מחקר פדגוגי

תובנות מהטמעת תוכניות חלוץ להוראת בינה מלאכותית בחינוך העל-יסודי בישראל

אוגוסט 2026



RISE | Resilient, Innovative & Sustainable Economy

1. מבוא ומטרת המחקר

רקע

הבינה המלאכותית הופכת במהירות מתשתית טכנולוגית מתקדמת ליכולת בסיסית הנדרשת להשתלבות בעולם האקדמי, בשוק העבודה ובחברה. מערכות מבוססות בינה מלאכותית כבר משמשות למחקר, לפיתוח תוכנה, לניתוח נתונים, לקבלת החלטות וליצירת ידע ותוכן. לנוכח קצב השינוי, מערכת החינוך אינה נדרשת עוד רק להקנות לתלמידים היכרות כללית עם כלים מבוססי בינה מלאכותית, אלא לבחון כיצד ניתן להכשיר לפחות חלק מהם להבנה מעמיקה של התחום, לפיתוח מערכות וליצירת הידע והטכנולוגיות של העתיד.

בישראל פועלות בשנים האחרונות מספר תוכניות המבקשות להעניק לתלמידי החינוך העל-יסודי הכשרה מעמיקה בבינה מלאכותית. תוכניות אלה נבדלות מפעילויות קצרות של התנסות בכלי AI או מהקניית אוריינות דיגיטלית כללית. הן מבקשות לפתח בקרב תלמידים ידע תיאורטי ומעשי, יכולת תכנות ופתרון בעיות, הבנה של מודלים ונתונים ולעיתים גם יכולת לבצע פרויקטים עצמאיים ברמה מתקדמת.

לתוכניות אלה עשויה להיות חשיבות אסטרטגית. הן יכולות להרחיב את מאגר ההון האנושי בתחומי הבינה המלאכותית, לחשוף תלמידים למסלולי לימוד ותעסוקה טכנולוגיים וליצור רצף בין מערכת החינוך, האקדמיה, השירות הצבאי והתעשייה. בה בעת, התוכניות פועלות כיום במרחב מבוזר יחסית, ללא הגדרה משותפת של הידע והמיומנויות הנדרשים, של רמת העומק הרצויה או של הפרופיל המקצועי של המורים והמדריכים.

בהיעדר מסגרת מוסכמת, תוכניות שונות עשויות להשתמש במונח "לימודי בינה מלאכותית" כדי לתאר תכנים שונים מאוד. חלקן מתמקדות בשימוש בכלים קיימים, אחרות בתכנות ובמדעי הנתונים, וחלקן מבקשות להקנות הבנה מתמטית ואלגוריתמית עמוקה יותר של אופן פעולתם של מודלים. גם בתוך תוכניות בעלות שאיפות דומות קיימים הבדלים במשך ההכשרה, בגיל המשתתפים, בשיטות ההוראה, בהיקף ההתנסות המעשית ובקשר לתוכניות הלימודים הפורמליות.

סוגיה נוספת נוגעת למורים ולמדריכים. הוראת בינה מלאכותית ברמה מתקדמת מחייבת שילוב בין ידע מקצועי, ניסיון מעשי ויכולת פדגוגית. לא כל מי שמחזיק בידע טכנולוגי יודע לתרגם אותו לתהליך למידה המותאם לתלמידי תיכון, ומנגד, גם מורים מנוסים למדעי המחשב עשויים להזדקק להכשרה נוספת כדי ללמד תכנים מתקדמים בבינה מלאכותית. מודל ההוראה - מורים מתוך מערכת החינוך, אנשי תעשייה, מדריכים חיצוניים או שילוב ביניהם - עשוי להשפיע על איכות הלמידה, על רציפות התוכנית ועל היכולת להרחיבה לאורך זמן.

על רקע זה, המחקר מבקש לבחון באופן ראשוני את תוכניות החלוץ להוראת בינה מלאכותית בחינוך העל-יסודי בישראל. מטרתו אינה לדרג את התוכניות או לקבוע מי מהן "טובה יותר", אלא לזהות את רכיבי הליבה המשותפים, להבין את ההבדלים ביניהן ולבחון אילו בחירות תוכניות ופדגוגיות תומכות בלמידה משמעותית. המחקר מתמקד הן בידע ובמיומנויות שהתוכניות מבקשות להקנות והן בפרופיל המורים והמדריכים ובמודלי ההוראה שבהם הן משתמשות.

באמצעות מיפוי השוואתי של תוכניות נבחרות וראיונות עם מורים, מדריכים ובעלי תפקידים, המחקר מבקש להשיב על שתי שאלות מרכזיות: מהו הידע הנדרש בלימודי בינה מלאכותית בחינוך העל-יסודי, ומהו הפרופיל המקצועי והפדגוגי הנדרש ממי שמלמדים את התחום. לצד זאת ייבחנו מידת ההתאמה בין התכנים לגיל התלמידים ולרמת הידע שלהם, הקשר בין התוכניות למסגרות הלימוד הקיימות, האופן שבו נלמדים תכנים מורכבים והבחירות שנעשו ביחס לתכנים שנכללו, צומצמו או הושמטו.

ממצאי המחקר נועדו לספק בסיס לשיח של אנשי השדה בתחום. בכך מבקש הדוח לתרום לפיתוח התשתית החינוכית שתאפשר לישראל להכשיר את הדור הבא של המהנדסים והמהנדסות, החוקרים והחוקרות והיזמים והיזמות שיובילו את תחום הבינה המלאכותית.

2. שיטת המחקר

2.1 גישת המחקר

המחקר מבוסס על מתודולוגיה איכותנית-השוואתית (Multiple Case Study), המאפשרת לבחון לעומק מספר תוכניות חלוץ שונות ולהשוות ביניהן. גישה זו מתאימה במיוחד לחקר תחום המצוי בשלבי התהוות, שבו טרם התגבשו מודלים פדגוגיים מוסכמים או גוף ידע מחקרי מבוסס. המחקר אינו מבקש להעריך את יעילותן של התוכניות או למדוד הישגים לימודיים, אלא להבין כיצד אנשי השדה עצמם תופסים את מטרות ההוראה, את האתגרים העומדים בפניהם ואת השיקולים המנחים את פיתוח התוכניות והפעלתן.

2.2 איסוף וניתוח הנתונים

הדוח מבוסס על 25 ראיונות עומק חצי-מובנים עם מורים, מדריכים, מפתחי תוכניות לימודים ואנשי אקדמיה. הראיונות נותחו באמצעות ניתוח תמטי (Thematic Analysis): בשלב הראשון בוצעה קריאה חוזרת של כלל הראיונות וזוהו יחידות משמעות; בשלב השני קובצו יחידות המשמעות לקטגוריות רחבות יותר תוך השוואה בין המרואיינים והתוכניות; ולבסוף נבחן הקשר בין התמות השונות לצורך פיתוח הבנה אינטגרטיבית. לצד הראיונות נסקרו מסמכים של התוכניות – סילבוסים, תוכניות לימודים, ותוצרי תלמידים – ששימשו להכנת הראיונות ולהמחשת רכיבי הידע ורמות העומק (ראו נספח ב׳).

2.3 מגבלות המחקר

מדובר במדגם איכותני של ראיונות ולא במחקר השוואתי כמותי. הראיונות משקפים בראש ובראשונה את נקודת מבטם של אנשי השדה, ואינם כוללים תצפיות בכיתות, מדידת הישגי תלמידים או בחינה כמותית של השפעת התוכניות. עם זאת, בחירת מרואיינים ממגוון רחב של תוכניות ומסגרות אפשרה לזהות דפוסים משותפים לצד הבדלים בין מודלים פדגוגיים שונים. הממצאים מצביעים על דפוסים ומנגנוני החלטה חוזרים, אך אין להסיק מהם התפלגות סטטיסטית של תופעה במערכת החינוך כולה.

3. מסגרת מושגית: התאמה בין תוכנית, מורים ומערכת

אחת התובנות המרכזיות העולות מהמחקר היא שהצלחתה של תוכנית להוראת בינה מלאכותית אינה נקבעת על ידי איכות התכנים הנלמדים בלבד, ואף לא על ידי איכות המורים או מודל ההוראה בנפרד. תחת זאת, הצלחת ההטמעה תלויה בהתאמה בין שלושה ממדים הפועלים במקביל ומשפיעים זה על זה: תוכנית הלימודים (רכיבי הידע, הרצף ורמת ההעמקה), כוח ההוראה (הכשרה, ביטחון מקצועי וקהילות תמיכה), והמערכת הארגונית (מודל ההוראה, הזמן העומד לרשות התוכנית ותמיכת ההנהלה).

התובנה המרכזית של מסגרת זו היא ששינוי באחד הממדים מחייב כמעט תמיד התאמה בשני הממדים האחרים: הרחבת תוכן מחייבת הכשרה שונה של מורים; שינוי במודל ההוראה משנה את סוג חומרי הלימוד הנדרשים; ופיתוח יכולת מערכתית מאפשר בהדרגה להעמיק את התכנים ולהפחית את התלות בגורמים חיצוניים. בכך נבדלת הוראת הבינה המלאכותית מתחומי דעת

ותיקים יותר, שבהם ניתן לעיתים לפתח תוכנית לימודים ורק לאחר מכן להכשיר מורים ליישומה – בעוד שבתחום הבינה המלאכותית שלושת התהליכים מתפתחים במקביל.

מסגרת זו משמשת גם כמבנה הדוח: חלק א׳ עוסק בתוכנית הלימודים – רכיבי הידע, הרצף ורמת ההעמקה; חלק ב׳ עוסק בכוח ההוראה ובתנאים המערכתיים שבהם הוא פועל.

