

אפיון השיח בין מורי מתמטיקה לבניה מלאכותית יוצרת בעת עיצוב משימות חקר גאומטריות המשלבות טכנולוגיות דינמיות ותרומתו לידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני (TPACK) של המורים

פרופ' רותי סגל

מרצה בחוג למתמטיקה באקדמית שאנן וראש החוג לחינוך מתמטי וראש התוכנית לתואר שני בהוראת מתמטיקה ומדעים בבית הספר היסודי במכללת אורנים. בעלת תואר ראשון במתמטיקה ומדעי המחשב (B.Sc.) מאוניברסיטת חיפה. תואר שני בהוראת מתמטיקה (M.Sc.) באוניברסיטה העברית, ותואר שלישי בפקולטה לחינוך מדע וטכנולוגיה (Ph.D.) בטכניון בחיפה. השתלמה בלימודי פוסט דוקטורט במוסד נאמן לחקר מדיניות בטכניון חיפה ובפקולטה לחינוך מדע וטכנולוגיה בטכניון. תחומי מחקר העיקריים: התפתחות מקצועית של סטודנטים להוראת מתמטיקה, מורים למתמטיקה ומורי מורים למתמטיקה, בין השאר גם בנושא התפתחות ידע טכנולוגי-פדגוגי ומתמטי (TPACK) שלהם בשילוב טכנולוגיות מגוונות, ובייחוד בשילוב סביבות בינה מלאכותית.



ד"ר ענת קלמר

ראש התוכנית לתואר שני באוריינות וחדשנות בחינוך במכללת האקדמית גליל מערבי. בעלת תואר שלישי (Ph.D.) בחינוך מתמטי מאוניברסיטת חיפה. ניהלה את המרכז הארצי למורי המתמטיקה בחינוך היסודי באוניברסיטת חיפה, ופיתחה סביבות למידה מתוקשבות להוראת המתמטיקה. תחומי המחקר העיקריים: שילוב טכנולוגיות דיגיטליות ובינה מלאכותית גנרטיבית בהוראת המתמטיקה, התפתחות מקצועית של מורים למתמטיקה בנושא ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני (TPACK) שלהם, יחסי הגומלין בין שפה למתמטיקה וטיפול חשיבה מתמטית ופתרון בעיות בסביבות דינמיות ובחדרי בריחה דיגיטליים.



אפיון השיח בין מורי מתמטיקה לבניה מלאכותית יוצרת בעת עיצוב משימות חקר גאומטריות המשלבות טכנולוגיות דינמיות ותרומתו לידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני (TPACK) של המורים רותי סגל וענת קלמר

תקציר

מחקר זה בחן את מאפייני השיח בין מורים לבניה מלאכותית יוצרת (GenAI) בעת תכנון שיעורי גאומטריה המשלבים סביבות טכנולוגיות דינמיות, ואת תרומתו להתפתחות הידע הטכנולוגי-פדגוגי-תוכני (TPACK) של המורים. בחקר מקרה בשיטה מעורבת (mixed-methods case study) עם דומיננטיות איכותנית השתתפו שלוש מורות למתמטיקה בבית ספר יסודי, שהשתמשו בקלוד (Claude) לתכנון שיעורים המשלבים את הכלים ג'אוג'ברה (GeoGebra) ואוריגמטריה (Origametry). הנתונים נאספו באמצעות תמלילי השיח עם קלוד, הקלטות שיח מונע סקרנות (CDD – Curiosity Driven Discourse), יומני מחקר שיתופיים ושאלוני ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני. הנתונים נותחו באמצעות שילוב של ניתוח כמותי של שאלוני ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני (שניתנו לפני הקורס ואחריו) ובאמצעות ניתוח איכותני-פרשני של תמלילי השיח ויומני המחקר באמצעות שיטת ההשוואה המתמדת. הממצאים חשפו שני מאפיינים עיקריים של השיח: דו-שיח איטרטיבי לשיפור ודיוק ההנחיות (פרומפטים) לבניה מלאכותית יוצרת, ודו-שיח המעודד חשיבה ביקורתית. נמצא כי השיח תרם להתפתחות הידע הטכנולוגי-פדגוגי-תוכני של המורות על כל רכיביו, בהם העמקת הבנה בנושאים גאומטריים, פיתוח אסטרטגיות הוראה מגוונות ושיפור מיומנויות בשימוש בכלים טכנולוגיים. נוסף על כך מממצאי המחקר עולה כי שילוב השיח מונע סקרנות משמש גורם מאיץ תהליכי למידה ושיש צורך בשיקול דעת מקצועי בתוצרי בינה מלאכותית יוצרת.

מילות מפתח: ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני (TPACK); גאומטריה דינמית; בינה מלאכותית יוצרת (GenAI); חינוך מתמטי; התפתחות מקצועית של מורים; שיח מונע סקרנות (CDD).

מבוא

שילוב טכנולוגיה בהוראת מתמטיקה בכלל וגאומטריה בפרט מציב אתגרים מהותיים לפני מורי המתמטיקה (Klemer et al., 2023; Stein et al., 2020). סביבות גאומטריה דינמיות, כגון אוריגמטריה (Origametry) וג'אוג'ברה (GeoGebra), מציעות כלים רבי עוצמה לקידום הבנה מתמטית, ואולם מורים רבים מתקשים לשלבן ביעילות בפרקטיקת ההוראה שלהם. הקושי מתעצם כאשר נדרש ממורים לשלב בו בזמן שתי סביבות טכנולוגיות שונות זו מזו בעת עיצוב משימות חקר, הדורש מהם ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני (TPACK) מבוסס. בשנים האחרונות, עם התפתחות בינה מלאכותית יוצרת (GenAI), נפתחו דרכים חדשות לתמיכה בהתפתחות מקצועית של מורים (Baidoo-Anu & Ansah, 2023). במחקרים נמצא כי בינה מלאכותית יוצרת יכולה לסייע בתכנון הוראה, בחיבור בעיות מתמטיות והתאמתן לצרכים פדגוגיים (Segal & Biton, 2024). עם זה השימוש בבינה מלאכותית יוצרת בחינוך טומן בחובו גם אתגרים: מגבלות בינה מלאכותית יוצרת בהבנה עמוקה של תהליכים מתמטיים, אי-דיוקים בתכנים המוצעים, המגבירים את הצורך בחשיבה ביקורתית מצד המשתמשים (Segal & Biton, 2025; Wardat et al., 2023).

לצד העניין הגובר בכוח של בינה מלאכותית יוצרת לתמוך במורים, מעט ידוע על מאפייני השיח היעיל בין מורים לבניה מלאכותית יוצרת בנושא תכנון משימות חקר בגאומטריה, ועל האופן ששיח זה יכול לתרום להתפתחות הידע הטכנולוגי-פדגוגי-תוכני של המורים. פער זה בולט בייחוד כאשר מדובר בשילוב של כמה סביבות טכנולוגיות דינמיות בו בזמן. המחקר הזה משמש חלק ממחקר רחב והוא מתמקד בעיצוב משימות חקר המשלבות שתי סביבות טכנולוגיות דינמיות: אוריגמטריה, סביבה ממוחשבת ללמידת גאומטריה באמצעות קיפולי נייר וג'אוג'ברה, תוכנת מתמטיקה דינמית. המורים ראו בקלוד, מערכת בינה מלאכותית יוצרת, שותף הוראה אישי בתהליך תכנון משימות החקר והשתתפו בשיח מונע סקרנות (CDD – Curiosity Driven Discourse) עם עמיתיהם (Lehavi et al., 2019; Segal et al., 2023). שיח מונע סקרנות משמש מקום לשיח מקצועי ולא שיפוטי בין עמיתים הנשען על עקרונות חקר שיתופי של תהליכים בקבלת ההחלטות שלהם, ומשיג תובנות מהאינטראקציה עם בינה מלאכותית יוצרת (ראו פירוט בסעיף 2 בסקירת ספרות).

מטרת המחקר היא לבחון את מאפייני השיח בין מורים לבינה מלאכותית יוצרת בעת עיצוב משימות חקר בגאומטריה המשלבות שתי סביבות טכנולוגיות דינמיות, ולהבין כיצד שיח זה תורם להתפתחות הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני של המורים.

סקירת ספרות

1. ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני (TPACK)

הרקע של ידע טכנולוגי, פדגוגי ותוכני מספק בסיס תאורטי לתיאור והבנה של הידע הנדרש ממורים בכלל וממורים למתמטיקה בפרט לצורך שילוב יעיל של טכנולוגיה בהוראה (Koehler & Mishra, 2009; Klemmer & Rapoport, 2020;). רקע זה מורכב משבעה רכיבי ידע המשתלבים זה בזה. שלושת הרכיבים הבסיסיים הם אלה: 1. ידע תוכני (CK) – ידע המורה בתחום הדעת, במאמר זה מתמטיקה וגאומטריה; 2. ידע פדגוגי (PK) – ידע כיצד ללמד, לרבות שיטות הוראה, ניהול כיתה והערכה; 3. ידע טכנולוגי (TK) – ידע כיצד להשתמש בכלים טכנולוגיים, ולהתאים את ההוראה לטכנולוגיות משתנות. רכיבים אלה יוצרים ארבעה רכיבי ידע משולבים: 4. ידע פדגוגי-תוכני (PCK) – ידע כיצד ללמד תוכן מסוים בדרך פדגוגית יעילה; 5. ידע טכנולוגי-תוכני (TCK) – הבנת הדרכים שבהן טכנולוגיה ותוכן מנהלים יחס גומלין; 6. ידע טכנולוגי-פדגוגי (TPK) – ידע כיצד טכנולוגיות למיניהן יכולות לשנות את תהליך ההוראה ולפתוח הזדמנויות פדגוגיות חדשות; 7. ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני (TPACK) – הידע השלם המשלב את שלושת הרכיבים הבסיסיים ביחד, ומהווה את הבסיס לשימוש יעיל בטכנולוגיה ללימוד תוכן מסוים בדרכים פדגוגיות מתאימות (Koehler & Mishra, 2009; Schmidt et al., 2009). פיתוח ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני מלא, ובייחוד היכולת לשלב בין שלושת הרכיבים בו בזמן, נחשב למאתגר יותר מפיתוח כל רכיב בנפרד, ומשמש יעד עיקרי בתוכניות פיתוח מקצועי של מורים (Mishra et al., 2023).

פיתוח ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני איתן של מורים דורש יותר מחשיפה מזדמנת לכלים טכנולוגיים. מק'קולוך ועמיתיו (McCulloch et al., 2021) מצאו שתוכניות רבות להכשרת מורים אומנם מספקות הזדמנויות לעבוד עם טכנולוגיות מתמטיות, ואולם חוויות אלה לעיתים קרובות מבודדות ואינן משולבות בשיטתיות. כלומר הכשרה המורכבת מיחידות נפרדות ובלתי מקושרות של טכנולוגיה, שבהן הטכנולוגיה אינה משמשת חלק בלתי נפרד מתהליך ההוראה אלא תוספת אגבית, אינה מאפשרת למורים לפתח ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני מוצק ועשויה להסביר מדוע מורים רבים מתקשים לשלב טכנולוגיה בהוראתם.

