גורמים G ו-EM לגבי אמפליטודה וזמן החביון של הרכיב P100. ניתוח הפוטנציאלים המוקדמים הראה שבכל שלבי פתרון הבעיות היה ל-P100 אמפליטודה גבוהה יותר וזמן חביון ארוך יותר בקרב תלמידי G בהשוואה לתלמידי NG (ההבדלים המובהקים סטטיסטית הופיעו ב-S1 ו-S3 עבור זמן חביון וב-S2 ו-S3 עבור אמפליטודות). שימו לב ש-P100 משויך בדרך כלל לקשב ועיבוד חזותי ראשוני של הגירוי (Doyle et al., 1996). לפיכך אנו מסבירים את ההשפעה של גורם G באמצעות הפעלה אנליטית מוקדמת וממוקדת יותר של קשב הקשור לגירויים הגורמים לעיכוב ב-P100 והאמפליטודה הגבוהה יותר שלו. ב-S2 ו-S3 מצאנו אינטראקציה מובהקת בין גורמי G ו-EM לאמפליטודה של P100. גורם G חיזק באופן מובהק את האמפליטודה בקבוצה NEM אך לא השפיע על אמפליטודה בתלמידי EM. לפיכך ההשפעה העיקרית של גורם G הופיעה רק בשלב של פוטנציאלים מוקדמים, ליתר דיוק ברכיב P100 ב-S1, S2 ו-S3, בעוד ההשפעה העיקרית של גורם EM הייתה ברורה רק בפוטנציאלים מאוחרים ב-S1. ליתר דיוק, האמפליטודה של P100 בתלמידי G הייתה גבוהה מזו של בתלמידי NG, והאמפליטודה הממוצעת של תלמידי EM ב-S1 הייתה גבוהה יותר מזה של משתתפי NEM. באותו זמן האינטראקציה המובהקת בין שני הגורמים האלה הושגה ב-S2 ו-S3 על P100 וגם במרווח זמן של 220–350 אלפיות השנייה (פוטנציאלים מאוחרים). האמפליטודה הממוצעת בקבוצת משתתפי NG-NEM הייתה נמוכה יותר בהשוואה לזו של תלמידי G-NEM, בעוד אמפליטודה ממוצעת בתלמידי NG-EM הייתה מעט

בזמן פתרון הבעיות. בעקבות מודל של אסטרטגיות לפתרון בעיות של פויה (Pólya, 1973) המשימות חולקו לשלושה שלבים והמדדים האלקטרו-פיזיולוגיים נבחנו בכל שלב אחד משלושת השלבים האלה. כדי להשיג את מטרת המחקר, התמקדנו בארבע קבוצות של משתתפים שנבדלו בשילוב הצטיינות במתמטיקה בית ספרית וברמת המחוננות הכללית. הבחירה במשימות ההסקה הלוגיות הושפעה מהמחקרים של קרוטצקי (Krutetskii, 1976) ופויה (Pólya, 1973) שהדגישו קשרים בין יכולות גבוהות במתמטיקה להסקה לוגית וכן בין חשיבה לוגית למומחיות בפתרון בעיות. מנקודת המבט שלנו, הישגים גבוהים במתמטיקה בבית הספר משקפים מומחיות בפתרון בעיות. ממצאים קודמים הדגישו את נטייתם של תלמידים בעלי יכולות גבוהות במתמטיקה לחשוב חשיבה לוגית על אובייקטים מתמטיים איכותיים ומרחביים (Krutetskii, 1976). העלינו שלוש השערות עיקריות שאושוו חלקית בלבד במחקר זה.