חלק א׳

רכיבי הידע הנדרשים בלימודי בינה מלאכותית

מהו הידע הנדרש, ומהי רמת הלימוד הישימה בכל שכבת גיל?

4. מפת התחום: למי, לשם מה ובאיזה עומק

אין בישראל כיום הגדרה אחידה למושג "לימודי בינה מלאכותית". שני תלמידים יכולים לומר ש"למדו AI" ולרכוש בפועל ידע שונה לחלוטין. כדי לארגן את השונות בין התוכניות, פרק זה מתאר אותן לאורך שלוש שאלות: למי מיועדת הלמידה, לשם מה – כלומר מהי מטרתה, ובאיזה עומק היא מתבצעת.

למי: אוריינות, אוריינות מדעית-טכנולוגית והתמחות

אף שהמחקר מתמקד בתוכניות "העומק" ללימוד בינה מלאכותית (בשונה מתוכניות אוריינות שמיועדות לכל התלמידים באופן גורף), מן הראיונות עלה כי גם בקרב העוסקים בתוכניות אלה, הגבול בין הוראת AI כתחום התמחות לבין הקניית אוריינות AI אינו תמיד חד. התייחסות המרואיינים לשני הרבדים הייתה לעיתים משולבת, והמחישה כי בשדה החינוכי מתקיים עדיין בלבול מושגי בין חשיפה ושימוש מושכל בכלים לבין לימוד דיסציפלינרי מעמיק של התחום.

המתח בין "תפיסה ממוקדת אוריינות" לבין "תפיסה ממוקדת העמקה" אינו מבטא בהכרח סתירה. הוא מחדד את הצורך ברצף לימודים מדורג. עם זאת, רצף זה אינו דו-שכבתי בלבד. בין האוריינות הכללית לבין ההתמחות קיימת לעמדתנו שכבת ביניים נוספת: שימוש מושכל ב AI-ככלי עבודה בתוך דיסציפלינה מדעית או טכנולוגית.



שכבת **האוריינות לכלל התלמידים** – שימוש ביקורתי ואחראי בכלים לצד הבנה בסיסית של אופן פעולתם – חורגת ממוקד המחקר ומוצגת כאן כהקשר בלבד. שכבת **האוריינות המדעית-טכנולוגית** מתאימה כבסיס לתלמידי המדעים: שימוש מושכל בכלי AI ייעודיים לתכנות, לחקר מדעי ולעבודה הנדסית, כאשר ה-AI הוא כלי עבודה בתוך הדיסציפלינה ולא אובייקט הלמידה עצמו. שכבת **ההתמחות** מקנה לתלמידים במסלולי עומק הבנה מעמיקה של המנגנון, המהווה בסיס לפיתוח AI; היא נשענת על ממצאים ממסלולי הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה וממסלולי מדע חישובי מתקדמים.

לשם מה: הגישות השונות ללימוד AI

בתוך השכבות, התוכניות נבדלות זו מזו במטרת הלמידה. ההבדלים ביניהן אינם רק כמותיים; הם משקפים יעדים חינוכיים שונים – מהי היכולת שהתלמיד אמור לרכוש בסיום התוכנית. טבלה 1 מציגה את הגישות שזוהו וממקמת כל אחת מהן ברצף השכבות.

טבלה 1: גישות ללימוד בינה מלאכותית ומיקומן ברצף השכבות

גישה	מטרת הלמידה	שכבה	שכבת גיל טיפוסית
אוריינות AI	הבנת הסביבה הטכנולוגית ושימוש ביקורתי ואחראי	אוריינות לכלל התלמידים	חטיבת ביניים
מבוא מושגי־יישומי	הבנת נתונים, מודל, אבסטרקציה, סיווג ואימון מודלים, לעיתים עם Python בסיסי	שלב מעבר – שער לאוריינות המדעית-טכנולוגית ולהתמחות	כיתה ט׳ / תחילת תיכון
ניתוח נתונים (Data Analysis)	הפקת תובנות מנתונים; AI משמש ככלי עבודה של אנליסט ולא כאובייקט לבנייה	אוריינות מדעית-טכנולוגית	תיכון, מגמת בחירה
מדע חישובי	שילוב מדע, מתמטיקה, תכנות ומידול לפתרון בעיות מדעיות, כאשר AI הוא חלק ממערך רחב יותר	אוריינות מדעית-טכנולוגית, ובמסלולים המתקדמים גם התמחות	תיכון, 5 יח״ל, רב־שנתי
למידת מכונה ולמידה עמוקה	בניית מודלים, עבודה עם נתונים, אימון, רשתות נוירונים והבנת מנגנוני הלמידה	התמחות	תיכון, מסלולי בחירה/עומק

באיזה עומק: מאוריינות ועד עומק מתמטי-חישובי

ההבדל בין חטיבת הביניים לתיכון אינו רק "יותר או פחות חומר". העומק משתנה בהדרגה – מאוריינות, דרך מבוא מושגי-יישומי והתמחות טכנולוגית, ועד עומק מתמטי-חישובי – וכל רמה מגדירה יעד למידה שונה. טבלה 2 מפרטת את המעבר בין הרמות על פני שנים-עשר ממדים.

טבלה 2: רמות העומק על פני 12 ממדים

ממד	רמה 1 – אוריינות (כיתה ח׳)	רמה 2 – מבוא (כיתה ט׳)	רמה 3 – התמחות (תיכון)	רמה 4 – עומק (תיכון/מצוינות)
מטרת־על	הבנה ושימוש ביקורתי	הבנה + התנסות בבנייה	הבנת מנגנון + בנייה	הבנת מנגנון + הוכחה מתמטית
נתונים	הבנה אינטואיטיבית (הטיה, איכות קלט)	עבודה מודרכת עם נתונים	איסוף, תיוג וניתוח נתונים	בניית מאגר, טיוב ועיבוד מלא
מודלים	הבנה מושגית ("קופסה שחורה")	אימון מודל בכלים מוכנים (Teachable Machine)	בניית מודל ובחינת ביצועים	בניית מודל מאפס, אופטימיזציה
תכנות	אינו נדרש	Python בסיסי	Python ברמה טובה	Python + מתמטיקה חישובית מלאה
סטטיסטיקה	אינה נדרשת	חשיפה חלקית (אחוזים, גרפים)	סטטיסטיקה תיאורית/היסקית	סטטיסטיקה מתקדמת, בדיקת השערות
מתמטיקה	אינה נדרשת	מוגבלת מאוד	נגזרות, הסתברות בסיסית	אלגברה ליניארית, גרדיאנט, חדו״א
סיווג	התנסות והבנה עקרונית	מימוש בסיסי (Classification)	מימוש והערכת ביצועים	בנייה, הערכה ואופטימיזציה
רשתות נוירונים	אינן נלמדות	חשיפה אפשרית בלבד	היכרות והתנסות מודרכת	בנייה, Backpropagation, CNN
פרויקט	אמצעי להמחשה	פרויקט מובנה ומודרך	פרויקט יישומי מלא	פרויקט מחקרי/הנדסי עצמאי
אתיקה	ליבה לכלל התלמידים	משולבת בתוכן	נדונה לצד היבטים טכניים	נדונה כחלק ממחקר/הנדסה
דרישות קדם	כמעט ואינן	מעטות (אוריינות דיגיטלית)	תכנות ומתמטיקה בסיסית	תכנות, מתמטיקה וסטטיסטיקה נבנים מראש
אוכלוסיית יעד	כלל התלמידים	כלל התלמידים / מכינה	בחירה / מגמה	מיון, מצוינות

מן הראיונות עולה כי הגיל לבדו אינו קובע את העומק. משך התוכנית (חד-שנתית מול תלת-שנתית), מספר שעות ההוראה, הידע הקודם של התלמידים ורמת המיון או הבחירה משמעותיים לא פחות. כאשר תשתית של Python, מתמטיקה, אנליזה נומרית וסטטיסטיקה נבנית בהדרגה על פני שלוש שנים, ניתן להגיע בהמשך לניתוחי רגרסיה, רשתות נוירונים ו-CNN – מבלי שזמן הוראת ה-AI עצמו יוקדש להשלמת דרישות הקדם.

5. רכיבי הידע: מה נלמד ובאיזה עומק

מתחת לשונות בין התוכניות ניתן לזהות ליבה מושגית חוזרת: נתונים ← מודל ← תהליך אימון/עיבוד ← תוצאה ← בחינה ביקורתית של התוצאה. ליבה זו מופיעה בכל הגישות, אך ברמת עומק שונה מאוד. הנתונים, למשל, משמשים בחטיבת הביניים להמחשת עיקרון בסיסי ("קלט גרוע מייצר פלט גרוע"); במגמת מדעי הנתונים הם לב המקצוע עצמו; ובתוכניות הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה מדובר בתהליך מקצועי מלא של בניית מאגר, טיוב והכנת נתונים לאימון Deep Learning.

סביב ליבה זו חוזרות ברוב התוכניות אבני יסוד של ידע, כל אחת ברמת עומק שונה:



התכנות נתפס כתשתית ללמידה ולהתנסות, אך רמת השליטה הנדרשת בו משתנה מאוד בין תוכניות. נתונים, סטטיסטיקה והסתברות מהווים בסיס להבנת האופן שבו מערכות AI לומדות ולהבנת מגבלותיהן, ולמידת מכונה נתפסת כנקודת המעבר בין מדעי המחשב המסורתיים לעולם הבינה המלאכותית. למידה עמוקה ורשתות נוירונים נלמדות בעיקר במסלולי העמקה, תוך דגש על הבנה אינטואיטיבית יותר מאשר פורמלית-מתמטית, ואילו בינה מלאכותית יוצרת נלמדת בדגש על שימוש מושכל בכלים, כתיבת פרומפטים, הערכת תוצרים וחשיבה ביקורתית. אתיקה, הטיות וחשיבה ביקורתית חוצות את כל אבני היסוד ונדרשות בכל רמות ההוראה.