לפיכך פיתוח ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני מחייב פיתוח מקצועי מתמשך המסייע למורים לעבור משימוש בטכנולוגיה המשמשת עזר חישובי בלבד למינוף הטכנולוגיה להעמקת החשיבה וההבנה המתמטית (Cai et al., 2020). בפיתוח הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני של מורים למתמטיקה צריך להביא בחשבון כי גם עזרי ההוראה העומדים לרשות המורים, כמו ספרי לימוד במתמטיקה, מציעים היצע דל של משימות המשלבות טכנולוגיה, ומהם הטכנולוגיה משולבת לתמיכה חינוכית בסיסית, ובמעט מהם יש סוגים חדשים של פעילויות מתמטיות לפיתוח החשיבה וההבנה המתמטית (Sherman et al., 2020). פער זה בולט בייחוד בהוראת גאומטריה, שבה תוכנות גאומטריה דינמיות אינן מנוצלות במלואן למרות יכולתן לאפשר הבנה מושגית עמוקה באמצעות חקירה אינטראקטיבית (Weingarden & Heyd-Metzuyanim, 2023). אחת הדרכים לניצול יעיל של תוכנות גאומטריה דינמית בעת שימוש במשימות המוצגות בספרי לימוד שאינם משלבים טכנולוגיה, מוצגת במחקר של סגל (Segal, 2026). המורים שהשתתפו במחקר התבקשו באמצעות שימוש בתוכנת ג'אוג'ברה לשנות את הארכיטקטורה של משימה מספר הלימוד במעבר מייצוג סטטי של האובייקטים הגאומטריים, כפי שהם מוצגים במשימה בספר הלימוד, לייצוג דינמי שלהם באמצעות שילוב יישומנים המזמנים חקר אינטראקטיבי. ממצאי המחקר מלמדים על התרומה של תהליך זה לפיתוח ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני של המורים.

2. סביבות טכנולוגיות דינמיות בהוראת גאומטריה וג'אוג'ברה

סביבות טכנולוגיות דינמיות, פיזיות ודיגיטליות כאחד, הפכו לכלים חיוניים בהוראת גאומטריה. סביבות אלה מקדמות למידה פעילה ומטפחות הבנה מושגית עמוקה של עקרונות גאומטריים בעת שהן מאפשרות לתלמידים להתבונן כיצד שינויים בהיבט אחד של צורה גאומטרית משפיעים על מאפייניה האחרים (Chan & Leung, 2014; Fahlgrén & Brunström, 2014; Leung, 2008).

אוריגמטרייה היא סביבה ממוחשבת ללמידת גאומטרייה המסתמכת על עקרונות האוריגמי – אומנות קיפול הנייר היפנית (Golan, 2011; Golan & Jackson, 2009; Oberman, 2018). האוריגמי נחשב בספרות בעל פוטנציאל מהותי לפיתוח תפיסה מרחבית וכישורי הדמיה בחינוך הגאומטרייה (קלמר ואחרים, 2015; Boakes, 2011; Klemmer & Rapoport, 2020). פעילויות אוריגמי מספקות גישה מוחשית לחקירת יחסים ומאפיינים גאומטריים, ומאפשרות מעבר מהתנסות חזותית ומוחשית להבנה פורמלית של מושגים גאומטריים (Arıcı & Aslan-Tutak, 2015; Dağdelen & Kösterelioglu, 2020). אוריגמטרייה מרחיבה פוטנציאל זה באמצעות שילוב קיפול הנייר עם סביבה דיגיטלית אינטראקטיבית, ומתוך כך מחברת בין פעילות מוחשית לחקירה ממוחשבת (Golan, 2011; Oberman, 2018). מחקרים מלמדים על תרומתה של למידה מבוססת אוריגמי בשילוב טכנולוגיה לפיתוח הבנה גאומטרית, לדיוק בהגדרות ולחיזוק החשיבה הפורמלית (Budinski et al., 2020). למשל, קנדיל ואישקסל-בוסטן (Kandil & Işıksal-Bostan, 2019) מצאו שהוראת גאומטרייה מבוססת אוריגמי בכיתה ז' שיפרה במידה ניכרת הן את הישגי התלמידים הן את תחושת המסוגלות העצמית שלהם. בדומה ארכי ואסלאן-טוטאק (Arıcı & Aslan-Tutak, 2015) הראו שתלמידי כיתה י' שלמדו גאומטרייה באמצעות שיטות מבוססות אוריגמי שיפרו במידה ניכרת את יכולות ההדמיה המרחבית, את ההישגים הגאומטריים ואת מיומנויות ההנמקה שלהם. ממצאים אלה ממחישים כיצד הפעילות המוחשית של קיפול הנייר מאפשרת מעבר מהתנסות חושית להמסדה מתמטית, תהליך שאי אפשר לעשות אותו בסביבה דיגיטלית בלבד.

ג'אוג'ברה היא תוכנת מתמטיקה דינמית המאפשרת בנייה ומניפולציה של אובייקטים גאומטריים על בסיס התכונות המגדירות אותם. התוכנה מגבירה את ביטחון הלומדים ומאפשרת להם להגיע לידי הכללות באמצעות חקירה אינטראקטיבית (Arbain & Shukor, 2015; Boo & Leong, 2016; Leung, 2008; Segal et al., 2018). יכולתה לתמוך במשימות למידה מבוססות חקר הופכת את הכיתה למעבדה מתמטית שבה תלמידים יכולים לייצר ולבחון השערות על יחסים גאומטריים (Boo & Leong, 2016; Kohen et al., 2025; Kuzle, 2017). עם זה שילוב משימות חקר עם ג'אוג'ברה הוא מאתגר בעבור מורים רבים, מה שמדגיש את הצורך בטיפול של התפתחות מקצועית מתמשכת (Avargil et al., 2012; Häikiöniemi, 2017; Klemmer et al., 2023; Raveh et al., 2025; Wassie & Zergaw, 2019).

שילוב של אוריגמטרייה עם ג'אוג'ברה יוצר סביבת למידה רבת-עוצמה, המאיצה ומעמיקה את ההבנה של מושגים גאומטריים. מחקרים מלמדים על תרומתה של גישה משולבת זו לפיתוח החשיבה הגאומטרית בקרב לומדים בגילים וברקעים מגוונים, ואף על פוטנציאל לצמצום פערים בידע גאומטרי של תלמידים מרקעים סוציו-אקונומיים למיניהם (Budinski et al., 2020; Klemmer & Rapoport, 2020). שתי הסביבות משלימות זו את זו: אוריגמטרייה מספקת את ה"גרייה המוחשית" – היווצרות ידע באמצעות קיפול, מגע וראייה ישירה של הצורה הנבנית, בעוד ג'אוג'ברה מספקת את ה"גרייה הטכנולוגית-דינמית" – היכולת לגרור, לשנות ולצפות מייד בתוצאה. לפיכך תלמיד שקיבל ריבוע בנייר וצפה בציר הסימטרייה שלו (אוריגמטרייה) יוכל לאחר מכן לחקור בג'אוג'ברה כמה צירי סימטרייה יש לריבוע ומדוע, ולגלות הכללות שהפעילות הפיזית לבדה אינה מאפשרת. למשל, בודינסקי ואחרים (Budinski et al., 2020) הראו שתלמידי כיתה ה' שלמדו בשילוב שתי הסביבות הצליחו לזהות מושגים גאומטריים, להבין הגדרות ותכונות ולקשר ידע חדש לידע קודם ברמה גבוהה מזו שהשיגו תלמידים שלמדו בכל אחת מהסביבות בנפרד.

המחקר הזה עוסק באתגר של שילוב בו בזמן של שתי סביבות אלו בעת חיבור ועיצוב משימות חקר.

3. חיבור בעיות (problem-posing) מתמטיות ומשימות מבוססות חקר בסביבה טכנולוגית

חיבור בעיות (problem-posing) משמש פרקטיקה עיקרית בתכנון ובהוראה של מתמטיקה (Cai et al., 2015). בחיבור בעיות יש יצירה של בעיות חדשות או ניסוח מחדש של בעיות קיימות (Silver, 1994). ממחקרים עולה כי עיסוק בחיבור בעיות עשוי להשפיע בחיבור על הפרקטיקות הפדגוגיות והמתמטיות של מורי מתמטיקה. למשל, באומאנס ורוט (Baumanns & Rott, 2021) מצאו שמורים שעסקו בחיבור בעיות פיתחו הבנה מעמיקה יותר של הקשרים מתמטיים וגמישות פדגוגית גדולה יותר בהתאמת משימות לצורכי תלמידיהם. בדומה, קאור ורוסלי (Kaur & Rosli, 2021) מדגישים כי תהליך חיבור הבעיות מחייב את המורים לנתח לעומק את מבנה הידע המתמטי, ומתוך כך מחזק גם את יכולתם לתמוך בפיתוח מיומנויות פתרון בעיות בקרב תלמידים.

חיבור בעיות ופתרון בסביבה טכנולוגית דינמית מאפשרים לחקור, להתנסות ולהתבונן במצבים מתמטיים משתנים, ומספקים ללומדים הזדמנויות לעבודה עם הדמיות דינמיות של אובייקטים גאומטריים (Abramovich & Cho, 2015; Cai et al., 2015). כך, למשל, גרירת נקודות של צורות גאומטריות על המסך והתבוננות בהשפעות של השינויים עשויות לסייע בהכללת יחסים גאומטריים ובחיבור בעיה חדשה (Segal et al., 2018, 2021). חיבור בעיות בסביבה דינמית נשען לעיתים קרובות על ניתוח המבנה והמושגים המרכזיים של בעיה קיימת, לצורך פירוקה



ובנייתה מחדש באופן מושכל (Kaur & Rosli, 2021). תהליך זה מאפשר להבין לעומק טיעונים והוכחות גאומטריות, בין השאר באמצעות בחינת האינטראקציה בין פעילות סטטית (כגון עבודה בעיפרון ונייר) ובין פעילות דינמית דיגיטלית (Komatsu & Jones, 2020).

לצד יתרונות אלו, חיבור בעיות נחשב למשימה מאתגרת בעבור מורים. למשל, ורדאט ואחרים (Wardat et al., 2023) מבחינים באתגר של מורים לחבר בעיות מתמטיות המתאימות לצורכי תלמידיהם. קאי והוואנג (Cai & Hwang, 2021) חושפים את הקשיים הכרוכים בתהליך חיבור בעיות, בייחוד בשילוב טכנולוגיה. מתוך כך לי (Lee, 2021) מדגיש את הצורך במחקרים שיבחנו את תהליכי חיבור הבעיות ופתרוןן בסביבות טכנולוגיות, ובייחוד את הקשרים בין שלבי התפתחות הידע המקצועי של מורים לפרקטיקות אלו. המחקר הזה מתמקד בצורך זה מתוך מתן פתרון לאתגרים של מורים בתהליך חיבור בעיות באמצעות שילוב בינה מלאכותית יוצרת.