דיוק וזמן תגובה

במחקר זה שני גורמים G ו-EM השפיעו באופן מובהק על ה-Acc של פתרון בעיות, בעוד שילוב של גורמי G ו-EM חיזקו השפעה זו. לפיכך תלמידים מחוננים שמצטיינים במתמטיקה (G-EM) הפגינו דיוק גבוה ביותר מבין כל ארבע הקבוצות של משתתפים. לא נמצאו השפעות מובהקות של גורמים EM או G על RTc. זה יכול להיות בשל העובדה ש-RTc נמדד בשלב אימות התשובה. ממצא זה יכול להיחשב מגבלה של המחקר. בזמן שלכל המשתתפים הוקצו זמנים זהים בשלבים של הצגת המצב והצגת השאלה, אנו יכולים להניח שזמן עיבוד בכל אחד מהשלבים הוא אחר. עם זאת, ללא הבדלים מובהקים, RTc הקצר ביותר הוצג בקבוצת תלמידים G-EM, ואילו RTc הארוך ביותר נמצא בקרב תלמידי G-NEM (טבלה 1). אנו משערים שממצאים אלה מראים על מגמות בזמן הנדרש לפתרון המשימות בידי כל אחת מהקבוצות של משתתפים. התוצאות שלנו בנושא Acc בפתרון בעיות הדורשות הסקה לוגית בגאומטרייה הן עקיבות עם הממצאים של המחקר המכונן שעשה קרוטצקי (Krutetskii, 1976), ובו הוא הוכיח קשר חזק בין יכולות גבוהות במתמטיקה ליכולת חשיבה לוגית. כשאנחנו בוחנים רק מדדים התנהגותיים, אנו רואים שלגורמים EM ו-G יש השפעות דומות על ביצועים בפתרון בעיות. עם זאת, מדדים אלקטרו-פיזיולוגיים מראים כי תהליכים נוירוקוגניטיביים מגוונים מעורבים בפתרון בעיות הדורשות הסקה לוגית אצל תלמידים שנבדלים ברמת המחוננות הכללית או ברמת הצטיינות במתמטיקה הבית הספר. ההבדלים האלה משתקפים בחוזק הפוטנציאלים החשמליים במוח והתפלגותם על פני הקרקפת.



פתרון בעיות קשות הפעילות המוחית באנשים עם אינטליגנציה גבוהה היא גבוהה יותר. ולכן אנו מניחים שחסור מובהקות בפעילות חשמלית נמוכה בתלמידי G-EM במחקר הנוכחי יכול להיות מוסבר בכך שבעיות הדורשות הסקה לוגית הן קשות יחסית (Fujita, 2012).

התפלגות של פוטנציאלים חשמליים

מחקר זה הראה גם שלגורמים G ו-EM יש השפעה אחרת על התפלגות הפוטנציאלים החשמליים המתעוררים בעת פתרון משימות בגאומטרייה. ההבדלים בהתפלגות חשמלית נצפים מתוך התבוננות איכותית במפות טופוגרפיות של פוטנציאלים חשמליים והן מאינטראקציות מובהקות סטטיסטית של Lateralality או Caudality עם הגורמים G ו-EM. לדוגמה, מצאנו אינטראקציה של Lateralality עם גורם EM ב-S1 עבור P100 שבאה לידי ביטוי באמפליטודה גבוהה יותר עבור תלמידי EM בהשוואה לתלמידי NEM באזורי אלקטרודות משמאל ובאמצע, ואמפליטודה גבוהה יותר עבור תלמידי NEM בהשוואה לתלמידי EM באזורי האלקטרודות מימין. רכיב P100 נראה משקף עיבוד בשלבים ראשונים של מידע חזותי (Doyle et al., 1996) לפיכך אפילו בשלבי עיבוד ראשוניים, הצטיינות במתמטיקה (גורם EM) עשויה להשפיע על התפלגות פוטנציאלים חשמליים של המוח על פני הקרקפת. נוסף על כך האינטראקציה המובהקת של Lateralality עם גורם G התקבלה במרווח זמן של 350–650 אלפיות שניות ב-S1. בד בבד ב-S1 נמצאה אינטראקציה מובהקת של Caudality עם גורם EM עם עלייה באמפליטודה עבור תלמידי EM בהשוואה לתלמידי NEM בחלקים הקדמיים והאחוריים של הקרקפת. ידוע כי קליפת המוח הקדמית מעורבת במהלך פתרון בעיות מתמטיות וחשיבה דדוקטיבית, ואילו קליפת המוח האחורית נמצאה מעורבת בעיבוד חזותי-מרחבי (Prado et al., 2011). לפיכך נראה שתלמידי EM מפעילים אזורי אלקטרודות שהם רלוונטיים יותר ומתאימים יותר לאופי הבעיות.