בבחירת רכיב ידע, השאלה הרלוונטית אינה רק אם הוא "חשוב בעולם ה-AI", אלא איזו יכולת חינוכית הוא אמור לבנות אצל התלמיד בשלב שבו הוא נלמד. טבלה 3 מרכזת, לפי אבני היסוד, את התפקיד שממלא כל רכיב ידע מרכזי ואת האופן שבו העומק הנדרש ממנו משתנה בין רמת הבסיס לרמת ההתמחות, כפי שעלה מהמורים ומהמדריכים.

טבלה 3: רכיבי הידע לפי אבני היסוד – תפקידם החינוכי ועומקם

אבן יסוד	רכיב ידע	מה הוא נועד לאפשר לתלמיד	ברמת בסיס (אוריינות/מבוא)	ברמת עומק (התמחות)
תכנות וחשיבה חישובית	**Python**	לעבור משימוש להפעלה ובנייה	אינו הכרחי לכל תלמיד	כלי מרכזי במסלול יישומי/עומק
	אבסטרקציה	להבין את המעבר ממציאות מורכבת לייצוג פשוט	מושג בסיסי דרך התנסות	מידול חישובי פורמלי

אבן יסוד	רכיב ידע	מה הוא נועד לאפשר לתלמיד	ברמת בסיס (אוריינות/מבוא)	ברמת עומק (התמחות)
נתונים, סטטיסטיקה והסתברות	**נתונים**	להבין ממה AI "לומד"	מקור לדוגמאות ולאימון	איסוף, עיבוד, ניתוח והכנת נתונים
	סטטיסטיקה	להבין שונות, מדגם ואי-ודאות	אינטואיציה בסיסית (אחוזים, גרפים)	ניתוח והערכת מודלים, בדיקת השערות
	הסתברות	להבין אי-ודאות בתהליכי חיזוי	חשיפה בלבד	בסיס פורמלי למודלים הסתברותיים
למידת מכונה	**מודל**	להבין ש-AI מייצג דפוסים ולא "יודע"	הבנה מושגית ("קופסה שחורה")	הבנה אלגוריתמית ומתמטית
	סיווג (Classificatio n)	להבין כיצד מערכת לומדת להבחין בין קטגוריות	התנסות מודרכת (Teachable Machine)	מימוש והערכת אלגוריתם
	למידה מונחית	להבין למידה מדוגמאות מסומנות	המחשה כללית	מימוש וניתוח (רגרסיה, סיווג)
	למידה לא-מונחית	להבין גילוי מבנים ודפוסים בנתונים	חשיפה אפשרית	Clustering, K-means, DBSCAN
	למידת חיזוק	להבין למידה מתוך פעולה ומשוב	חשיפה/התנסות קצרה	העמקה אלגוריתמית (Monte Carlo וכו׳)
למידה עמוקה ורשתות נוירונים	**אלגברה ליניארית**	להבין ייצוגים וחישובים בתוך מודלים	אינה חלק מליבת האוריינות	תשתית הכרחית למסלולי עומק
	רשתות נוירונים	להבין ארכיטקטורת למידה מתקדמת	המחשה כללית בלבד	בנייה, אימון וניתוח (CNN, Backpropagation)
אתיקה, הטיות וחשיבה ביקורתית	**הטיות**	להבין שנתונים ומודלים אינם ניטרליים	אוריינות ביקורתית בסיסית	ניתוח כמותי של השפעת הנתונים על המודל
	אתיקה	להבין אחריות, הטיה והשלכות חברתיות	רכיב ליבה לכלל התלמידים	ניתוח דילמות מורכבות ורב־ממדיות

שתי תובנות חוצות טבלה זו ראויות להדגשה. ראשית, רכיבים הנתפסים כ"בסיסיים" (אבסטרקציה, אתיקה) אינם בהכרח קלים ללמידה: אצל מורה מהמכינה לבינה מלאכותית (כרמיאל/כפר סמיע) דווקא אבסטרקציה התבררה כקשה מאוד לתלמידי כיתה ט׳, ואצל מורה מתוכנית אדם, בינה ומכונה (נוף הגליל, כיתות ח׳–ט׳) אתיקה ברמת ניתוח רב-ממדי (ולא ברמת חשיפה) התגלתה כדורשת רקע ומיומנות גבוהים. שנית, "אוריינות נתונים" – ההבנה שבחירת הנתונים היא החלטה אנושית בעלת השלכות – חוזרת כרכיב ליבה בכל הרמות, מכיתה ח׳ ועד לתלמידים מצטיינים במדע חישובי, המתקשים גם הם לעיתים לקרוא גרף באופן אובייקטיבי.

6. בחירת רכיבי הידע: שיקולים, ויתורים ואילוצי זמן

נקודת המוצא של המחקר הייתה שייתכן פער בין תוכנית הלימודים כפי שנקבעה מראש לבין המפגש של אנשי השדה עם התלמידים, ושקיים צורך מעשי לבחור רכיבי ידע מסוימים על פני אחרים. הראיונות ביקשו לברר אילו רכיבי ידע חשובים לעמדת המורים והמדריכים, ועל מה ניתן היה – או צריך היה – לוותר. עלה כי הבחירה אינה נשענת על תפיסה אחידה של "מה חשוב לדעת ב-AI", אלא על מטרת התוכנית, על מאפייני התלמידים ודרישות הקדם שלהם, על תפיסתו הפדגוגית ומומחיותו של המורה (ראו פרק 11), ועל האילוצים המערכתיים שבהם התוכנית פועלת. הבחירות משקפות אפוא לא רק מגבלות זמן, אלא גם תפיסות שונות של מטרות ההכשרה.

עומק מול רוחב. ציר מרכזי שחזר אצל מרואיינים הוא הבחירה בין חשיפה למגוון רחב של נושאים לבין העמקה במספר מצומצם של רעיונות. מורה בתיכון בתוכנית המכינה לבינה מלאכותית של מכון ויצמן, מגשימים וגוגל (יוצג מעתה: "המכינה לבינה מלאכותית") בחר במפורש שלא ללמד LLM ולמידת חיזוק כדי להתמקד בתהליך מלא של סיווג וזיהוי תמונות; מורה למדע חישובי (יאס״א ירושלים, תיכון) מתארת זאת כ"כלכלת זמן" – לא חוסר יכולת של תלמידים מצטיינים, אלא עושר הנושאים האפשריים במדע חישובי; ומורה למדע חישובי מרקע פיזיקלי (יאס״א ירושלים, תיכון) ויתר במודע על אוטומטים תאיים לטובת סטטיסטיקה. לעומתם, מורה בתוכנית הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה (הריאלי חיפה, תיכון) הציגה גישה אחרת: לא לוותר על נושאים מורכבים, אלא לפשט את דרך ההוראה – ללמד הכול, אך ברמה "שטחית" יותר.

התאמה לאוכלוסיית התלמידים. מורים מתוכניות המיועדות לאוכלוסיות שונות הציגו מערכי שיקולים שונים. בחטיבת הביניים בלטה הגישה שלפיה מתמטיקה ברמה גבוהה אינה תנאי סף: מורה מתוכנית ניצנים של בינה (רמת גן, כיתה ח׳) הציגה החלטה מודעת שלא לבנות את התוכנית על מתמטיקה וסטטיסטיקה, כדי לאפשר גם לתלמידים שאינם חזקים במתמטיקה להשתלב בה; ומורה מתוכנית אדם, בינה ומכונה (נוף הגליל, כיתות ח׳–ט׳), המלמדת כיתה הטרוגנית רגילה ולא קבוצת מצטיינים, ויתרה על חישובים סטטיסטיים מסיבה דומה. לעומתן, מורה בתוכנית הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה של שי פרח ומכון ויצמן, המיועדת למצטיינים (פ״ת, תיכון), הדגיש שהתוכנית דורשת מתמטיקה ברמה גבוהה – "לא כל תלמיד יכול להתמודד עם Backpropagation באותה רמה". ההבדל אינו מחלוקת על חשיבות המתמטיקה, אלא שיקוף של מטרות תוכנית ואוכלוסיות יעד שונות (להרחבה ראו פרק 7).

אילוצים מערכתיים. אצל מורה מהמכינה לבינה מלאכותית (כפר סמיע, כיתה ט׳) נראית בבירור השפעת המציאות המערכתית על הסילבוס: מספר השעות לא תאם את היקף התוכנית, שנת הלימודים הושפעה מהמלחמה, נדרש להשלים פערי Python, ובשלב מסוים הוחלט לעבור לפרויקט ולדלג על נושאים רבים. בתוכנית אדם, בינה ומכונה (נוף הגליל, כיתות ח׳–ט׳) התוכנית משולבת בשעות מדע וטכנולוגיה, ולכן כל הרחבה של תכני AI מתחרה בפועל בתכנים אחרים. בחירת רכיבי הידע אינה אפוא החלטה פדגוגית "נקייה" – היא מתרחשת בתוך מערכת שעות, דרישות בגרות, אירועים חיצוניים ותשתיות טכנולוגיות נתונות.