4. היתרונות והאתגרים של שימוש בבינה מלאכותית יוצרת (GenAI) בחינוך בכלל ובחינוך מתמטי בפרט

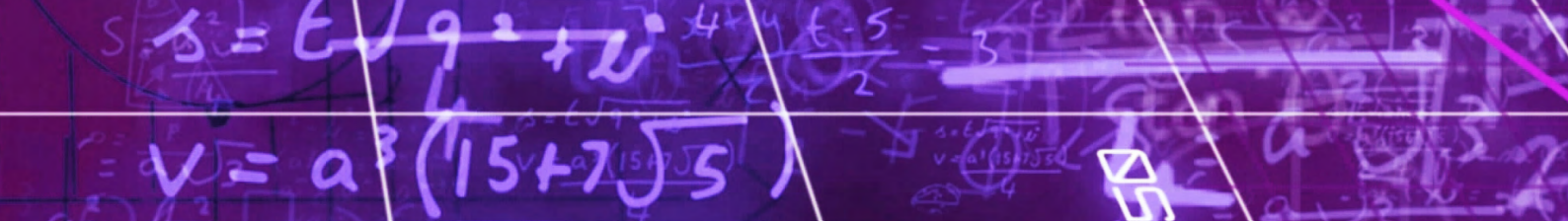
הופעתן והתרחבות הנגישות של סביבות בינה מלאכותית יוצרת בשנים האחרונות מציגות יכולות חדשות לתמיכה בהתפתחות המקצועית של מורים בכלל ושל מורים למתמטיקה בפרט (Baidoo-Anu & Ansah, 2023; Opesemowo & Ndlovu, 2024). בבינה מלאכותית יוצרת יש קבוצה של אלגוריתמים מבוססי למידת מכונה, שנועדו לייצר תוכן חדש באמצעות כתיבת הנחיות (פרומפטים) ואינטראקציות המדמות שיח אנושי. סביבות אלו מציעות הזדמנויות ייחודיות לשיפור תכנון הוראה ופרקטיקות פדגוגיות של מורים (Baidoo-Anu & Ansah, 2023; Chan & Hu, 2023; Marienko et al., 2020).

אף שהשימוש בבינה מלאכותית יוצרת במערכות חינוך עדיין בחיתוליו, בספרות נמצא פוטנציאל למגוון תרומות אפשריות של שילובה. בתרומות אלו נמצאים פיתוח מיומנויות דיגיטליות, תמיכה בתהליכי למידה, סיוע בכתיבה ובסיעור מוחות בעת עיצוב משאבי הוראה ולמידה, וכן יכולת לקבל תמיכה מותאמת אישית (Biton & Segal, 2025; Biton et al., 2025; Chan, 2023; Chan & Hu, 2023; Gurl et al., 2025; Segal & Biton, 2024). נוסף על כך האינטראקציה עם בינה מלאכותית יוצרת מאלצת מורים לנסח במדויק את מטרות ההוראה שלהם ולפתח שאלות חקר יצירתיות, תהליכים שבפני עצמם מעמיקים את הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני שלהם (Mishra et al., 2023).

בחינוך מתמטי בעיקר בינה מלאכותית יוצרת משמשת כלי ייחודי לתמיכה בתכנון הוראה של מורי מתמטיקה. הוראת מתמטיקה כרוכה בצמתים פדגוגיים מאתגרים, כגון עיצוב משימות חקר, בחירת ייצוגים חזותיים ותכנון רצף שאלות המוביל לגילוי עצמאי. בינה מלאכותית יוצרת יכולה לשמש "שותף חשיבה" למורים בתהליכים אלה: להציע ניסוחים חלופיים לבעיות, לשקף קשיים מושגיים צפויים ולהמליץ על גישות הוראה מגוונות לאותו מושג מתמטי ומתוך כך לאפשר למורה להרחיב את ארגז הכלים הפדגוגי שלו (Segal & Biton, 2024; Nedaei et al., 2022). נוסף על כך בינה מלאכותית יוצרת יכולה גם לספק הסברים והדמיות של מושגים גאומטריים, לאפשר חוויות למידה מותאמות אישית ולהשתתף בדו־שיח אינטראקטיבי של פתרון בעיות, תרומות שיש להן פוטנציאל חשוב לקידום הידע המתמטי של תלמידים ומורים גם יחד (Getenet, 2017; Kasneci et al., 2023; Rane, 2023; Wardat et al., 2023).

שימוש בבינה מלאכותית יוצרת עשוי לתרום גם לידע הפדגוגי של מורי מתמטיקה, למשל, בקידום למידה שיתופית (Rane, 2023), ובייחוד בצמתים פדגוגיים מאתגרים כגון חיבור בעיות מתמטיות לצרכים חינוכיים (Nedaei et al., 2022). לפיכך בינה מלאכותית יוצרת יכולה להציע בעיות המקשרות בין מתמטיקה לחיי היום־יום, להמליץ על התאמות בניסוח בעיות לרמות מגוונות של תלמידים, או להציע משימות המסייעות בהתמודדות עם קשיים מושגיים מסוימים (Biton & Segal, 2025; Segal & Biton, 2024). ככל שהמורים משתמשים יותר בבינה מלאכותית, כן האינטראקציה בין המורים לבינה המלאכותית מתפתחת יותר. על פי קים (Kim, 2024), עם העלייה בהיכרות של המורים עם סביבות אלו ושימוש בהן, הם נעים משימוש פסיבי לשותפות פעילה, ורואים בבינה מלאכותית יוצרת שותפה פדגוגית פוטנציאלית. קשר שיתופי זה עשוי לתרום ליכולת של המורים לתכנן ולתזמר פעילויות כיתה בזמן אמת (Holstein et al., 2019; Rane, 2023).

עם זה במחקרים נמצאו גם מגבלות ואתגרים בשימוש בבינה מלאכותית יוצרת בעניינים חינוכיים. בין השאר נטען כי מערכות אלו מתקשות לגלות רגישות לעניינים פדגוגיים ולמאפיינים ייחודיים של לומדים, כגון ידע קודם, דעות שגויות או צרכים רגשיים. ההבנה שלהם בעניין התנהלות תהליך הלמידה (מטרות ההוראה, מאפייני המשימה והדינמיקה הכיתתית) נשארת חלקית, והתגובות שהם מספקים נשענים בעיקר על דפוסים סטטיסטיים מתוך נתוני האימון שלהם.



נוסף על כך יכולתם לייצר הצעות "יצירתיות" אינה נשענת על הבנה מושגית מעמיקה, ועל כן עלולה שלא להתאים תמיד לצרכים חינוכיים מורכבים. כאן הועלתה גם ביקורת על נטייתן של מערכות בינה מלאכותית יוצרת להתעלם מהיבטים אתיים ומתוצאות חינוכיות רחבות יותר של השימוש בהן (Baidoo-Anu & Ansah, 2023; Chan & Hu, 2023). נוסף על אתגרים אלו עולה ממחקרים כי הסתמכות יתר על עזרים קוגניטיביים חיצוניים, כגון בינה מלאכותית יוצרת, עלולה לגרום לניווט של תהליכי חשיבה, בייחוד התנוונות של חשיבה ביקורתית, ומתוך כך ל"עצלות מטא-קוגניטיבית" (Lee et al., 2025; Oakley et al., 2026; Prunkl, 2024).

מחקרים על שילוב בינה מלאכותית יוצרת בחינוך מתמטי מלמדים על אתגרים אחרים. מורים ותלמידים נדרשים להיות מודעים לעובדה שבינה מלאכותית יוצרת אינה תמיד מדויקת או אמינה, וכי למערכות כגון ChatGPT אין הבנה עמוקה של תהליכים מתמטיים, בהם גאומטרייה. לפיכך הם עשויים להציע פתרונות שגויים או חלקיים, כפי שתועד למשל בפעמים שבהן הוצע שימוש במשפט פיתגורס לפתרון בעיה שאינה עוסקת במשולש ישר זווית (Segal & Biton, 2024), או כאשר לא ניתן פתרון הולם לגישות שגויות של לומדים (Biton & Segal, 2025; Rane, 2023; Wardat et al., 2023). ממצאים אלו מדגישים את הצורך בשילוב בינה מלאכותית יוצרת בדרך המאפשרת לפתח חשיבה ביקורתית, לבחון, להעריך ולאמת מידע מתמטי המופק באמצעות בינה מלאכותית יוצרת. במחקר הזה המורים הונחו להשתמש בבינה מלאכותית יוצרת לצד שיח מונע סקרנות.

5. שיח מונע סקרנות (Curiosity Driven Discourse – CDD)

על פי עקרונות שפירטו להבי ואחרים (Lehavi et al., 2019) וסגל ואחרים (Segal et al., 2023), שיח מונע סקרנות (CDD) מעודד מורים להתבונן, להעלות השערות ולדון בבחירות ההוראה שלהם ושל אחרים. הרקע לשיח מונע סקרנות במחקר זה נשען על שישה עקרונות מפתח: 1. עדויות: מורים משתפים קטעים ממערכי השיעורים שלהם שלדעתם ראויים לדיון כמו למשל המשימה המתמטית המשולבת במערך השיעור; 2. אוטונומיה: המורים עצמם בוחרים איזה קטע ממערך השיעור הם מעוניינים לשתף את עמיתיהם לקראת השיח מונע סקרנות ונותנים לו כותרת; 3. תפקידים ברורים: בכל שיח מונע סקרנות מסוים, המורה המציג את הקטע ממערך השיעור שלו נחשב לחניך ושותפיו/עמיתיו הם החונכים (תפקידים אלו יכולים להתחלף רק בשיח מונע סקרנות חדש); 4. מקצועיות משותפת: המורים משתפים את המומחיות המקצועית שלהם בנושא של תוכן השיעור; 5. התפתחות מקצועית הדדית: תהליך ההתפתחות שואף להיות הדדי; 6. התמקדות בגישה חקרנית: ההכנה לשיח על הקטע ממערך השיעור והשיחה עצמו צריכים להתנהל מתוך גישה סקרנית (כלומר בלי שיפוטיות) בעת חיפוש רעיונות לדיון. כלומר המיקוד לא צריך להיות בשיפוט המורה ששיתף את תוכנית השיעור שלו ובתיוגה "נכונה" או "שגויה", אלא בבחינת הבחירות וההצדקות להחלטותיו וכיצד הן עשויות לשקף את ה"אני מאמין" של המורה.