סיכום

בלא מפתיע, גורמים G ו-EM הם מאפיינים אישיים הקשורים זה בזה. גורמים EM ו-G השפיעו בדומה על מדדים התנהגותיים: תלמידים מחוננים ותלמידים מצטיינים במתמטיקה היו מדויקים יותר מעמיתיהם שלא מחוננים ולא מצטיינים במתמטיקה, בהתאמה. בו בזמן גורמים G ו-EM השפיעו אחרת על מדדים אלקטרופיזיולוגיים עם אינטראקציה מובהקת בין גורם G לגורם EM הקשורים לאמפליטודות ERP בחלק משלבי פתרון. לפיכך אנו טוענים שגורמים G ו-EM נבדלים באופיים. יתר על כן, הממצאים שלנו מוכיחים

גבוהה מזו של משתתפי G-EM (טבלה 3). במיוחד במהלך S3, גורם G השפיע על עלייה מובהקת באמפליטודת ה-ERP הממוצעת בקבוצה NEM, בעוד גורם EM השפיע על עלייה מובהקת באמפליטודת ה-ERP הממוצעת בתלמידי G. ניתוחי מתאם בקבוצת NEM גילו מתאם חיובי בין אמפליטודה ממוצעת באזור אלקטרודות PM ב-S3 ו-Acc (כלומר Acc גבוה יותר הביא לאמפליטודות גבוהות יותר). הדבר עשוי להראות שהשפעת המחוננות על אמפליטודה ממוצעת בתלמידי NEM עשויה להיות תלויה ב-Acc. הממצאים האלה תומכים בהשערה שלנו על ההבחנה וקשר גומלין בין גורם G לגורם EM. כפי שצוין לעיל, ניתחנו אמפליטודה ממוצעת של פוטנציאלים מאוחרים (מרווחי זמן של 350–650 אלפיות השנייה ב-S1 ו-220–350 אלפיות השנייה ב-S2 ו-S3) ולא רכיב עצמו בגלל היעדר בולט של נקודות קיצון בגל ה-ERP.

אף על פי שרכיב P300 לא זוהה במפורש, אנו מציעים שהוא מוטמן באמפליטודה הממוצעת במהלך שני פרקי זמן שצוינו לעיל. בדרך כלל P300 משויך לזיכרון עבודה, עדכון, קידוד או שליפה מהזיכרון לטווח ארוך (Donchin & Coles, 1988). יתר על כן, נראה שרכיב זה רגיש לכמות משאבי הקשב שהוקצו לגירוי, עם אמפליטודות גדולות יותר המשקפות כמויות גדולות יותר של קשב (Polich, 2012). לפיכך אפשר להציע שהאמפליטודה הממוצעת הגבוהה ביותר בתלמידי G-NEM עשויה להיות מקושרת להערכת גירוי וסיווג (Leikin, 2002). כאן אמפליטודה של P300 גבוהה יותר בתלמידים מחוננים בהשוואה לאלה שאינם מחוננים (Jaušovec & Jaušovec, 2000). במחקר שלנו, תלמידי G-NEM הציגו אמפליטודות ממוצעות גבוהות באופן מובהק מאשר תלמידי NG-NEM; זה עשוי להתפרש כהקצאה של יותר משאבים מנטליים לעיבוד השאלה (S2) ולהסקת מסקנה סופית ואימות הפתרון (S3). בו בזמן, ב-S1 הראו תלמידי EM אמפליטודה ממוצעת גבוהה יותר בהשוואה לתלמידי NEM. שימו לב שב-S1 המאפיינים של מרובעים מוצגים למשתתפים, ולכן אנו מניחים שהעלייה באמפליטודה בקבוצת תלמידי EM ב-S1 יכולה להראות שתלמידי EM התחילו לעבד את התכונות של מרובעים על בסיס נושאים בגאומטרייה שנלמדו בעבר הכוללים זיהוי של משפחת מרובעים המתאימה.

ספרות מחקרית מציינת את הקשר בין יעילות עצבית לקושי במשימה (Dunst et al., 2014). במהלך פתרון בעיות קלות עד בינוניות, הפעילות המוחית באנשים עם אינטליגנציה גבוהה היא נמוכה יותר בהשוואה לזו באנשים בעלי אינטליגנציה נמוכה יותר, ואילו בעת