טבלה 4 מרכזת, לפי תוכנית, את רכיבי הידע המרכזיים, את מה שצומצם או לא נלמד ואת הנימוק שניתן לכך. כל שורה מבוססת על דברי מורה או מדריך שהתראיין במחקר, ומוצגת ללא ציון שם.

טבלה 4: מדוע רכיבי ידע צומצמו או לא נלמדו – לפי תוכנית ושכבת גיל

תוכנית / מסגרת	שכבת גיל	רכיבי ידע מרכזיים	מה צומצם / לא נלמד	הסיבה
ניצנים של בינה	ח׳	אוריינות AI, Gen AI, מערכות המלצה, מנועי חיפוש, אימון מודלים, Teachable Machine, אתיקה, חשיבה ביקורתית	חלק מהנושאים הועברו לסוף השנה, האתיקה הוקדמה להתחלה.	שנת לימודים אפקטיבית קצרה וסוף שנה מקוטע

תוכנית / מסגרת	שכבת גיל	רכיבי ידע מרכזיים	מה צומצם / לא נלמד	הסיבה
המכינה לבינה מלאכותית (ויצמן מגשימים וגוגל)	ט'	מבוא, נתונים/Python, מודל ואבסטרקציה, סיווג והטיות, GenAI, למידת חיזוק, מודלי שפה, מרקוב, RL, מערכות המלצה, אתיקה, פרויקט.	חלק מהעמקת Python ומבני נתונים וחלק מהיחידות המתקדמות לא הושלמו	שעות לא מספיקות, מלחמה והנחיית הפיקוח לעבור לפרויקט. Python צרך זמן רב מדי ומנע הגעה לתכני AI
אדם, בינה ומכונה	חט״ב	מודל, אבסטרקציה, חקר, אתיקה, AI, סטטיסטיקה וחישובים	סטטיסטיקה, חישובים, פעילות מכונית אוטונומית, העמקה באתיקה	חוסר זמן
מגשימים AI	י׳–י״ב	סטטיסטיקה, הסתברות, מתמטיקה, תכנות, ML, DL, NLP	לא נמצא ממצא חד של יחידה שנשמטה	פריסה תלת־שנתית ומסגרת ייעודית
הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה – שי פרח	תיכון	תכנות, מתמטיקה, ML/DL, פרויקטים	חלק מנושאי העמקה	צורך להספיק באותה שנה גם תיאוריה וגם פרויקט
מדע חישובי – מכון דוידסון (BioCode)	תיכון	ביולוגיה חישובית, נתונים, Python, סימולציות, חיזוי, AI/LLM	העמקה במנגנונים נדחית לשלבים מאוחרים	גישה ספירלית: התנסות והבנה עקרונית לפני עומק
מדע חישובי – מכון דוידסון (אסטרופיזיקה חישובית)	תיכון רב־שנתי	Python, מתמטיקה, אנליזה נומרית, ML, NN, CNN	לא נמצא ממצא חד של יחידה שנשמטה	דרישות הקדם נבנות מראש לאורך כמה שנים
מדע חישובי – יאס״א	תיכון	אלגברה ליניארית, אופטימיזציה, ML, Clustering, NN, סטטיסטיקה, מודלים.	לא כל מה שתוכנן תמיד הושלם	כלכלת זמן; שנה משובשת; העדפת עומק על רוחב
הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה – משרד החינוך	תיכון	דאטה, מתמטיקה, מודלים, ML/DL, פרויקטים	האתגר שהוצג אינו רק הספק אלא התאמת רמה	פישוט דרך ההוראה במקום ויתור על המושג

דפוס אי-ההספק

לאורך הראיונות שבה וחזרה הטענה כי היה קושי להספיק את חומר הלימוד במסגרת הזמן הנתונה. עם זאת, התברר כי טענה זו אינה מתפזרת באופן אחיד על פני הגילאים ורמות העומק, והיא בהחלט אינה מרוכזת דווקא ב"קצה המורכב" (מסלולי העומק בתיכון). הדפוס שעולה מן הנתונים הוא כמעט הפוך מהאינטואיציה המקובלת:

- בקצה הקל - מבוא AI לכיתה ח׳ (מורה מתוכנית ניצנים של בינה, רמת גן): כמעט אין דיווח על אובדן תוכן. הסיבה: התוכנית נבנתה מראש ללא תלות במתמטיקה או בתכנות, כך שאין "תשתית" שעלולה לצרוך זמן על חשבון תוכן AI. הלחץ היחיד שעלה הוא לוגיסטי (סוף שנה מקוטע בשל המצב הביטחוני).

- בנקודת הלחץ המרבית — המכינה לבינה מלאכותית: כאן מצטברים בו-זמנית סילבוס AI רחב, הצורך ללמד Python כתשתית באותה שנה, ולעיתים גם שיבוש חיצוני (מלחמה, פערי מורה). זהו הריכוז החד ביותר של "אי-הספק" אמיתי במדגם - לא בגלל שהתוכן קשה מדי לגיל, אלא בגלל צפיפות הזמן, וטענה חוזרת של המורים שניתן יותר מדי דגש ללימוד Python.
- בקצה העמוק – מסלולי עומק רב-שנתיים בתיכון, הראיונות מספקים עדות מועטה בלבד לוויתור כפוי מתוך אי-הספק, אף שגם בהם עולה מחסור בזמן – מורה במדע חישובי (יאס״א) מתאר "כלכלת זמן" ומציין שלא כל מה שתוכנן הושלם, ובתוכנית הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה – שי פרח ומכון ויצמן נדרש להספיק באותה שנה גם תיאוריה וגם פרויקט בגרות. מה שאינו נלמד מוצג בדרך כלל כבחירה פדגוגית מודעת כהתאמה ליכולת המצויה בכיתה. ההסבר: פריסה על פני שלוש שנים מאפשרת לבנות את דרישות הקדם (Python, מתמטיקה) בהדרגה, כך שזמן הוראת ה-AI עצמו אינו נדרש לשמש גם להשלמות.

שורש מבני: הוספה ללא פינוי מקום. צפיפות הזמן אינה רק תוצאה של הצורך לבנות תשתית (כגון Python) לצד לימודי ה-AI; לעיתים קרובות היא נובעת מן האופן שבו תכני ה-AI נכנסים למערכת – כתוספת לתוכנית קיימת ומלאה, מבלי שהוחלט מה מפנה להם מקום. הדבר בולט במיוחד בתוכניות המשולבות בתוך מקצוע קיים.

בחירה מודעת ואי-הספק: שני ביטויים של אותו אילוץ. לאור זאת, ההבחנה בין "בחירה פדגוגית מודעת" במסלולי העומק לבין "אי-הספק" בתוכניות המבוא אינה מתארת שתי תופעות נפרדות, אלא שני ביטויים של אותו אילוץ זמן. גם במסלולי העומק הזמן אינו מספיק לכל מה שניתן היה ללמד; ההבדל הוא בנקודה שבה האילוץ פוגש את התוכנית ובמרחב שיש לה להתמודד איתו. מסלול רב-שנתי, בעל שעות ייעודיות ודרישות קדם הנבנות מראש, מאפשר לקבוע את הוויתורים בשלב התכנון ולנסח אותם כהחלטה פדגוגית (למשל העדפת עומק על רוחב). תוכנית מבוא חד-שנתית, הנשענת על שעות משותפות ועל תלמידים ללא תשתית, פוגשת את אותו אילוץ במהלך השנה, והוויתור נעשה באופן כפוי ובלתי מתוכנן – לרוב על היחידות המאוחרות. יש לסייג כי ההבחנה נשענת על דיווחי המורים עצמם, וייתכן שחלק מן הוויתורים המוצגים בדיעבד כבחירה מודעת מבטאים גם הסתגלות לאילוץ. המשמעות המעשית היא שהשאלה המרכזית אינה אם יהיו ויתורים, אלא אם הם יתוכננו מראש: הוספת תכני AI לתוכנית קיימת צריכה להיות מלווה בהחלטה מפורשת מה יצומצם כדי לפנות להם מקום, או בהקצאת שעות ייעודיות.

7. מחלוקת מקצועית על מקומה של המתמטיקה הפורמלית בהוראת AI

מן הראיונות עולה מחלוקת מקצועית בשאלה מהי רמת ההבנה המתמטית הנדרשת לצורך לימוד מעמיק של בינה מלאכותית. המחלוקת אינה נוגעת רק להיקף החומר שניתן להספיק או לצורך להתאים את ההוראה למגבלות הזמן, אלא לשאלה מהותית יותר: האם שליטה במתמטיקה הפורמלית היא תנאי להבנת מנגנוני הפעולה של מערכות AI, או שניתן לפתח הבנה עמוקה של המנגנון גם ללא עיסוק מלא בנוסחאות ובפיתוחים המתמטיים.