במחקר זה שיח מונע סקרנות שימש מנגנון תומך לעיבוד רפלקטיבי ושיתופי של תהליכי תכנון ההוראה, ובייחוד תכנון המשימה המשלבת את שתי הסביבות הטכנולוגיות אוריגמטרייה וג'אוג'ברה, והאינטראקציות עם בינה מלאכותית יוצרת, ולא מוקד המחקר עצמו. שילובו אפשר למורים לבחון בביקורתיות את הבחירות הפדגוגיות שלהם ואת תרומת השיח עם בינה מלאכותית יוצרת להתפתחותם המקצועית.

שאלות מחקר

- מהם המאפיינים של שיח יעיל בין מורה לבינה מלאכותית יוצרת בעת חיבור משימות חקר להוראת גאומטרייה, המסתייע בו בזמן בשתי סביבות גאומטרייה דינמיות (אוריגמטרייה וג'אוג'ברה)?
- כיצד שיח זה בין מורה לבינה מלאכותית יוצרת תורם לידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני של המורים?

מתודולוגיה

הקורס

מחקר זה נמשך 13 שבועות בעת קורס שנתי שכותרתו "פיתוח ידע מתמטי-פדגוגי-טכנולוגי", והיה חלק מן תוכנית לתואר שני (M.Ed.) בחינוך מתמטי במכללה אקדמית לחינוך בישראל, בהשתתפות 14 סטודנטים.

1. כלים טכנולוגיים

בקורס השתמשו בשלוש סביבות טכנולוגיים עיקריות: 1. קלוד (Claude), מערכת בינה מלאכותית יוצרת (GenAI) המסייעת למורים בחיבור משימות למידה מבוססות חקר; 2. ג'אוג'ברה, תוכנת מתמטיקה דינמית ליצירת יישומים לפעילויות גאומטריות אינטראקטיביות והדמיות לצורך המחשת מושגים גאומטריים ומתן הזדמנויות חקר לתלמידים; 3. אוריגמטריה, סביבה טכנולוגית ממוחשבת המסתמכת על עקרונות האוריגמי, ומיועדת לשיפור תפיסה מרחבית וכישורי הדמיה בגאומטריה.

באמצעות שלושת הכלים הטכנולוגיים האלה היה אפשר לגשת לטכנולוגיות מגוונות להוראת גאומטריה, בשילוב מתודולוגיות דיגיטליות ומעשיות. המורים עסקו בדורשיה בינם לבין עצמם ועם קלוד כדי לתכנן, לעצב ולשפר את משימות הלמידה מבוססות החקר שלהם וליצור רעיונות לשילוב יעיל של שתי הסביבות ג'אוג'ברה ואוריגמטריה באסטרטגיות ההוראה שלהם.

2. מהלך הקורס

אלה היו רכיבי הקורס:

1. הסכמת משתתפים: בתחילת הקורס עודכנו כל 14 הסטודנטים שקורס זה הוא חלק ממחקר, שהשתתפות בו היא בהסכמה ולא תשפיע על הערכת הקורס שלהם ושדרישות הקורס נשארו זהות לכל הסטודנטים, בלי קשר להסכמה או לאי-הסכמה להשתתף במחקר. כל הסטודנטים הסכימו להשתתף ונתנו הסכמה מדעת.
2. שאלון ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני שהוגש לסטודנטים טרם השתתפותם בקורס: כל 14 הסטודנטים מילאו שאלון להערכת רמות שילוב הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני לפני הקורס.
3. שילוב סביבות גאומטריה דינמיות: הסטודנטים נחשפו לשתי הסביבות אוריגמטריה וג'אוג'ברה ועבדו בשיתוף פעולה כדי להכיר את הכלים האלה.
4. תכנון וחיבור של משימות חקר בשיתוף פעולה: לאחר ההיכרות הראשונית עם הכלים הטכנולוגיים חולקו הסטודנטים לקבוצות של שלושה-ארבעה סטודנטים וכל קבוצה החליטה על נושא עיקרי בגאומטריה. כל חבר בקבוצה היה צריך לפתח משימת חקר בגאומטריה הרואה הן באוריגמטריה הן בג'אוג'ברה רכיבים עיקריים ומשלבת ביניהם. לפיכך כל קבוצה יצרה יחד יחידת לימוד שלמה לנושא שבחירה והתהליך כלל עבודה עצמאית ושיתופית כאחד. בעת התהליך הם הונחו להשתמש בבינה מלאכותית יוצרת ובקלוד ובמידת הצורך: לנסח הנחיות הנשענות על אתגרים פדגוגיים וגאומטריים, לעדכן בהתאם את משימותיהם על בסיס תגובות שקיבלו מקלוד. נעשה תיעוד של האינטראקציה שלהם עם קלוד.
5. שיח מונע סקרנות (CDD): כדי לטפח שיתוף פעולה ורפלקציה אחרים, כל 14 המורים נחשפו לעקרונות השיח מונע סקרנות והונחו לעשות מפגשי שיח מונע סקרנות בעת עבודתם השיתופית, באמצעות שיתוף מערכי השיעור שלהם ומשימות החקר בשילוב ג'אוג'ברה ואוריגמטריה, הן במפגשי הקורס הן בפגישות זום מלבד שעות הלמידה בקורס. שיח מונע סקרנות בין עמיתים אפשר לנהל דיונים מובנים בין המורים המשתתפים. במפגשים אלה הם דנו בבחירות שלהם לחבר ולעצב משימות חקר ודרכי הוראה מתוכננות ובהליכי קבלת ההחלטות שלהם על בסיס שילוב שתי הסביבות הטכנולוגיות והמלצות הבינה המלאכותית היוצרת. לדוגמה, הם התבקשו לנמק את ההחלטות הפדגוגיות שלהם לקבלה או שינוי של הצעות בינה מלאכותית יוצרת ולתאר כל דו-שיח חשוב שניהלו בעת אירועים קריטיים שהתעוררו בעיצוב המשימות המתמטיות שלהם (המפגשים הוקלטו ותומללו).
6. יומני מחקר שיתופיים: כל קבוצה של שלושה-ארבעה מורים התבקשה לכתוב את הרפלקציות שלה על חוויותיה, אינטראקציות עם בינה מלאכותית יוצרת, תהליכי תכנון והבניה של משימות חקר וכו' ביומן מחקר שיתופי באמצעות Google Forms. ביומן זה הופיעו גם אתגרים שעמדו לפנייהם, פתרונות שפיתחו אותם, רפלקציות על מפגשי השיח מונע סקרנות ותובנות אישיות שעלו מהקורס, מה שאפשר דו-שיח מתמשך בין חברי הקבוצה.
7. שאלון ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני בסיום המחקר: המורים מילאו שוב את השאלון כדי לאפשר הערכה של שינויים בידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני שלהם.
8. בחירת קבוצה: בשלב זה הכירו החוקרים את הקבוצות והחליטו איזו מהן תשמש לחקר מקרה.

המחקר

1. גישת המחקר

המחקר הזה נעשה לפי סוגת חקר מקרה (case study) בגישה מעורבת בעלת דומיננטיות איכותנית (Creswell & Poth, 2018; Stake, 1995). חקר מקרה מאפשר לבחון בחינה מעמיקה וכילולית (אינטגרטיבית) של תופעה מורכבת בסביבתה הטבעית, מתוך שמירה על עושר הפרטים ומגוון מקורות הנתונים (Stake, 1995; Yin, 2011). גישה זו מתאימה בייחוד לכאן, שכן השיח בין מורים לבינה מלאכותית יוצרת בעניין תכנון ועיצוב משימות חקר בגאומטריה הוא תופעה חדשה ומורכבת, שאי אפשר לבחון אותה היטב בכלים כמותיים בלבד. הממד הכמותי (שאלוני ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני שניתנו לפני הקורס ואחריו) שימש לאימות ולמיקוד של הממצאים, בעוד הממד האיכותני הדומיננטי, הנשען על ניתוח תמלילים, יומנים ומשימות, הוא הציר העיקרי של המחקר. גישה מעורבת זו מאפשרת תילות (טריאנגולציה) מתודולוגית: כל מקור נתונים משלים את האחרים ומחזק את התמונה הכוללת (Creswell & Poth, 2018).

עיצוב המחקר נבנה במיוחד כדי לענות על שתי שאלות המחקר שלנו באמצעות תילות מתודולוגית. כדי לענות על שאלת המחקר הראשונה (מאפייני שיח יעיל בין מורה לבינה המלאכותית היוצרת), אספנו נתונים מכמה מקורות. תמלילי השיח מונע סקרנות תיעודו כיצד מורים העריכו ועדכנו בשיתוף פעולה את הצעותיה של בינה מלאכותית יוצרת. משימות החקר הסופיות חשפו כיצד השיח עם קלוד סייע בעיצוב המשימה ודרכי הוראתה. יומני המחקר השיתופיים סייעו בתיעוד אינטראקציות בזמן אמת עם קלוד כדי לספק תובנות על אופי השיח עם בינה מלאכותית יוצרת.

כדי לענות על שאלת המחקר השנייה (כיצד שיח בין מורה לבינה מלאכותית יוצרת תורם להתפתחות הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני של המורים) השתמשנו הן במדדים כמותיים (שאלוני ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני שניתנו לפני הקורס ואחריו לצורך זיהוי שינויים כוללים) הן במדדים איכותניים (יומנים, תמלילי שיח מונע סקרנות וניתוחי משימות) כדי להעריך את התרומה לכל אחד מרכיבי הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני.

2. משתתפים

המחקר הזה התמקד בקבוצה שהורכבה מנעמי, ענאם וגילה (שמות בדויים). החוקרים בחרו קבוצה זו על סמך ציוני הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני, רמת שיתוף הפעולה והמוטיבציה הגבוהה שלהן ללמוד על הסביבות הטכנולוגיות – בייחוד כיצד לעבוד עם בינה מלאכותית יוצרת כדי לקדם את המקצועיות שלהן בהיותן מורות למתמטיקה, ולהציג את רמות השיתוף והמעורבות הגבוהות שלהן בקורס.

כל אחת משלוש המורות הייתה בעלת ותק של יותר מעשר שנים בהוראת מתמטיקה בבית הספר היסודי, הן היו מורות בכיתות היסודי העליונות, וכל אחת גם שימשה רכזת מתמטיקה בבית הספר שלה.

3. כלי איסוף נתונים

1. שאלון ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני: שאלון הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני שפיתחו שמידט ואחרים (Schmidt et al., 2009) הועבר בתחילת הקורס ובסופו כדי להעריך את הידע הטכנולוגי-פדגוגי-תוכני של המורים. מבחן זה מורכב מ-30 היגדים המדורגים בסולם ליקרט של חמש נקודות. השאלון מכסה שבעה רכיבי ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני (TPACK – TK, CK, PK, TCK, TPK, PCK) ומציג מהימנות גבוהה ($\alpha = .78-.93$). נתוני השאלון עובדו באמצעות סטטיסטיקה תיאורית, ונעשתה השוואה בין הציונים לפני הקורס ואחריו.