- De Smedt, B., & Verschaffel, L. (2010). Traveling down the road: From cognitive neuroscience to mathematics education ... and back. *ZDM—Mathematics Education*—649 ,(6)42 , 654. <https://doi.org/10.1007/s11858-010-0282-5>
- Deal, L. J., & Wismer, M. G. (2010). NCTM principles and standards for mathematically talented students. *Gifted Child Today*, 33(3), 55–65. <https://doi.org/10.1177/107621751003300313>
- Desco, M., Navas-Sanchez, F. J., Sanchez-González, J., Reig, S., Robles, O., Franco, C., Guzmán-De-Villoria, J. A., García-Barreno, P., & Arango, C. (2011). Mathematically gifted adolescents use more extensive and more bilateral areas of the frontoparietal network than controls during executive functioning and fluid reasoning tasks. *NeuroImage*, 57(1), 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.03.063>
- Donchin, E., & Coles, M. G. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*, 11(3), 357–427. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00058027>
- Doyle, M. C., Rugg, M. D., & Wells, T. (1996). A comparison of the electrophysiological effects of formal and repetition priming. *Psychophysiology*, 33(2), 132–147. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1996.tb02117.x>
- Dunst, B., Benedek, M., Jauk, E., Bergner, S., Koschutnig, K., Sommer, M., Ischebeck, A., Spinath, B., Arendasy, M., Bühner, M., Freudenthaler, H., & Neubauer, A. C. (2014). Neural efficiency as a function of task demands. *Intelligence*, 42(100), 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2013.09.005>

שמחוננות כללית אינה משמשת תנאי הכרחי או תנאי מספיק להצטיינות במתמטיקה הבית ספרית ולהפך. להתבוננות זו יש השפעות חשובות וחיוניות על חינוך מתמטי: אפשר לפתח מומחיות מתמטית באוכלוסייה רחבה הרבה יותר מזו של תלמידים מחוננים. תלמידים מחוננים (כמו כל התלמידים האחרים) צריכים לבחור את המקצועות העיקריים שלהם על פי ההעדפות שלהם, והם יכולים וצריכים להיות אחריהם ממתמטיקה עבור תלמידים רבים.

אנו טוענים שתלמידי G-EM זקוקים לגישות הוראה ולמידה מיוחדות בעת לימוד מתמטיקה יותר מכל קבוצה אחרת של תלמידים. על סמך ממצאים של לייקין ואחרים (Leikin et al., 2014) תלמידים אלה יכולים להפיק תועלת מסביבת למידה ייחודית שמספקת להם קצב למידה מהיר יותר, עבודה עצמאית יותר ומשימות מתמטיות מאתגרות יותר.

תודות

פרויקט זה התאפשר באמצעות התמיכה במענק 1447 מקרן John Templeton Foundation. הדעות המובעות בפרסום זה הן של המחברים ואינם משקפים בהכרח את השקפותיה של קרן John Templeton Foundation. אנו מודים לאוניברסיטת חיפה על התמיכה הנדיבה שהיא סיפקה עבור מחקר זה.

רשימת מקורות

- Ayalon, M., & Even, R. (2010). Mathematics educators' views on the role of mathematics learning in developing deductive reasoning. *International Journal of Science and Mathematics Education* 1154–1131 ,(6)8 , <https://doi.org/10.1007/s10763-010-9238-z>
- Bonnefond, M., & Van der Henst, J.-B. (2013). Deduction electrified: ERPs elicited by the processing of words in conditional arguments. *Brain and Language*, 124(3), 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2012.12.011>
- Davis, G. A., & Rimm, S. B. (2004). *Education of the Gifted and Talented*. Allyn & Bacon.



- Gratton, G., Coles, M. G., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 55(4), 468–484. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(83\)90135-9](https://doi.org/10.1016/0013-4694(83)90135-9)
- Hanna, G., & de Villiers, M. (Eds.). (2012). *Proof and proving in mathematics education: The 19th ICMI Study*. Springer.
- Hill, D., Saville, C. W. N., Kiely, S., Roberts, M. V., Boehm, S. G., Haenschel, C., & Klein, C. (2011). Early electrocortical correlates of inspection time task performance. *Intelligence*, 39(5), 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2011.06.005>
- Hoyle, C., & Küchemann, D. (2002). Students' understandings of logical implication. *Educational Studies in Mathematics*, 51(3), 193–223. <https://doi.org/10.1023/A:1023629608614>
- Jaušovec, N., & Jaušovec, K. (2000). Correlations between ERP parameters and intelligence: A reconsideration. *Biological Psychology*, 55(2), 137–154. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(00\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(00)00076-4)
- Jensen, A. R. (2006). *Clocking the mind: Mental chronometry and individual differences*. Elsevier.
- Jolij, J., Huisman, D., Scholte, S., Hamel, R., Kemner, C., & Lamme, V. A. (2007). Processing speed in recurrent visual networks correlates with general intelligence. *Neuroreport*, 18(1), 39–43. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000236863.46952.a6>
- Durand-Guerrier, V., Boero, P., Douek, N., Epp, S. S., & Tanguay, D. (2012). Examining the role of logic in teaching proof. In G. Hanna & M. de Villiers (Eds.), *Proof and proving in mathematics education: The 19th ICMI Study* (Vol. 15, pp. 369–389). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2129-6_16
- Erez, M. M., & Yerushalmy, M. (2006). "If you can turn a rectangle into a square, you can turn a square into a rectangle..." Young students experience the dragging tool. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, 11(3), 271–299. <https://doi.org/10.1007/s10758-006-9106-7>
- Fujita, T. (2012). Learners' level of understanding of the inclusion relations of quadrilaterals and prototype phenomenon. *The Journal of Mathematical Behavior*, 31(1), 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.jmathb.2011.08.003>
- Gardner, H. (2006). *Multiple intelligences: New horizons* (Rev. ed.). Basic Books.
- Gevens, A., & Smith, M. E. (2000). Neurophysiological measures of working memory and individual differences in cognitive ability and cognitive style. *Cerebral Cortex*, 10(9), 829–839. <https://doi.org/10.1093/cercor/10.9.829>
- Grabner, R. H., Neubauer, A. C., & Stern, E. (2006). Superior performance and neural efficiency: The impact of intelligence and expertise. *Brain Research Bulletin*, 69(4), 422–439. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2006.02.009>