שלושה מקרים ממחישים עמדות שונות בשאלה זו:

טבלה 5: מקומה של המתמטיקה הפורמלית — שלוש עמדות מקצועיות

מרואיין	עמדה ביחס למתמטיקה פורמלית	דוגמה מתוך הראיון
מורה בתוכנית הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה של שי פרח ומכון ויצמן (פ״ת, תיכון)	המתמטיקה הגבוהה היא חלק אינטגרלי והכרחי מהבנת החומר; אין לצמצמה	Forward/Backpropagation וטרנספורמציות ליניאריות אינם "תוספת" אלא עצם התוכן

מרואיין	עמדה ביחס למתמטיקה פורמלית	דוגמה מתוך הראיון
מורה למדע חישובי מרקע פיזיקלי (יאס״א ירושלים, תיכון)	רקע מתמטי רחב הוא ערך העומד בפני עצמו בהכשרת מדענים עתידיים – לא משום שבלעדיו אי אפשר לעבוד עם AI, אלא משום שהבנה מעמיקה של המתמטיקה תהפוך את התלמידים למדענים ולמפתחים טובים יותר, גם בתחומים שאינם AI; לכן יש לתעדף אותו על פני נושאים אחרים	סטטיסטיקה ואלגברה ליניארית קודמות לאוטומטים תאיים בסדר העדיפויות
מורה בתוכנית הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה של משרד החינוך (חיפה, תיכון)	ניתן לשמר הבנה עמוקה תוך צמצום מכוון של הנוסחאות הפורמליות עצמן	"להבין איך המנגנון פועל" אינו זהה ל"לדעת לגזור את הנוסחה"

שלושת המרואיינים מלמדים תלמידי תיכון במסלולי בחירה או מצוינות. לכן, ההבדלים ביניהם אינם מוסברים בעיקרם על ידי גיל התלמידים או על ידי הבחנה בין תוכניות בסיס לתוכניות מתקדמות. הם משקפים תפיסות מקצועיות שונות באשר לסוג הידע שמרכיב הבנה עמוקה של AI.

עיון מקרוב בשלוש העמדות מלמד כי הן נבדלות זו מזו לאורך שני צירים נפרדים ולא לאורך ציר אחד. להלן יכונו העמדות לפי סדר הופעתן בטבלה: עמדה 1 (הנדסת תוכנה – שי פרח ומכון ויצמן, פ״ת), עמדה 2 (מדע חישובי, יאס״א) ועמדה 3 (הנדסת תוכנה – משרד החינוך, חיפה).

ציר א׳ – שליטה בפורמליזם לעומת הבנה מושגית. עד כמה חשוב שהתלמידים ישלטו בפורמליזם המתמטי שביסוד הנושאים הנלמדים, לעומת הבנה קונספטואלית של המושגים ויכולת להשתמש בכלים? התשובה נעה תמיד על רצף. דיון דומה מתקיים זה עשרות שנים סביב הוראת החדו״א: אפשר ללמד את ההגדרה הפורמלית של הנגזרת – וכדי לעשות זאת, את ההגדרה הפורמלית של הגבול וכו' – או להסתפק בללמד כיצד גוזרים פונקציות אלמנטריות וכיצד משתמשים בנגזרת כדי למצוא נקודות קיצון. על ציר זה עמדות 1 ו-2 קרובות זו לזו: שתיהן רואות ערך בהבנה מעמיקה של המושגים הבסיסיים, מעבר לשליטה בשימושיהם (לא רק לדעת לגזור, אלא גם להבין, למשל, מדוע יש פונקציות שאין להן נגזרת). לעומתן, עמדה 3 מעדיפה הבנה קונספטואלית של המושגים ושליטה שימושית בהם.

ציר ב׳ – מתמטיקה כתשתית כללית לעומת מתמטיקה מכוונת-AI. על ציר זה נבדלות עמדות 1 ו-2. ההבדל אינו נוגע בעיקרו לנושאים עצמם, שכן שתי העמדות עוסקות במידה רבה באותם תחומים – אלא למטרה שלשמה הם נלמדים ולשימושים שאליהם הם מכוונים. עמדה 1 מלמדת את התשתית המתמטית כשהיא מכוונת מראש אל פיתוח AI: היא בוחרת בתוך כל תחום את הרכיבים שעליהם נשען הפיתוח ומובילה אותם עד לשימושים המתקדמים ביותר, כגון Backpropagation, נושא שסטודנט למתמטיקה עשוי לסיים תואר ראשון מבלי להכירו. מבחינתה, השליטה במתמטיקה זו, על כל שלביה, מהותית להבנת ה-AI. עמדה 2 רואה ברקע מתמטי רחב ערך העומד בפני עצמו בהכשרת מדענים: לא משום שבלעדיו אי אפשר לעבוד עם AI, אלא משום שתלמידים שיבינו לעומק את המתמטיקה יהיו ברבות הימים מפתחים ומדענים טובים יותר, גם בתחומים שאינם AI. ההבדל במטרה מתבטא בנושאים רק בשוליים – באילו רכיבים בוחרים בתוך כל תחום, באיזה סדר ולאן מובילים אותם – ולא ברשימת הנושאים עצמה.

בפועל, כל אחת משלוש העמדות תופסת מקום מסוים על כל אחד משני הרצפים. מכאן שהשאלה אינה רק ״כמה מתמטיקה ניתן ללמד״, אלא ״איזו הבנה מבקשת התוכנית להקנות״ ו״לשם מה״. התשובה תלויה במטרות המסלול, בתפיסת העומק שעליה הוא מבוסס ובסוג היכולות שהוא מבקש לפתח בקרב התלמידים.

השלכות לבסיס המתמטי של מסלול עומק לאומי. הממצאים מצביעים על מבנה מדורג. כרצפה משותפת למסלול ההתמחות: הבנה מנגנונית של המושגים המתמטיים שביסוד למידת מכונה, ברמה המקבילה לרמה 3 בטבלה 2 (נגזרות, הסתברות בסיסית, סטטיסטיקה תיאורית והיסקית), תוך צמצום מכוון של הפורמליזם במקום שבו אינו תורם להבנת המנגנון. מעליה: רובד מתקדם של אלגברה ליניארית, חדו״א רב-מימדית, וסטטיסטיקה ברמה פורמלית יותר (רמה 4), הנשען על לימודי מתמטיקה ברמת 5 יח״ל ומיועד למסלולים השואפים לעומק מתמטי-חישובי מלא. כפי שעולה מפרק 6, פריסה רב-שנתית מאפשרת לבנות דרישות קדם אלה בהדרגה, מבלי שזמן הוראת ה-AI עצמו יוקדש להשלמות. ההכרעה על ציר ב׳ – האם מסלול העומק נועד בראש ובראשונה להכשיר מפתחי AI, או להכשיר מדענים ומתמטיקאים שה-AI הוא אחד מתחומי עיסוקם – אינה שאלה אמפירית אלא הכרעה ערכית-אסטרטגית.

8. חשיבה ביקורתית, אתיקה ומניעת האנשה - רכיב רוחבי

לצד השאלות ברכיבי הידע הטכניים, עלה מן הראיונות יעד תוכני ופדגוגי המשותף כמעט לכל התוכניות שנבחנו, ללא תלות ברמת ההעמקה הטכנית שלהן: שימוש מושכל בכלים, חשיבה ביקורתית ואתיקה. מן הראיונות עולה קונצנזוס רחב יחסית כי אחד היעדים המרכזיים של הוראת AI אינו ללמד את התלמידים רק כיצד להשתמש בכלים, אלא בעיקר כיצד להבין את מגבלותיהם, להעריך את אמינותם ולפתח עמדה ביקורתית כלפיהם.

אמון עיוור וסכנת ההאנשה של מערכות AI

הממצא הבולט ביותר בתמה זו הוא החשש מפני אמון עיוור שמגלים תלמידים כלפי מערכות בינה מלאכותית: תלמידים נוטים להתייחס לפלט של המערכת כאל אמת מוחלטת, מבלי לבדוק, להצליב מידע או להפעיל שיקול דעת עצמאי.

> *"תלמידים נוטים לסמוך על הפלט של הצ'אט בצורה עיוורת."*
>
> **— מורה במכינה לבינה מלאכותית**
>
> *"אם תלמיד יקבל כל תשובה של הצ'אט כאמת מוחלטת, אז נכשלנו. המטרה היא שהוא כל הזמן ישאל את עצמו אם זה נכון, למה זה נכון, ואיך אני יודע שזה נכון."*
>
> **— מורה במגמת מידע ונתונים**

עמדה זו משקפת תפיסה חינוכית הרואה בספקנות מושכלת מיומנות יסוד בעידן הדיגיטלי - לא ספקנות לשם ספקנות, אלא יכולת להעריך מידע באופן ביקורתי, לבדוק מקורות, לזהות טעויות ולהבין שגם מערכת מתקדמת יכולה לטעות. לצד החשיבה הביקורתית, עסקו המרואיינים בהרחבה בהיבטים אתיים - הטיות בנתונים, אמינות מידע, פרטיות ודיפ-פייק - תוך קישור מפורש בין הוראת AI לחינוך אזרחי. מורה במכינה לבינה מלאכותית (כיתה ט', חולון) הראתה כיצד תלמידים לומדים שמערכת המאומנת על נתונים מוטים תפיק תוצאות מוטות.

הוראת האתיקה נתפסת בעלת פוטנציאל יישום גבוה כבר בחטיבת הביניים. בעוד שהוראת מתמטיקה מתקדמת, רשתות נוירונים או אלגוריתמים מורכבים עשויה להיות מוגבלת על ידי גילם של התלמידים, הדיון בפייק ניוז, בדיפ-פייק, באמינות מידע ובהטיות נתפס כרלוונטי לכל תלמיד כמעט. במובן זה, האתיקה מהווה גשר טבעי בין הוראת AI לבין תחומי דעת רחבים יותר של אזרחות, תקשורת וחשיבה ביקורתית. עם זאת, עלתה גם עמדה מסייגת: לא מספיק לדעת להשתמש במערכת או לנסח פרומפטים – ללא הבנה של הלוגיקה החישובית שמאחורי המערכת קשה לדבר על חשיבה ביקורתית אמיתית. גם כאשר קיימת הסכמה רחבה על חשיבות אוריינות ה-AI, קיימות אפוא מחלוקות לגבי משמעות המושג עצמו – שימוש מושכל וזיהוי הטיות מזה, לעומת הבנה חישובית של המנגנון מזה.