2. תמלילי השיח עם בינה מלאכותית יוצרת: כל אינטראקציה של המורות עם קלוד תועדה בשלמותה בתוך יומני המחקר השיתופיים. בתמלילים נמצאות ההנחיות שניסחו המורות ותגובות קלוד, והם אפשרו לנתח את מאפייני השיח ואת האופן ששילבו את הצעות קלוד בעיצוב המשימות הסופיות.

3. הקלטות שיח מונע סקרנות: מפגשי השיח מונע סקרנות הוקלטו ותומללו וסיפקו נתונים איכותניים עשירים על תהליכי שיתוף הפעולה של המורים.

4. משימות החקר שתכננו ועיצבו המורות ודוחות הרפלקציה של המשתתפים: משימות החקר הסופיות שעיצבו המורות נותחו על פי הרקע של ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני כדי להעריך כיצד השיח עם בינה מלאכותית יוצרת מתבטא ברכיבים המגוונים של ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני. ניתוח זה אפשר לזהות אילו רכיבי ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני ניכרים במשימות ואילו נשארו מאתגרים. דוחות הרפלקציה של המשתתפים שהוגשו בשל דרישות הקורס, סיפקו עוד דרך להבנת תהליכי הלמידה וההחלטות הפדגוגיות.



5. יומני מחקר שיתופיים: קבוצת המורות ניהלה יומן שיתופי באמצעות Google Forms, ומופיעים בו תיעוד שוטף של האינטראקציות עם בינה מלאכותית יוצרת (ובהן ציטוטים מדו־שיח), רפלקציות על הצעות קלוד שהתקבלו ושנדחו, הסברים של הנימוקים הפדגוגיים לכל החלטה ותובנות שעלו במפגשי השיח מונע סקרנות. יומנים אלה שימשו מקור נתונים עיקרי לניתוח תהליכי החשיבה והפיתוח המקצועי של המורות שהיו בקורס.

ניתוח נתונים

המחקר הזה מציג חקר מקרה בשיטה מעורבת (Creswell & Poht, 2018; Stake, 1995). בגישה המעורבת יש ממד כמותי (שאלוני ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני שניתנו לפני הקורס ואחריו ונותחו ניתוח סטטיסטי) וממד איכותני דומיננטי (ניתוח של תמלילי דו־שיח עם בינה מלאכותית יוצרת, תמלילי שיח מונע סקרנות, יומני מחקר ומשימות החקר שפותחו). לפי סוגת חקר המקרה (Stake, 1995), הניתוח האיכותני משמש ציר עיקרי, בעוד הנתונים הכמותיים משמשים לאימות ולהרחבה של הממצאים האיכותניים.

בניתוח הנתונים יש ארבעה שלבים עיקריים:

1. ניתוח כמותי של שאלוני ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני שניתנו לפני הקורס ואחריו.
 2. ניתוח איכותני של תמלילי שיח מונע סקרנות באמצעות שיטת ההשוואה המתמדת.
 3. ניתוח איכותני של יומני מחקר שיתופיים.
 4. ניתוח איכותני של משימות החקר ודוחות הרפלקציה של המשתתפים.
- ניתוח איכותני נעשה בקרב שלוש מורות שהיו קבוצה אחת בקורס. ניתוח כמותי נעשה בקרב כלל 41 משתתפי הקורס.

ממצאים

מאפייני השיח בין מורה לבינה המלאכותית היוצרת

קבוצת המורות בחרה לחבר משימת חקר ליחידת לימוד בנושא מרובעים לתלמידי כיתה ה'. ניתוח הנתונים חשף שני תבחינים עיקריים המאפיינים את האינטראקציה בין מורים לבינה המלאכותית היוצרת: 1. שיח איטרטיבי יעיל לשיפור ועידון של ההנחיות לקלוד; 2. שיח ביקורתי על הרעיונות שהציע קלוד לצד בחינת אתגרים פדגוגיים.

1. תהליך איטרטיבי: שיפור ועידון של הנחיות לבינה מלאכותית יוצרת

השיח בין המורות לבינה מלאכותית יוצרת שימש תהליך איטרטיבי מתמשך ויעיל של שיפור ועידון הנחיות, והיה בו עדכון של המערכת במידע חדש והתאמה בו בזמן לסביבות הטכנולוגיות. שיח זה התנהל בעת השיח מונע סקרנות, שבו המורות שאלו שאלות שמטרתן לשפר ולעדכן את ההנחיות על סמך תגובות קודמות שהתקבלו מבינה מלאכותית יוצרת. הרישום להלן שנלקח מהיומן השיתופי של הקבוצה, ממחיש זאת:

אחרי תכנון הפעילות בסביבת אורייגמטריה התייעצנו עם קלוד לגבי הוספת שאלות חקר מתאימות לסביבת ג'אוג'ברה שיתאימו למטרות השיעור. חלק מההצעות שקיבלנו מקלוד לא התאימו כי הוא לא הצליח לקרוא את המידע מתוך הסביבה הטכנולוגית. לאחר מכן הבנו שקלוד יכול לפרש תמונות, אז הכנו והעלנו קובץ המכיל את כל שלבי קיפולי הנייר באורייגמטריה, השאלות המוצגות באתר אורייגמטריה, ופעילות משלימה מג'אוג'ברה. ביקשנו מקלוד לסייע לנו לנסח ארבע שאלות חקר מעוררות מחשבה לשיעור שלנו, על סמך המוצג בקובץ. השאלות שקיבלנו היו מצוינות, אולם גילינו שהיישומון של ג'אוג'ברה, כפי שתוכנן מראש על ידינו, לא אפשר את תהליך החקר שהציע קלוד. לכן ערכנו שינויים ביישומון כדי להתאים אותו לשאלות החקר.

דוגמה לאופי האיטרטיבי של השיח אפשר לראות בעבודתה של ענאם על ייצוג תכונות המקבילית בג'אוג'ברה. בתחילה היא פנתה לקלוד בשאלה כיצד לבנות יישומון המאפשר לתלמידים לחקור את תכונות האלכסונים. לאחר תגובת קלוד ניסתה ענאם לממש את ההצעה, אך היא גילתה שהגדרת אורכי האלכסונים למספרים שלמים יצרה ייצוג מטעה על המסך – ממדי אלכסוני המקבילית התאימו לתכונות המלבן, שווים זה לזה. ענאם שבה לקלוד עם המידע החדש, והשיח האחר עזר לה להגדיר את האלכסונים בג'אוג'ברה במספרים עשרוניים עם דיוק של ספרה אחת מימין לנקודה העשרונית, מה שאפשר לייצג ייצוג מדויק ולפתח יכולות חקר אמיתיות לתלמידים. דוגמה זו ממחישה כיצד כל תגובה של קלוד מכוונת לשאלה חדשה, וכל עדכון שיפר את התוצר הסופי – תהליך דורכיווני ומתפתח של שיתוף פעולה בין המורה לבינה מלאכותית יוצרת.

2. שיח המקדם חשיבה ביקורתית

בעת הדו־שיח עם קלוד הראו המורים שיקול דעת וחשיבה ביקורתית על התגובות שקיבלו, והם הבינו שלקלוד חסר חלק מן "הידע" החיוני. למשל, קלוד הציג חוסר ידע טכנולוגי על הסביבות הטכנולוגיות המשולבות בשיעור. לדוגמה כאשר נעמי שאלה "מהם הקשיים הצפויים בשיעור זה?", תגובת קלוד הייתה שהקושי יכול להיות בהוראה עם קיפול נייר. נעמי ציינה: "ברור שקלוד לא מכיר את סביבת אוריגמטריה [...] קיפול נייר בסביבת אוריגמטריה אינו בעיה מכיוון שהסביבה כוללת אנימציה הממחישה את שלבי הקיפול". נעמי בחרה להתעלם מהצעת קלוד.

מגבלה אחרת התגלתה בתחום הידע המתמטי-פדגוגי של קלוד על האופן שמושגים מתמטיים מוגדרים על פי תוכנית הלימודים במתמטיקה. בשלב מסוים הבינה ענאם שקלוד "לא ידע" את ההגדרה של טרפז על פי תוכנית הלימודים בישראל (מרובע בעל זוג אחד בלבד של צלעות מקבילות) ובמקום זה הגדרתו לטרפז הייתה מרובע בעל לפחות זוג אחד של צלעות מקבילות, כלומר מקבילות, מעוינים וריבועים עשויים להיחשב גם "טרפזים". ענאם ציינה: "היה צורך לעדכן את קלוד בהגדרה של טרפז על פי תוכנית הלימודים בישראל". לפיכך היא שלחה לקלוד את ההגדרה המתאימה, ביקשה ממנו לנסח שאלת חקר חדשה וקיבלה רעיונות מתאימים לניסוח משימת חקר.

דוגמה אחרת המעידה על חשיבה ביקורתית של המורות לאחר שזיהו ידע טכנולוגי-פדגוגי חסר של קלוד מודגמת בהערה של גילה: "שאלות שהוצעו על ידי קלוד דרשו שלבים רבים של קיפול נייר. החלטנו שזה לא מתאים למשימות למידה מבוססות חקר, מכיוון שזה סטה ממטרות השיעור, האריך את משך השיעור, ולא התחשב בטווח הקשב המוגבל של התלמידים". גילה הראתה חשיבה ביקורתית ושיקול דעת על סמך הידע הטכנולוגי-פדגוגי שלה והחליטה לא לכלול את ההצעה של קלוד.

לעיתים החשיבה הביקורתית לא גרמה לדחייה אלא לשינוי מיקום ההצעה בשיעור. ענאם, למשל, בחנה שאלת חקר שהציע קלוד בנושא צירי סימטריה של מעוין: "בעזרת קיפולים, חקרו כמה צירי סימטריה יש למעוין ומה הם", וקבעה שהיא מתאימה לשלב מוקדם יותר בשיעור, ולכן העבירה אותה לפי שיקול דעתה הפדגוגי: "העברתי את השאלה של קלוד לשלב המוקדם יותר של בניית המעוין באמצעות קיפולי נייר כי בתהליך זה מתבקש ונכון להתייחס לצירי סימטריה".

התאמה מסוג אחר נעשתה כאשר קלוד הציע להשוות את תכונות המעוין, הטרפז, המקבילית והדלתון יחדיו. אחת המורות החליטה להשמיט את הדלתון מהמשימה ולהשוות רק בין המרובעים שיש להם לפחות זוג אחד של צלעות נגדיות מקבילות "כדי לאפשר השוואה ממוקדת יותר בתכונות הצלעות בין הצורות".

נראה כי לעיתים המורות חסרו ידע שקלוד השלים בעבורן, אך לעיתים ניסיון ההוראה של המורות והיכרותן העמוקה עם תוכנית הלימודים ועם הסביבות המתקשבות גרמו להן להיות מודעות למגבלות בינה מלאכותית יוצרת ולהפעיל חשיבה ביקורתית כדי להחליט כיצד להמשיך.