- Leikin, R., Leikin, M., Waisman, I., & Shaul, S. (2013). Effect of the presence of external representations on accuracy and reaction time in solving mathematical double-choice problems by students of different levels of instruction. *International Journal of Science and Mathematics Education, 11*(5), 1049–1066. <https://doi.org/10.1007/s10763-012-9389-1>
- Leikin, R., Lev, M. (2013). Mathematical creativity in generally gifted and mathematically excelling adolescents: What makes the difference? *ZDM – Mathematics Education, 45*, 183–197. <https://doi.org/10.1007/s11858-012-0460-8>
- Leikin, R., Paz-Baruch, N., & Leikin, M. (2014). Cognitive characteristics of students with superior performance in mathematics. *Journal of Individual Differences, 35*(3), 119–129. <https://doi.org/10.1027/1614-0001/a000140>
- Leikin, R., Waisman, I., & Leikin, M. (2016). Does solving insight-based problems differ from solving learning-based problems? Some evidence from an ERP study. *ZDM Mathematics Education, 48*, 305–319. <https://doi.org/10.1007/s11858-016-0767-y>
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique* (2nd ed.). MIT Press.
- Mathieu, R., Booth, J. R., & Prado, J. (2015). Distributed neural representations of logical arguments in school-age children. *Human Brain Mapping, 36*(3), 996–1009. <https://doi.org/10.1002/hbm.22681>
- Neubauer, A. C., & Fink, A. (2009). Intelligence and neural efficiency. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 33*(7), 1004–1023. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.04.001>
- Kelly, A. M. C., & Garavan, H. (2005). Human functional neuroimaging of brain changes associated with practice. *Cerebral Cortex, 15*(8), 1089–1102. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi005>
- Krutetskii, V. A. (1976). *The psychology of mathematical abilities in schoolchildren* (J. Teller, Trans., J. Kilpatrick & I. Wirszup, Eds.). The University of Chicago Press.
- Leikin, M. (2002). Processing syntactic functions of words in normal and dyslexic readers. *Journal of Psycholinguistic Research, 31*(2), 145–163. <https://doi.org/10.1023/A:1014926900931>
- Leikin, M., Waisman, I., & Leikin, R. (2013). How brain research can contribute to the evaluation of mathematical giftedness. *Psychological Test and Assessment Modeling, 55*(4), 415–437.
- Leikin, R. (2014). Giftedness and high ability in mathematics. In S. Lerman (Ed.), *Encyclopedia of Mathematics Education* (pp. 247–251). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4978-8_65
- Leikin, R. (2020). Giftedness and high ability in mathematics. In S. Lerman (Eds.), *Encyclopedia of mathematics education* (pp. 315–325). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15789-0_65
- Leikin, R., & Leikin, M. (2009). *Multidimensional examination of mathematical genius as compared to mathematically gifted and non-gifted children* (Project No. 1447) [Grant]. The John Templeton Foundation.