9. למידה מבוססת פרויקטים וחקר (PBL): בין אידיאל פדגוגי לאילוצי מערכת

שאלה נוספת שחזרה לאורך הראיונות נגעה לאופן שבו הלמידה מתרחשת בפועל בכיתה. מן הראיונות עולה הסכמה רחבה יחסית כי למידת AI אינה מתאימה למודל הוראה מסורתי המבוסס בעיקר על הרצאות ופתרון תרגילים; מרבית המרואיינים ראו בלמידה מבוססת פרויקטים (PBL) את המודל הפדגוגי המתאים ביותר להוראת התחום, בהיותו יישומי במהותו ודורש התנסות, עבודה עם נתונים והתמודדות עם בעיות פתוחות.

> *"זה הכול בא מהניסיון שלהם, מהחוויות שלהם."*
>
> **— מורה מתוכנית ניצנים של בינה (רמת גן, כיתה ח')**

עבודה על בעיות אמיתיות הגבירה באופן משמעותי את מעורבות התלמידים, ופרויקטי הסיום שימשו מרחב לפיתוח יצירתיות, סקרנות ויכולת להתמודד עם בעיות פתוחות שאינן בעלות פתרון אחד נכון:

> *"השמיים הם הגבול."*
>
> **— מוביל ארצי בתוכנית הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה (משרד החינוך), על פרויקטי הסיום**

עם זאת, לצד ההתלהבות הפדגוגית עלתה גם תמונה מורכבת יותר של קשיים ואילוצים. החסם המרכזי ביותר שעלה מן הראיונות הוא מגבלת הזמן. המערכת מפעילה לחץ מתמיד להספיק חומר, בעוד שפרויקט חקר איכותי דורש שבועות של עבודה, וכתוצאה מכך נאלצו המורים לעיתים לקצר תהליכים, לוותר על שלבים מסוימים או להסתפק בפתרונות חלקיים. חסם נוסף קשור למוכנות התלמידים: עבודה בפרויקט פתוח דורשת מיומנויות שאינן תמיד קיימות אצל הלומדים, במיוחד יכולת להתמודד עם תהליכים ארוכים של ניסוי וטעיה.

ממצא מעניין נוסף הוא שהבינה המלאכותית עצמה מעלה את רף הציפיות מן התלמידים:

> *"ככל שהבינה המלאכותית נכנסת, הדרישות לעבודות חקר עולות. יותר מאמרים לקרוא, יותר נתונים לנתח, יותר מקורות להשוות, כי אנחנו מניחים שהתלמידים נעזרים בבינה המלאכותית."*
>
> **— מורה במגמת מידע ונתונים (יגור, תיכון)**

ה-PBL אינו אפוא רק שיטת הוראה נוספת במסגרת הוראת הבינה המלאכותית, אלא ביטוי למתח רחב יותר בין פדגוגיה חדשנית לבין מערכת חינוך מסורתית: הצלחתו תלויה במידה רבה ביצירת תנאים מערכתיים שיאפשרו לו להתממש באופן מלא – ובראשם הקצאת זמן ייעודי במערכת השעות.

10. הקשר לתוכניות הלימודים הקיימות

10.1 חפיפות והתנגשויות עם מתמטיקה, פיזיקה ומדעי המחשב

הראיונות מצביעים על כך שהוראת AI אינה מתקיימת בחלל ריק. היא נשענת על מקצועות קיימים, אך גם חושפת פער בין הידע שהתלמידים רוכשים במקצועות הליבה לבין הידע הנדרש להבנת AI ברמה עמוקה.

<u>מתמטיקה</u>

החפיפה המרכזית היא עם:

- סטטיסטיקה והסתברות;
- פונקציות;
- נגזרות.

אולם במסלולים מתקדמים נדרשים גם:

- אלגברה ליניארית;
- טרנספורמציות ליניאריות;
- חשבון דיפרנציאלי רב-מימדי (בעיקר בשביל מושג הגרדיאנט);
- אופטימיזציה;
- מתמטיקה של רשתות.

מכאן שבמסלולי עומק, תוכנית המתמטיקה הרגילה אינה תמיד מספקת את כל הידע הנדרש ללימודי AI.

<u>מדעי המחשב</u>

קיימת חפיפה משמעותית ב:

- תכנות (בעיקר בשפות Python או Java);
- מבני נתונים;
- אלגוריתמיקה;
- חשיבה חישובית.

עם זאת, AI דורש מעבר מתכנות דטרמיניסטי קלאסי לעבודה עם:

- נתונים;
- אימון;
- אי־ודאות;
- ביצועי מודל;
- הטיות;
- למידה מתוך דוגמאות.

לכן ידע בתכנות הוא בסיס חשוב, אך אינו זהה לידע ב-ML.

<u>פיזיקה</u>

החיבור בולט במיוחד בתוכניות מדע חישובי של יאס״א ושל מכון דוידסון.

- מידול;
- אנליזה נומרית;
- מערכות דינמיות;
- פתרון בעיות;
- פרשנות של תוצאות.

במסלולים אלה AI משתלב בתוך מסורת רחבה יותר של שימוש במתמטיקה ובמחשב כדי להבין תופעות.

טבלה 6: דוגמאות קונקרטיות לנושאים שהיה צריך להשלים או לחזק

מרואיין / תוכנית	מה נדרש להשלים	מקור הפער
מורה במדע חישובי – מכון דוידסון (BioCode, תיכון)	כתיב מדעי, Excel, יצירת גרפים, אוריינות מחשב בסיסית	תשתית מתמטית/דיגיטלית בסיסית שלא הובאה מהחטיבה
מורה בתוכנית הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה של משרד החינוך (חיפה, תיכון)	אלגברה ליניארית, הסתברות, נגזרות, מושג הגרדיאנט	פער בין תוכנית מתמטיקה רגילה למתמטיקה הנדרשת ל-AI מתקדם
מורה במכינה לבינה מלאכותית (כפר סמיע)	פערי Python משנים קודמות	תוכנית מקדימה לא סיפקה תשתית תכנות מספקת
מורה במכינה לבינה מלאכותית (חולון)	סטטיסטיקה ואחוזים (לצורך הבנת שרשראות מרקוב)	תשתית מתמטית חסרה בכיתה ט׳
מורה במכינה לבינה מלאכותית (אשדוד)	חיבור טכני Python–API; ניהול API keys	פער בהכשרת המורה עצמה, לא רק בידע התלמידים
מורה במכינה לבינה מלאכותית (רמת גן)	אוריינות דיגיטלית בסיסית (ניהול קבצים, Drive-Colab)	הנחת יסוד שגויה ש"ילידים דיגיטליים" = בעלי אוריינות מחשב

10.2 השפעת ההקשר על היתכנות וקיימות ההוראה

כאשר AI משתלב בתוך מקצוע קיים (כמו אצל מורה מתוכנית אדם, בינה ומכונה -בתוך מדע וטכנולוגיה), נוצר יתרון של מסגרת ארגונית קיימת אך גם מתח מתמיד: הזמן המוקדש ל-AI בא על חשבון תכנים אחרים שהמורה מחויב ללמד. לעומת זאת, מסלולים רב-שנתיים ועצמאיים (מגשימים AI, מדע חישובי – מכון דוידסון) מאפשרים לבנות דרישות קדם בהדרגה וללא תחרות על שעות. תוכניות שנשענו על מקצועות קיימים נתפסו כקלות יותר להטמעה ולהרחבה; תוכניות שכללו רכיבי ידע חדשים לגמרי דרשו הכשרת מורים, חומרי הוראה ותמיכה מערכתית רחבה יותר. המסקנה המערכתית: קיימות תוכנית AI תלויה לא רק באיכות הסילבוס אלא במיקומה בתוך מערכת השעות.

חלק ב׳

פרופיל המורה הנדרש להוראת בינה מלאכותית

מי המתאימים ביותר ללמד AI, ולאילו תמיכה והכשרה הם זקוקים?

11. מי מלמד: רקע, עומק ופערים

יותר מכל רכיב תוכן או מודל פדגוגי, עלה מן הראיונות כי הצלחת הוראת ה-AI תלויה במורה – באמונו בתחום, בביטחונו המקצועי וביכולתו ללוות תהליכי למידה פתוחים ובלתי צפויים.

מורה למדע חישובי מרקע פיזיקלי (יאס״א ירושלים, תיכון) אף מייחס למורה עצמו כ-80% מהצלחת התוכנית, ומדגיש כי "אפשר לקחת חומר מצוין ולשעמם את הילדים למוות".

המחקר ביקש לבדוק את השפעת הרקע המקצועי של המורים על התוכן ועל העומק שהם לימדו בשטח. הראיונות אינם מאפשרים לקבוע באופן גורף ש"כל מורי המתמטיקה מתקשים בנושא X" – המדגם אינו בנוי להשוואה כמותית כזו. עם זאת, ניתן לזהות בבירור כיצד הרקע המקצועי של המרואיין משפיע על נקודת הכניסה שלו ל-AI, ועל רכיבי הידע שבפועל ניתן היה ללמד.