תרומת השיח בין מורה לבניה מלאכותית יוצרת להתפתחות ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני של המורים

1. טבלה 1 מציגה נתונים כמותיים של שאלון הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני שקיבלו לפני הקורס ואחריו שלוש המורות שהשתתפו במחקר (מה-14 המורים שהשתתפו בקורס). הנתונים מלמדים על ציוני בסיס גבוהים בכלל רכיבי ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני טרם הקורס. נתוני שאלון הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני של גילה ונעמי נשארו יציבים, בעוד ציוני ענאם הראו שיפור בכלל רכיבי ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני מ-3.50 ל-4.50 ובידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני הכולל. חשוב לציין שלענאם היה פחות ניסיון משתי המורות האחרות בכל הנוגע לשילוב טכנולוגיה בהוראת מתמטיקה.

טבלה 1: ממצאי שאלון ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני (TRACK) של המורות שהשתתפו במחקר – לפני הקורס ואחריו

שם	TPACK אחרי	TPACK לפני	TPK אחרי	TPK לפני	PK אחרי	PK לפני	CK אחרי	CK לפני	TK אחרי	TK לפני
גילה	4	4	4.89	4	4.86	4.86	4	4	4.67	5
נעמי	4	4	4.11	4	5	5	5	5	4	3.67
ענאם	4.5	3.5	4	3.78	3.57	3.57	4	4	3.83	3.5



ניתוח הנתונים האיכותניים הכולל את השיח מונע סקרנות (CDD) ואת האינטראקציות בין המורות לקלוד, אפשר לתת תשובה מפורטת יותר לשאלה כיצד השיח תרם לכל רכיב של ידע הטכנולוגי-פדגוגי-תוכני של המורות:

ידע תוכן (CK): שיפור ידע תוכן גאומטרי של המורות מתבטא בהעמקת ההבנה שלהן בעניין תכונות המרובעים, בייחוד בנושא תכונות האלכסונים והקשר ביניהם ליחסי ההכלה במשפחת המרובעים. לדוגמה, הידע של נעמי על ההבדל בין תכונות אלכסוני מעוינים ובין תכונות אלכסוני דלתונים היה חסר. כפי שדיווחה, "השימוש בבינה מלאכותית העשיר את הידע שלי ודרש ממני להיות מדויקת יותר בהגדרת מושגים".

ידע פדגוגי (PK): כל חיזוק של ידע תוכן שנוצר לאחר שיח מונע סקרנות ושיח של המורות עם קלוד הרחיב בו בזמן גם את הידע הפדגוגי שלהן והניע אותן לשקול ולבחון אסטרטגיות הוראה מתאימות. למשל, ההרחבה של ידע תוכן שהוצגה בסעיף קודם, כאשר התלבטו בעניין קשיים אפשריים של תלמידים בהבנה של תכונות אלכסוני מרובעים והקשר ליחסי ההכלה ביניהם, הן החליטו לשלב למידת עמיתים באמצעות שילוב תפקידי הדרכה לתלמידים מתקדמים כדי לקדם תלמידים מתקשים.

ידע טכנולוגי (TK): הידע הטכנולוגי של המורות הורחב בכל הנוגע למינוף שני כלים דיגיטליים להוראת גאומטריה. דוגמה טובה היא כאשר ענאם התמודדה עם האתגר של ייצוג מדויק של אורך האלכסונים במקבילית בג'אוג'ברה, ולמדה לעדכן את ההגדרות לייצוג האובייקטים הגאומטריים על המסך במספרים עשרוניים, כדי לדייק את הייצוג שלהם ולאפשר חקר. בנוסף, במהלך העבודה עם שתי הסביבות הטכנולוגיות, המורים זיהו את המגבלה הטכנולוגית של אוריגמטריה, בהיצע מוגבל של דוגמאות לאובייקטים הגאומטריים המשולבים במשימה, ומכאן עלתה המודעות ליתרונות של ג'אוג'ברה כסביבה המאפשרת התבוננות מהירה על מגוון מנחים של אותם אובייקטים על המסך.

ידע תוכן פדגוגי (PCK): השיח עם קלוד שיפר את הידע תוכן פדגוגי של המורות. למשל כדי להציג משימת חקר המזמנת לתלמידים הבחנה בין תכונות מרובעים למיניהם, בשיח על תכונות הדלתון הציע קלוד להתבונן בתכונה הייחודית של דלתון בהשוואה לריבוע ומעוין, המאפשרת לזהות בקלות דלתון על סמך תכונה זו. הוא עודד את המורים להבין טוב יותר את משפחת המרובעים, להבחין ביניהם וכיצד לנסח משימת חקר המכוונת את התלמידים לתובנות אלו.

ידע תוכן טכנולוגי (TCK): הידע תוכן טכנולוגי של המורות הורחב בייחוד בתהליך מינוף כלים דיגיטליים לייצוג מדויק של מושגים מתמטיים, כפי שציינה ענאם: "בעת תכנון השיעורים שלי, הרחבתי את הידע שלי לגבי האפשרויות הטכנולוגיות הזמינות בשילוב שתי הסביבות". סביבת אוריגמטריה אפשרה לחקור תכונות של מרובע נתון באמצעות קישור בין פעולות הקיפול הפיזי לתכונות הגאומטריות, בעוד ג'אוג'ברה הרחיבה את החקר מתכונות מרובע בודד ליחסי הכלה בין סוגי המרובעים השונים.

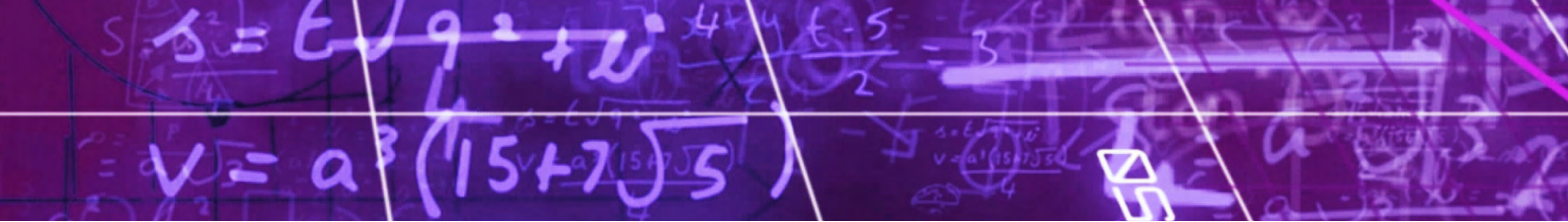
ידע פדגוגי-טכנולוגי (TPK): העבודה עם שתי הסביבות הטכנולוגיות בשילוב השיח עם קלוד שיפרה את האופן שהמורים שילבו טכנולוגיה עם אסטרטגיות הוראה יעילות. כפי שציינה גילה, "כאשר מגישים לתלמידים משימת חקר בשילוב טכנולוגיה דינמית התלמידים מזהים את תכונות השימור של האלכסונים במגוון רחב של מרובעים, זה מאפשר להם לזהות הכללות אפשריות ולנסח השערות מתאימות".

ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני (TPACK): תוצאות הממצאים האיכותניים מראות שהשיח עם קלוד לצד שימוש בשיח מונע סקרנות שיפר מבחינה כוללנית (הוליסטית) את הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני של המורים, בייחוד בעיצוב ותכנון של משימות חקר בשילוב שתי סביבות טכנולוגיות המאפשרות לחקור חקר מדורג הממוקד בתוכן מסוים על רקע המטרות הפדגוגיות שהוגדרו.

דיון

הממצאים חשפו שני סוגים של שיח יעיל בין מורה לבינה מלאכותית יוצרת: הראשון, שיח איטרטיבי, שיש בו שיפור של עידון הנחיות על פי הצרכים החינוכיים של המורים והשני, שיח המזמין חשיבה ביקורתית, המתבטאת הן בדחיית הצעות קלוד הן בקבלתן ובהתאמתן לצרכים פדגוגיים מסוימים, כפי שמתבטא הן בשיח מונע סקרנות על הצעות בינה מלאכותית יוצרת הן בשיח עם קלוד שהשתקפו ביומני המחקר השיתופיים של המורים.

התהליכים האיטרטיביים שהוצגו במחקר הזה עולים בקנה אחד עם ממצאי המחקרים של הולשטיין ואחרים (Holstein et al., 2019), סגל וביטון (Segal & Biton, 2024) וביטון וסגל (Biton & Segal, 2025) שהדגישו את חשיבות האינטראקציה הדו-כיוונית בין מורים לבינה מלאכותית יוצרת. אינטראקציה זו מפתחת את יכולת המורה להתערב ולשנות את הצעות בינה מלאכותית יוצרת בסביבה בטוחה ועל פי צרכיהם החינוכיים. שני מאפיינים אלה של שיח יעיל – איטרטיבי וביקורתי – מדגישים את אופיו המתפתח והדינמי של שיח בין מורים לבינה מלאכותית יוצרת. כמו כן מאפיינים



אלה מדגישים את חשיבות הידע הפדגוגי והמתמטי שעומו המורים מגיעים להתייעצות עם בינה מלאכותית יוצרת, לצורך בחינה של הרעיונות שהיא מציעה. האופי האיטרטיבי והביקורתי של השיח בין המורים לבינה מלאכותית יוצרת הוא תנאי הכרחי לשימוש יעיל ואחראי, שבו המורים הם שותפים פעילים המכוונים וממצים את השיח ביעילות, כפי שעולה גם בספרות המחקרית (Biton & Segal, 2025; Kim, 2024; Noroozi et al., 2024; Segal & Biton, 2024).

הנתונים האיכותניים מצביעים על התפתחות הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני של המורים על כל רכיביו, ובייחוד הידע פדגוגי-טכנולוגי. השיח בין מורים לבינה מלאכותית יוצרת פיתח את הידע פדגוגי-טכנולוגי שלהם מכיוון שהמורים נחשפו לטכנולוגיות חדשות הכוללות בין השאר את אורגמטריה וג'אוג'ברה ונוסף על כך את סביבת בינה מלאכותית יוצרת שאפשרה להם להרחיב ולהתאים ידע פדגוגי טכנולוגי ולגלות גישות פדגוגיות חדשות בשילוב טכנולוגיות. ממצא זה עולה בקנה אחד עם הצעתם של מישרה ואחרים (Mishra et al., 2023) כי בבינה מלאכותית יוצרת יש יכולת לחזק את הידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני של מורים, ובייחוד את הידע טכנולוגי-פדגוגי, באמצעות חשיפה ליכולות פדגוגיות-טכנולוגיות חדשות. כמו כן גטנז (Getenet, 2017) מדגיש שהרקע של ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני מסייע למורים לפתח ידע אינטגרטיבי המשלב טכנולוגיה, תוכן ופדגוגיה – בדיוק התהליך שהתנהל בשיח של המורות עם קלוד ובמפגשי השיח מונע סקרנות.