- Psychology*, 41(2), 103–146. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05130-9](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05130-9)
- Pólya, G. (1973). *How to solve it: A new aspect of mathematical method* (2nd ed.). Princeton University Press.
- Prado, J., Chadha, A., & Booth, J. R. (2011). The brain network for deductive reasoning: A quantitative meta-analysis of 28 neuroimaging studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(11), 3483–3497. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00063
- Prescott, J., Gavrilescu, M., Cunnington, R., O’Boyle, M. W., & Egan, G. F. (2010). Enhanced brain connectivity in math-gifted adolescents: An fMRI study using mental rotation. *Cognitive Neuroscience*, 1(4), 277–288. <https://doi.org/10.1080/17588928.2010.506951>
- Qiu, J., Li, H., Huang, X., Zhang, F., Chen, A., Luo, Y., Zhang, Q., & Yuan, H. (2007). The neural basis of conditional reasoning: An event-related potential study. *Neuropsychologia*, 45(7), 1533–1539. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.11.014>
- Raven, J. (2000). *Manual for Raven’s progressive matrices and vocabulary scales: Research supplement no. 3* (2nd ed.). Oxford Psychologists Press.
- Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2002). *E-prime computer software* (Version 1.0). Psychology Software Tools.
- Steiner, H. H., & Carr, M. (2003). Cognitive development in gifted children: Toward a more precise understanding of emerging differences in intelligence. *Educational Psychology Review*, 15(3), 215–246. <https://doi.org/10.1023/A:1024636317011>
- Neville, H. J., Coffey, S. A., Holcomb, P. J., & Tallal, P. (1993). The neurobiology of sensory and language processing in language-impaired children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5(2), 235–253. <https://doi.org/10.1162/jocn.1993.5.2.235>
- Nunes, T., Bryant, P., Evans, D., Bell, D., Gardner, S., Gardner, A., & Carraher, J. (2007). The contribution of logical reasoning to the learning of mathematics in primary school. *British Journal of Developmental Psychology*, 25(1), 147–166. <https://doi.org/10.1348/026151006X153127>
- O’Boyle, M. W. (2005). Some current findings on brain characteristics of the mathematically gifted adolescent. *International Educational Journal*, 6(2), 247–251.
- Paz-Baruch, N., Leikin, M., Aharon-Peretz, J., & Leikin, R. (2014). Speed of information processing in generally gifted and excelling-in-mathematics adolescents. *High Abilities Studies*, 25(2)167–143. <https://doi.org/10.1080/13598139.2014.971102>
- Paz-Baruch, N., Leikin, R., & Leikin, M. (2016). Visual processing in generally gifted and mathematically excelling adolescents. *Journal for the Education of the Gifted*, 39(3), 237–258. <https://doi.org/10.1177/0162353216657184>
- Polich, J. (2012). Neuropsychology of P300. In S. J. Luck & E. S. Kappenman (Eds.), *Oxford Handbook of Event-related Potential Components* (pp. 159–188). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195374148.001.0001>
- Polich, J., & Kok, A. (1995). Cognitive and biological determinants of P300: An integrative review. *Biological*



- Vinner, S. (1991). The role of definitions in the learning and teaching of mathematics. In D. Tall (Ed.), *Advanced mathematical thinking* (pp. 65–81). Kluwer. https://doi.org/10.1007/0-306-47203-1_5
- Waisman, I., Brunner, C., Grabner, R. H., Leikin, M., & Leikin, R. (2023). (Lack of) neural efficiency related to general giftedness and mathematical excellence: An EEG study. *Neuropsychologia*, *179*, Article 108448. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2022.108448>
- Waisman, I., Leikin, M., Shaul, S., & Leikin, R. (2014). Brain activity associated with translation between graphical and symbolic representations of functions in generally gifted and excelling in mathematics adolescents. *International Journal of Science and Mathematics Education*, *12*(3), 669–696. <https://doi.org/10.1007/s10763-014-9513-5>
- Zhang, Q., Shi, J., Luo, Y., Liu, S., Yang, J., & Shen, M. (2007). Effect of task complexity on intelligence and neural efficiency in children: An event-related potential study. *NeuroReport*, *18*(15), 1599–1602.
- Ziegler, A., & Raul, T. (2000). Myth and Reality: A review of empirical studies on giftedness. *High Ability Studies*, *11*(2), 113–136. <https://doi.org/10.1080/13598130020001188>.
- Zohar, A. (1990). *Mathematical reasoning ability: Its structure, and some aspects of its genetic transmission* [Doctoral Dissertation]. Hebrew University of Jerusalem.