טבלה 7: פרופילי מורים — יתרונות, מגבלות והשפעה על העומק שהושג

פרופיל רקע	יתרונות בולטים	מגבלה אופיינית	דוגמאות	עומק שהושג בפועל
מדעי המחשב / הנדסת תוכנה	תכנות, אלגוריתמיקה, מבני נתונים, פתרון תקלות	ידע מתמטי מתקדם (ל-Deep Learning) אינו תמיד חלק מההכשרה	הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה – משרד החינוך (חיפה); הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה – שי פרח ומכון ויצמן (פ״ת); המכינה לבינה מלאכותית (כרמיאל, אשדוד)	גבוה בתכנות; משתנה במתמטיקה
פיזיקה / מדע חישובי	מידול, מתמטיקה, נומריקה, פירוק בעיות, חיבור מודל–מציאות	דורש זמן רב לבניית תשתית לפני AI עצמו	מורה למדע חישובי מרקע פיזיקלי (יאס״א ירושלים, תיכון)	גבוה ביותר — עומק מתמטי-חישובי מלא
מדעים / ביולוגיה	חשיבה מדעית, חקר, ניסוי, פרשנות נתונים	AI משתלב ככלי בתוך חקר, פחות כתחום עצמאי	מדע חישובי – יאס״א; מדע חישובי – מכון דוידסון (BioCode)	גבוה בהקשר מדעי; נמוך-בינוני ב-AI "טהור"
מתמטיקה / נתונים	סטטיסטיקה, הסתברות, ניתוח נתונים, חשיבה כמותית	אינו בהכרח מלמד בניית AI (ML/DL) כשלעצמה	מורה במגמת מידע ונתונים (יגור, תיכון)	עומק אנליטי גבוה; לא עומק אלגוריתמי
ללא רקע מדעי-טכנולוגי	נגישות, שימוש, חשיבה ביקורתית, התאמה לקהל רחב	אינו מתאים למסלולי עומק מתמטי	מורה מתוכנית ניצנים של בינה (רמת גן, כיתה ח׳)	גבוה באוריינות; לא רלוונטי לעומק

מכאן עולה עיקרון מרכזי: **אין פרופיל מורה יחיד המתאים לכל הוראת AI.** מורה לתוכניות המבוא ב-AI אינו חייב להיות מומחה ב-Backpropagation; מורה למסלול Deep Learning כן זקוק לתשתית שונה לחלוטין. פרופיל המורה הנדרש צריך להיגזר מרמת העומק של התוכנית - ולא להיקבע באופן גורף לפי תואר אקדמי. ממצא זה בולט כמעט בכל התוכניות שנבחנו: אף שהתוכניות עסקו בתחומי תוכן דומים, רמת ההעמקה, סדר ההוראה ואופי הפעילויות השתנו בהתאם למאפייני המורים שלימדו אותן, עד כדי כך שבמקרים רבים תוכניות הלימודים כלל לא נבנו תחילה ורק לאחר מכן הותאמו למורים, אלא התפתחו מתוך הבנה של יכולות כוח ההוראה הקיים ושל תנאי היישום במערכת. הבדל נוסף בין מורי מדעי המחשב למורי מתמטיקה בולט בנקודת הכניסה לתחום: הראשונים נוטים להתחיל מתכנות ומחשיבה חישובית ולעבור בהמשך ללמידת מכונה; השניים נוטים להדגיש כבר בשלבים מוקדמים מושגים מתחומי ההסתברות והסטטיסטיקה.

פערי ידע וביטחון מקצועי שעלו בפועל

המקרה המפורש ביותר במדגם הוא של מורה במכינה לבינה מלאכותית: בעלת תואר ראשון במדעי המחשב, תואר שני בניהול מערכות מידע, ו-18 שנות ניסיון בתעשיית ההייטק – פרופיל שנראה "בטוח" על פניו. ובכל זאת, היא תיארה חוסר ביטחון מקצועי מובהק בממשק הטכני הספציפי בין Python לבין מערכת ה-AI (ספציפית, ניהול API keys), משום שהנושא לא נלמד לעומק מספק במסגרת ההשתלמות שעברה. ממצא זה מעניין: רקע חזק במדעי המחשב או בהייטק אינו מבטיח באופן אוטומטי ביטחון בכל רכיבי ההוראה. נדרשת הכשרה ממוקדת-רכיב שמתעדכנת ביחד עם ההתפתחות הטכנולוגית. ניהול מפתחות API הוא אמנם אינו רכיב ידע ב-AI במובנו המושגי, אלא רכיב טכנולוגי-תפעולי הנדרש להוראה ומתעדכן בתדירות גבוהה. עם זאת, המקרה אינו חריג. בשל קצב ההתפתחות המהיר של התחום עלתה מן הראיונות חוויה רחבה של "חוסר ביטחון טכנולוגי", גם בקרב מורים בעלי רקע חזק, מול כלים, ממשקים וסביבות עבודה המשתנים מהר יותר מקצב ההשתלמויות. מכאן שיש להבחין בין שני סוגי פערים: פער בהבנה המושגית של התחום, הנבנה באמצעות הכשרה מעמיקה ולמידה מצטברת, ופער טכנולוגי-תפעולי המתחדש באופן קבוע ומחייב מנגנון עדכון שוטף. רקע חזק במדעי המחשב או בהייטק מצמצם את הראשון, אך אינו מחסן מפני השני.

דוגמה נוספת: מורה בתוכנית הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה של שי פרח ומכון ויצמן מתאר תהליך שבו Deep Learning לא היה חלק מהכשרתו המקורית, והידע נבנה לאורך זמן באמצעות השתלמויות ולמידה עצמית. מכאן עולה הבחנה חשובה בין הכשרה אקדמית ראשונית לבין מומחיות מצטברת ומתעדכנת. מורה במכינה לבינה מלאכותית תיארה את הפער בין ההשתלמות לבין מה שנדרש בכיתה:

> *"אם אני לא אבין לעומק איך הדבר הזה עובד, אני לא אצליח להסביר אותו לתלמידים. הייתי חייבת ללמוד מעבר למה שהיה בהשתלמות."*
>
> **— מורה במכינה לבינה מלאכותית (חולון)**

מעבר לרקע: התלהבות וסמכות מקצועית

הצלחת ההוראה אינה נובעת מידע בלבד. גורם שחזר ללא קשר לרקע האקדמי של המורה הוא התלהבותו ומחויבותו האישית לתחום: תלמידים "מדביקים" את ההתלהבות של המורה, ולכן היא משאב פדגוגי ולא רק תכונת אופי.

חשוב לצד מרכזיותו של המורה גם לשמור על איזון: המורה אינו יכול להסתפק בתפקיד של מלווה בלבד, וחייב להישאר גם מוקד של סמכות מקצועית ודיסציפלינרית - אי אפשר להחליף מומחיות מקצועית במיומנויות הנחיה בלבד. שילובם של שני הקולות הללו – המעבר להנחיה מזה, ושימור העומק המקצועי מזה - מנחה את הדיון בפרקים הבאים על מודלי ההוראה.

12. הכשרת מורים: מאירוע חד-פעמי ללמידה מקצועית מתמשכת

מכלול הראיונות מצביע על צורך במודל מתמשך ולא חד-פעמי:



תחום המשתנה במהירות אינו מאפשר להסתפק בקורס בודד. כל שלב ברצף נשען על קודמו, והשלבים מוצגים להלן לפי סדרם.

הכשרה ראשונית והתנסות מעשית

ההתנסות המעשית תרמה במקרים רבים יותר מכל רכיב אחר לחיזוק תחושת המסוגלות של המורים: האפשרות לנסות, לטעות, לשאול שאלות ולשפר את דרכי ההוראה במסגרת בטוחה נתפסה כמרכיב משמעותי בבניית הביטחון המקצועי.

מורים נדרשים לא רק להבין כיצד מערכות בינה מלאכותית פועלות, אלא גם לפתח ביטחון בשילובן בתהליך ההוראה. ההתנסות מאפשרת להם לחוות את אותן דילמות שבהן ייתקלו תלמידיהם, להתמודד עם מגבלות הכלים ולגבש אסטרטגיות הוראה המתאימות למציאות הכיתתית.

ליווי צמוד

חלק מן התוכניות כללו מנגנוני ליווי שוטפים - מפגשי מעקב, ייעוץ אישי, משוב על מערכי שיעור וסיוע בפתרון בעיות. מנגנונים אלה נתפסו כבעלי חשיבות מיוחדת בשלבים הראשונים של הטמעת התוכנית.

> *"אני בלי סטוד נטית צמודה... אז אם אני לא יודעת אני לא אלמד משהו שאני לא יודעת. אני צריכה לפני זה לדעת, להודות בזה שאני לא מוכנה, ולבקש הסברים."*
>
> **— מורה מתוכנית ניצנים של בינה (רמת גן, כיתה ח׳)**

קהילת עמיתים

אחד הממצאים העקביים ביותר הוא החשיבות הרבה שיוחסה ללמידה בקהילה מקצועית. כמעט כל התוכניות כללו מנגנונים שאפשרו למורים להמשיך להתייעץ, לשתף חומרים, לדון בקשיים ולהיחשף להתפתחויות חדשות גם לאחר סיום ההכשרה הראשונית. קהילות אלה ממלאות מספר תפקידים במקביל: העברת ידע מקצועי, תמיכה רגשית, הפצת רעיונות פדגוגיים ופיתוח משותף של חומרי הוראה. עצם הידיעה שקיימת קבוצה מקצועית שניתן להתייעץ עמה מפחיתה את תחושת אי-הוודאות ומחזקת את נכונות המורים להתנסות בדרכי הוראה חדשות.