ממצאי המחקר הזה מלמדים על היכולת הנמצאת בשילוב השיח מונע סקרנות עם בינה מלאכותית, המשמשת כלי המאפשר למורים סביבה עצמאית ללמידה ולפיתוח תהליכי חשיבה ביקורתית בעניין הצעות של בינה מלאכותית יוצרת. המורות הביאו לסביבת השיח מונע סקרנות את הלבטים, הדילמות והאתגרים לצורך חשיבה משותפת. כלומר לשילוב של עבודה שיתופית הכוללת שיח מונע סקרנות של קבוצת מורות לצד העבודה עם בינה מלאכותית יוצרת, יש פוטנציאל למנוע ניוון של חשיבה ביקורתית או "עצלות מטא-קוגניטיבית" (Oakley et al., 2026; Prunkl, 2024; Lee et al., 2025). השיח מונע סקרנות משמש מרחב שיח מובנה ואקדמי שבו מורים יכולים להעלות שאלות קוגניטיביות, טכנולוגיות ופדגוגיות, כאשר הבינה מלאכותית יוצרת משמשת שותף פדגוגי בחינוך מתמטי, בייחוד בנושא של שילוב סביבות גאומטריה דינמיות. ממצאים אלה תומכים בעקרונות השיח מונע סקרנות שניסחו להבי ואחרים (Lehavi et al., 2019) וסגל ואחרים (Segal et al., 2023), ולפיהם שיח מובנה מבוסס ראיות בין עמיתים מעמיק את המודעות המקצועית ומאפשר חשיבה ביקורתית, בייחוד כשהוא משולב עם כלי בינה מלאכותית יוצרת המציעים הרחבה של רעיונות פדגוגיים-מתמטיים.

הממצאים מדגישים את חשיבות תפקיד מורי המורים בשילוב מושכל של בינה מלאכותית בהכשרת מורים לצד מתן כלים למורים להפעיל שיקול דעת מקצועי ולסרב לקבל הצעות של בינה מלאכותית יוצרת בלי לבחון אותן.

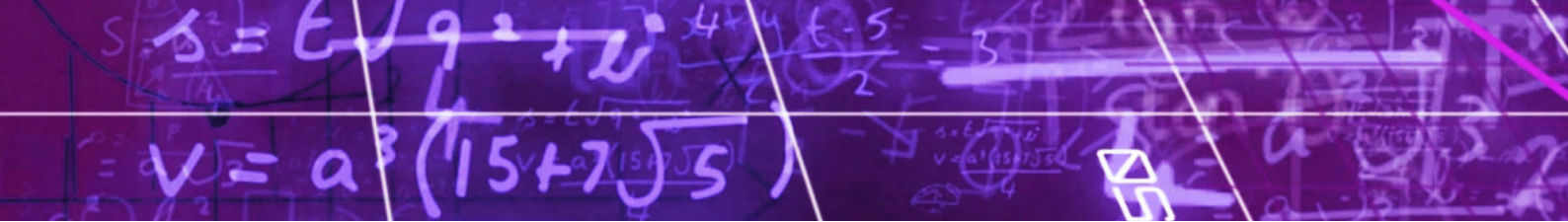
מגבלות המחקר והצעות למחקר עתידי

שתי המגבלות העיקריות של מחקר זה הן גודל המדגם הקטן והתמקדותו בתחום המסוים של הוראת גאומטריה. יש לציין כי המשתתפות נבחרו בשל ניסיוןן הרב וציוני ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני גבוהים כבר בתחילת המחקר, מה שעשוי להסביר את השיח החיובי שלהן עם בינה מלאכותית יוצרת. מורות עם רמות ניסיון נמוכות יותר או מיומנות טכנולוגית אחרת עשויות לחוות דפוסי אינטראקציה מגוונים עם בינה מלאכותית יוצרת. נוסף על כך הניתוח של התפתחות רכיבי ידע טכנולוגי-פדגוגי-תוכני הוא תיאורי יחסית, וניתוח מעמיק יותר של האופן שהרכיבים המגוונים משתלבים ומתפתחים בו בזמן היה מעשיר את ההבנה.

למחקר עתידי מומלץ להרחיב למדגם גדול ומגוון יותר של מורים ברמות ניסיון מגוונות, קשרים חינוכיים ותחומי תוכן מגוונים. חוקרים צריכים להיות מודעים לשינוי המהיר והדינמי של סביבות מבוססות בינה מלאכותית יוצרת, הדורש ממורי המורים התאמות הנשענות על שינויים אלה.

רשימת מקורות

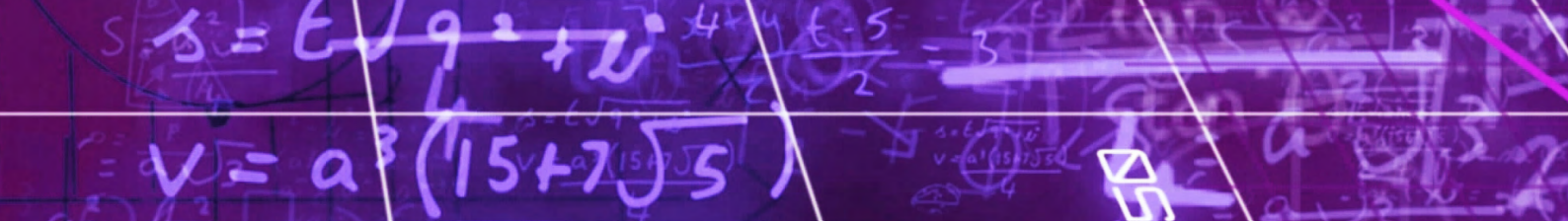
- קלמר, ע', אוברמן, ג' וגולן, מ' (2015). פיתוח תובנות של תפיסה מרחבית: למידה והוראה של גאומטריה דרך קיפולי נייר. *מספר חזק 2000*, 26, 23–30.
- Abramovich, S., & Cho, E. K. (2015). Using digital technology for mathematical problem posing. In F. M. Singer, N. F. Ellerton, J. Cai (Eds.), *Mathematical problem posing: From research to effective practice* (pp. 71–102). Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-6258-3_4
- Arbain, N., & Shukor, N. A. (2015). The effects of GeoGebra on students' achievement. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 172, 208–214. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.356>
- Arıcı, S., & Aslan-Tutak, F. (2015). The effect of origami-based instruction on spatial visualization, geometry achievement, and geometric reasoning. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 13, 179–200. <https://doi.org/10.1007/s10763-013-9487-8>
- Avargil, S., Herscovitz, O., & Dori, Y. J. (2012). Teaching thinking skills in context-based learning: Teachers' challenges and assessment knowledge. *Journal of Science Education and Technology*, 21(2), 207–225. <https://doi.org/10.1007/s10956-011-9302-7>
- Baidoo-Anu, D., & Ansah, L. O. (2023). Education in the era of generative artificial intelligence (AI): Understanding the potential benefits of ChatGPT in promoting teaching and learning. *Journal of AI*, 7(1), 52–62. <https://doi.org/10.61969/jai.1337500>
- Baumanns, L. & Rott, B. (2021). Rethinking problem-posing situations: A review. *Investigations in Mathematics Learning*, 13(2), 59–76. <http://dx.doi.org/10.1080/19477503.2020.1841501>
- Biton, Y., & Segal, R. (2025). Learning to craft and critically evaluate prompts: The role of Generative AI (ChatGPT) in enhancing pre-service mathematics teachers' TPACK and problem-posing skills. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 13(1), 202–223. <https://doi.org/10.46328/ijemst.4654>
- Biton, Y., Segal, R., & Alush, K. (2025). How utilizing generative AI when addressing pedagogical and mathematical events contributes to mathematics teacher educators' TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge). *International Journal of Education in Mathematics, Science, and Technology (IJEMST)*, 13(4), 895–913. <https://doi.org/10.46328/ijemst.4928>
- Boakes, N. (2011). Origami and spatial thinking of college-age students. In P. Wang-Iverson, R. J. Lang, & M. Yim (Eds.), *Origami 5: Fifth international meeting of origami science, mathematics, and education* (pp. 173–187). A K Peters/CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10971>
- Boo, J. Y., & Leong, K. E. (2016). Teaching and learning geometry in primary school using GeoGebra. In W. S. Yang, D. B. Meade, & K. Khairiree (Eds.), *Teaching and learning mathematics, sciences and engineering through technology: Proceedings of the twenty first Asian technology conference in mathematics* (pp. 289–300). Mathematics and Technology, LLC.
- Budinski, N., Lavicza, Z., Fenyvesi, K., & Milinković, D. (2020). Developing primary school students' formal geometric definitions knowledge by connecting origami and technology. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 15(2), Article em0569. <http://dx.doi.org/10.29333/iejme/6266>
- Cai, J., Hwang, S., Jiang, C., & Silber, S. (2015). Problem-posing research in mathematics education: Some answered and unanswered questions. In F. M. Singer, N. F. Ellerton, J. Cai (Eds.), *Mathematical problem posing: From research to effective practice* (pp. 3–34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6258-3_1
- Cai, J., Morris, A., Hohensee, C., Hwang, S., Robison, V., Cirillo, M., Kramer, S. L., & Hiebert, J. (2020). Improving the impact of research on practice: Capitalizing on technological advances for research. *Journal for Research in Mathematics Education*, 51(5), 518–529. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc-2020-0165>



- Cai, J., & Hwang, S. (2021). Teachers as redesigners of curriculum to teach mathematics through problem posing: Conceptualization and initial findings of a problem posing project. *ZDM – Mathematics Education*, 53(6), 1403–1416. <https://doi.org/10.1007/s11858-021-01252-3>
- Chan, C. K. Y. (2023). A comprehensive AI policy education framework for university teaching and learning. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20(1), Article 38. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00408-3>
- Chan, C. K. Y., & Hu, W. (2023). Students' voices on generative AI: Perceptions, benefits, and challenges in higher education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20(1), Article 43. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00411-8>
- Chan, K. K., & Leung, S. W. (2014). Dynamic geometry software improves mathematical achievement: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Educational Computing Research*, 51(3), 311–325. <https://doi.org/10.2190/EC.51.3.c>
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (4th international edition). Sage Publishing.
- Dağdelen, S., & Kösterelioğlu, İ. (2020). Effects of origami-based mathematics lessons on student achievement and attitudes in mathematics. *Journal of Research in Childhood Education*, 34(3), 385–400.
- Fahlgren, M., & Brunström, M. (2014). A model for task design with focus on exploration, explanation, and generalization in a dynamic geometry environment. *Technology, Knowledge and Learning*, 19(3), 287–315. <https://doi.org/10.1007/s10758-014-9213-9>
- Getenet, S. T. (2017). Adapting technological pedagogical content knowledge framework to teach mathematics. *Education and Information Technologies*, 22, 2629–2644. <https://doi.org/10.1007/s10639-016-9566-x>
- Golan, M. (2011). Origametrica and the van Hiele theory of teaching geometry. In P. Wang-Iverson, R. J. Lang, & M. Yim (Eds.), *Origami 5: Fifth international meeting of origami science, mathematics, and education* (pp. 141–150). A K Peters/CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10971>
- Golan, M., & Jackson, P. (2009). Origametrica: A program to teach geometry and to develop learning skills using the art of origami. In R. J. Lang (Ed.), *Origami*, 4 (pp. 459–469). A K Peters/CRC Press.
- Gurl, T. J., Markinson, M. P., & Artzt, A. F. (2025). Using ChatGPT as a lesson planning assistant with preservice secondary mathematics teachers. *Digital Experiences in Mathematics Education*, 11(1), 114–139. <https://doi.org/10.1007/s40751-024-00162-9>
- Hähkiöniemi, M. (2017). Student teachers' types of probing questions in inquiry-based mathematics teaching with and without GeoGebra. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 48(7), 973–987. <https://doi.org/10.1080/0020739X.2017.1329558>
- Holstein, K., McLaren, B. M., & Aleven, V. (2019). Co-designing a real-time classroom orchestration tool to support teacher-AI complementarity. *Journal of Learning Analytics*, 6(2), 27–52. <https://doi.org/10.18608/jla.2019.62.3>
- Kandil, S., & Işıksal-Bostan, M. (2019). Effect of inquiry-based instruction enriched with origami activities on achievement, and self-efficacy in geometry. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 50(4), 557–576. <https://doi.org/10.1080/0020739X.2018.1527407>
- Kasneci, E., Seßler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., Gasser, U., Groh, G., Günnemann, S., Hüllermeier, E., Krusche, S., Kutyniok, G., Michaeli, T., Nerdel, C., Pfeffer, J. Poquet, O., Sailer, M., Schmidt, A., Seidel, T., . . . Kasneci, G. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and Individual Differences*, 103, Article 102274. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274>



- Kaur, A., & Rosli, R. (2021). Problem posing in mathematics education research: A systematic review. *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, 10(1), 438–456.
- Kim, J. (2024). Leading teachers' perspective on teacher-AI collaboration in education. *Education and Information Technologies*, 29(7), 8693–8724. <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12109-5>
- Klemer, A., & Rapoport, S. (2020). Origami and GeoGebra activities contribute to geometric thinking in second graders. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 16(11), Article em1894. <https://doi.org/10.29333/ejmste/8537>
- Klemer, A., Segal, R., Miedijensky, S., Herscu-Kluska, R., & Kouropatov, A. (2023). Changes in the attitudes of mathematics and science teachers toward the integration and use of computerized technological tools as a result of the COVID-19 pandemic. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 19(7), Article em2295. <https://doi.org/10.29333/ejmste/13306>
- Koehler, M., & Mishra, P. (2009). What is technological pedagogical content knowledge (TPACK)? *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, 9(1), 60–70.
- Kohen, Z., Schwartz-Aviad, L., & Peleg, T. (2025). Who moved my triangle? Pre-and in-service teachers inquiring in a mathematics lab. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 56(1), 130–158. <https://doi.org/10.1080/0020739X.2023.2199314>.
- Komatsu, K., & Jones, K. (2020). Interplay between paper-and-pencil activity and dynamic-geometry-environment use during generalisation and proving. *Digital Experiences in Mathematics Education*, 6(2), 123–143. <https://doi.org/10.1007/s40751-020-00067-3>
- Kuzle, A. (2017). Delving into the nature of problem-solving processes in a dynamic geometry environment: Different technological effects on cognitive processing. *Technology, Knowledge and Learning*, 22(1), 37–64. <https://doi.org/10.1007/s10758-016-9284-x>
- Lee, H., Sarkar, A., Tankelevitch, L., Drosos, I., Rintel, S., Banks, R., & Wilson, N. (2025). The impact of generative AI on critical thinking: Self-reported reductions in cognitive effort and confidence effects from a survey of knowledge workers. In N. Yamashita, V. Evers, & K. Yatani (Eds.), *CHI '25: Proceedings of the 2025 CHI conference on human factors in computing systems* (Article 1121, pp. 1–22). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3706598.3713778>
- Lee, S. Y. (2021). Research status of mathematical problem posing in mathematics education journals. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 19(8), 1677–1693. <https://doi.org/10.1007/s10763-020-10128-z>
- Lehavi, Y., Merzel, A., Segal, R., Baram, A., & Eylon, B. S. (2019). Using self-video-based discourse in training physics teachers. In E. McLoughlin, & P. van Kampen (Eds.), *Concepts, strategies and models to enhance physics teaching and learning* (pp. 159–169). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18137-6_14
- Leung, A. (2008). Dragging in a dynamic geometry environment through the lens of variation. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, 13(2), 135–157. <https://doi.org/10.1007/s10758-008-9130-x>
- Marienko, M., Nosenko, Y., Sukhikh, A., Tataurov, V., & Shyshkina, M. (2020). Personalization of learning through adaptive technologies in the context of sustainable development of teachers' education. *E3S Web of Conferences*, 166, Article 10015. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202016610015>
- McCulloch, A. W., Leatham, K. R., Lovett, J. N., Bailey, N. G., & Reed, S. D. (2021). How we are preparing secondary mathematics teachers to teach with technology: Findings from a nationwide survey. *Journal for Research in Mathematics Education*, 52(1), 94–107. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc-2020-0205>



- Mishra, P., Warr, M., & Islam, R. (2023). TPACK in the age of ChatGPT and generative AI. *Journal of Digital Learning in Teacher Education*, 39(4), 235–251. <https://doi.org/10.1080/21532974.2023.2247480>
- Nedaei, M., Radmehr, F., & Drake, M. (2022). Exploring undergraduate engineering students' mathematical problem-posing: The case of integral-area relationships in integral calculus. *Mathematical Thinking and Learning*, 24(2), 149–175. <https://doi.org/10.1080/10986065.2020.1858516>
- Noroozi, O., Soleimani, S., Farrokhnia, M., & Banihashem, S. K. (2024). Generative AI in education: Pedagogical, theoretical, and methodological perspectives. *International Journal of Technology in Education*, 7(3), 373–385. <https://doi.org/10.46328/ijte.845>
- Oakley, B., Johnston, M., Chen, K.-Z., Jung, E., & Sejnowski, T. (2026). The memory paradox: Why our brains need knowledge in an age of AI. In M. Rangeloy & N. Fairfax (Eds.), *The future of artificial intelligence: Economics, society, risks and global policy* (pp. 573–529). Springer Nature.
- Oberman, J. (2018). Origametry: Paper folding for teaching geometry in preschool and primary school. In N. Movshovitz-Hadar (Ed.), *K-12 mathematical education in Israel: Issues and innovations* (pp. 89–95). World Scientific.
- Opesemowo, O. A., & Ndlovu, M. (2024). Artificial intelligence in mathematics education: The good, the bad, and the ugly. *Journal of Pedagogical Research*, 8(3), 333–346. <https://doi.org/10.33902/JPR.202426428>
- Prunkl, C. (2024). Human autonomy at risk? An analysis of the challenges from AI. *Minds and Machines*, 34(3), Article 26. <https://doi.org/10.1007/s11023-024-09665-1>
- Rane, N. (2023) Enhancing mathematical capabilities through ChatGPT and similar generative artificial intelligence: Roles and challenges in solving mathematical problems. *SSRN Electronic Journal*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4603237>
- Raveh, I., Lavie, I., Wagner-Gershgoren, I., Miedijensky, S., Segal, R., & Klemer, A. (2025). Mathematics and science teachers: How their perceptions of their TPACK and use of technology interrelate. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 21(1), Article em2565. <https://doi.org/10.29333/ejmste/15803>
- Schmidt, D. A., Baran E., Thompson A. D., Koehler, M. J., Mishra, P., & Shin, T. (2009). Technological pedagogical content knowledge (TPACK): The development and validation of an assessment instrument for preservice teachers. *Journal of Research on Technology in Education*, 42(2), 123–149. <https://doi.org/10.1080/15391523.2009.10782544>
- Segal, R. (2026). Mathematics teachers convert textbook tasks to dynamic ones: How changing the problem architecture enhances teachers' TPACK. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 24, Article 15. <https://doi.org/10.1007/s10763-025-10641-z>
- Segal, R., Oxman, V., & Stupel, M. (2021). Using dynamic geometry software to enhance specialized content knowledge: Pre-service mathematics teachers' perceptions. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 16(3), Article em0647. <https://doi.org/10.29333/iejme/11065>
- Segal, R., Stupel, M., Sigler, A., & Jahangirli, J. (2018). The effectiveness of the "what if not" strategy coupled with dynamic geometry software in an inquiry-based geometry classroom. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 4(7), 1099–1109. <https://doi.org/10.1080/0020739X.2018.1452302>
- Segal, R., & Biton Y. (2024). The contribution that utilizing generative AI for problem posing makes to pre-service high school mathematics teachers' TPACK. *International Journal of Education in Mathematics, Science, and Technology*, 12(6), 1556–1579. <https://doi.org/10.46328/ijemst.4591>
- Segal, R., Lehavi, Y., & Merzel, A. (2023). Improving the professional awareness of mathematics teachers and teacher instructors using video-based curiosity-driven discourse – a case study. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 22, 1083–1106. <https://doi.org/10.1007/s10763-023-10418-2>



- Sherman, M. F., Cayton, C., Walkington, C., & Funsch, A. (2020). An analysis of secondary mathematics textbooks with regard to technology integration. *Journal for Research in Mathematics Education*, 51(3), 361–374. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc-2020-0005>
- Silver, E. A. (1994). On mathematical problem posing. *For the Learning of Mathematics*, 14(1), 19–28.
- Stake, R. E. (1995). *The art of case study research*. Sage.
- Stein, H., Gurevich, I., & Gorev, D. (2020). Integration of technology by novice mathematics teachers – What facilitates such integration and what makes it difficult? *Education and Information Technologies*, 25(1), 141–161. <https://doi.org/10.1007/s10639-019-09950-y>
- Wardat, Y., Tashtoush, M. A., AlAli, R., & Jarrah, A. M. (2023). ChatGPT: A revolutionary tool for teaching and learning mathematics. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 19(7), Article em2286. <https://doi.org/10.29333/ejmste/13272>
- Wassie, Y. A., & Zergaw, G. A. (2019). Some of the potential affordances, challenges and limitations of using GeoGebra in mathematics education. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 15(8), Article em1734. <https://doi.org/10.29333/ejmste/108436>
- Weingarden, M., & Heyd-Metzuyanim, E. (2023). What can the realization tree assessment tool reveal about explorative classroom discussions? *Journal for Research in Mathematics Education*, 54(2), 97–117. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc-2020-0084>
- Yin, R. K. (2011). *Applications of case study research* (3rd. ed.). Sage Publications.