עדכון מקצועי שוטף

בתחום המשתנה במהירות, גם מורים ותיקים מאוד (30+ שנות ניסיון) ראו עצמם לומדים תמידיים. ההכשרה אינה מסתיימת אפוא בשלב כלשהו: היא מחייבת עדכון שוטף של תכנים, כלים ומערכי שיעור, הנשען במידה רבה על מנגנוני הליווי ועל קהילות העמיתים שתוארו לעיל.

עם זאת, לא כל רכיבי הידע מתיישנים באותו קצב. הליבה המושגית (פרק 5) והתשתית המתמטית של מסלולי העומק (פרק 7) יציבות יחסית, ואילו הכלים, הממשקים וסביבות העבודה משתנים בתדירות גבוהה. מכאן שגם מודל ההכשרה צריך להיות דו-

רובדי: הכשרה מעמיקה בליבה, הנבנית לאורך זמן, ומנגנון עדכון קבוע וקל ברובד הטכנולוגי. ליבה מבוססת היא שמאפשרת למורה לקלוט כלים חדשים בלי לחוש שהקרקע נשמטת תחתיו.

המורים כשותפים לעיצוב התוכנית

בתוכניות רבות לא התקיימה הפרדה ברורה בין פיתוח תוכנית הלימודים לבין הכשרת המורים – משוב שקיבלו מפתחי התוכניות מן המורים במהלך ההכשרות השפיע על בחירת רכיבי הידע, על סדר ההוראה ועל חומרי הלימוד, כך שהמורים בשלב זה אינם רק מיישמים את התוכנית אלא גם שותפים פעילים בעיצובה.

13. גישות הוראה מתאימות לפי מטרת התוכנית

בראיונות עלה שאין "פדגוגיית AI" אחת; גישת ההוראה נגזרת מהשאלה האם מטרת התלמיד היא להבין, להשתמש, לבנות או לחקור באמצעות AI. ניתוח תמטי רחב יותר של הראיונות מזהה ארבעה דפוסים חוזרים בעקביות, ללא קשר לרמת התוכנית או לפרופיל המורה: למידה באמצעות התנסות ולא הרצאה; למידה מבוססת חקר, שבה תלמידים בוחרים שאלת מחקר ובוחנים תוצאות בעצמם; למידה מבוססת פרויקטים אותנטיים, שבה הפרויקט הוא מרחב למידה מרכזי ולא רק כלי הערכה; ולמידה מטעויות ומשוב מתמשך, שבה טעות נתפסת כהזדמנות ולא ככישלון.

טבלה 8: גישת הוראה מתאימה, לפי מטרת התוכנית

מטרת התוכנית	גישות הוראה שנמצאו מתאימות
אוריינות AI	דיון, התנסות, משחק, חקר, ניתוח מקרים, כלים ללא קוד
מבוא טכנולוגי	למידה מבוססת פרויקט, אימון מודלים, ניסוי וטעייה, בניית תוצר
Machine Learning / Deep Learning	בנייה הדרגתית של תשתיות מתמטיות ותכנותיות; עבודה מעמיקה עם נתונים ומודלים
מדע חישובי	למידה מבוססת בעיה מדעית, מידול, סימולציה, ניתוח תוצאות

14. מודלי ההוראה: מורה פנימי, מדריך חיצוני והיברידי

המחקר ביקש לבחון גם את מודל ההוראה שבאמצעותו תוכניות AI מגיעות לתלמידים. ניתוח הראיונות מעלה כי בניגוד לציפייה לזהות מודל הוראה מועדף או "נכון", בפועל לא התגבשה הסכמה כזו: מודל ההוראה אינו רק בחירה פדגוגית אלא גם בחירה מערכתית, המושפעת ממטרות התוכנית, אוכלוסיית היעד, זמינות מורים מתאימים, משך התוכנית והשאיפה להרחבה עתידית.

טבלה 9: שלושת מודלי ההוראה — יתרונות, מגבלות וקיימות

מודל	יתרון מרכזי	מגבלה מרכזית	קיימות הידע במערכת
מורה בעל מומחיות תוכן גבוהה (מתוך המערכת)	החלטות בזמן אמת: העמקה, שינוי סדר, חיבור בין תחומים	תלות גבוהה במורה יחיד; קשה להרחיב במהירות לבתי ספר רבים	גבוהה אם המורה מכשיר עמיתים; שבירה אם תלוי באדם אחד
מורה בית-ספרי שעבר הכשרה לתוכנית	מכיר את התלמידים, רמתם והמערכת הבית-	פער אפשרי בין הכרת מערכי השיעור לבין בעלות מקצועית מלאה על הידע	בינונית; תלויה באיכות ובעומק ההשתלמות

מודל	יתרון מרכזי	מגבלה מרכזית	קיימות הידע במערכת
	ספרית; מזהה מתי נדרשת השלמה		
תוכן שפותח מחוץ לביה״ס ומיושם ע״י מדריך חיצוני (בנוסף או במקום המורה)	מביא ידע עדכני במהירות, גם ללא מאגר גדול של מורים מומחים	סכנת תלות מתמשכת בגורם החיצוני אם הידע אינו עובר בהדרגה למורה	תלויה במידה שבה המורה הופך מ"מיישם" לבעל ידע עצמאי

14.1 מודל היברידי: חלוקת אחריות בין מומחה תוכן למורה

אחד המודלים שחזר במספר תוכניות הוא מודל הוראה היברידי, שבו האחריות על תהליך הלמידה מתחלקת בין מורה בית-ספרי לבין גורם מקצועי חיצוני – מדריך, חוקר, סטודנט או מומחה תעשייה. המומחה מביא ידע מקצועי עדכני, בעוד שהמורה אחראי על ההיבטים הפדגוגיים, ניהול הכיתה וההתאמה להקשר הבית-ספרי. מודל זה התפתח בעיקר כמענה למחסור במורים בעלי מומחיות בתחום, אך יתרונו המרכזי אינו רק השלמת פערי ידע: העבודה המשותפת מהווה הזדמנות ללמידה הדדית, שבה המורה עצמו נמצא בתהליך למידה פעיל וצופה כיצד המומחה מסביר מושגים מורכבים – במובן זה, ההוראה ההיברידית משמשת במקביל גם כמנגנון להכשרת מורים (ראו גם פרק 12).

14.2 למידה היברידית ודיגיטלית: שינוי תפקידו של המורה

מספר תוכניות שילבו רכיבים של למידה מקוונת כחלק בלתי נפרד מתהליך ההוראה, אך ברוב המקרים היא לא נועדה להחליף את המורה, אלא לשנות את תפקידו: זמנו מופנה פחות להעברת ידע ויותר לליווי תהליכי למידה, להובלת דיונים ולמשוב אישי. עם זאת, למידה מקוונת אינה מתאימה לכל מצב – תלמידים צעירים יותר מתקשים לעיתים ללמוד באופן עצמאי לאורך זמן, וללא ליווי פעיל קיים סיכון שהלמידה תהפוך לפסיבית.

> *"אם כל מה שעשינו הוא להעביר את ההרצאה לזום או לסרטון, לא באמת שינינו את הלמידה."* — **מורה, מדע חישובי – מכון דוידסון**

15. מפיילוט למדיניות: קיימות, חסמים ותנאי הצלחה

שאלה נוספת שעלתה בראיונות הייתה לא רק כיצד ניתן ללמד בינה מלאכותית באופן איכותי, אלא כיצד ניתן לעשות זאת בקנה מידה רחב ולאורך זמן. בעוד שרבות מן התוכניות הצליחו להציג מודלים פדגוגיים חדשניים במסגרת פיילוטים, הצלחתו של פיילוט אינה מבטיחה בהכרח את יכולתו להפוך לחלק ממערכת החינוך באופן קבוע. קיימות אינה נתפסת כתוצאה של מודל הוראה מסוים, אלא כתוצר של שילוב בין מספר מרכיבים: פיתוח כוח הוראה פנימי, זמינות חומרי לימוד איכותיים, מנגנוני הכשרה וליווי, התאמה לתוכניות הלימודים הקיימות, ותמיכה של הנהלת בית הספר.

במספר תוכניות תואר המעבר מפיילוט להרחבה כתהליך של שינוי הדרגתי: בשלב הראשון, שימוש נרחב במדריכים חיצוניים ומומחים כדי להבטיח רמה מקצועית גבוהה; עם התקדמות התהליך, העברת האחריות למורי בתי הספר, תוך השקעה בהכשרה ובליווי. מעבר זה אינו נובע רק משיקולים תקציביים, אלא גם מהכרה בכך שהוראה הנשענת לאורך זמן על מומחים חיצוניים אינה מייצרת יכולת מערכתית:

> *"אם בכל שנה צריך להביא מחדש את האנשים מבחוץ, לא באמת בנינו יכולת במערכת."*

> — מוביל ארצי בתוכנית הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה (משרד החינוך)

לצד היתרונות הברורים של שותפות עם האקדמיה, התעשייה ועמותות, תוכניות הנשענות על מדריכים מתנדבים או על תקציבי פילנתרופיה מתקשות לעיתים להבטיח רציפות, אחידות והרחבה. שותפים חיצוניים אינם תחליף למערכת החינוך אלא זרז להתפתחותה – הצלחתה של שותפות אינה נמדדת במספר השיעורים שהועברו על ידי המומחים, אלא במידת יכולתה להפוך את עצמה לפחות נחוצה לאורך זמן. לצד הגורמים המקצועיים, עלתה גם חשיבותה של הנהגת בית הספר: כאשר הנהלת בית הספר הייתה שותפה לתהליך, היה קל יותר ליצור רצף בין שכבות הגיל, לעודד שיתוף פעולה בין מורים ולהבטיח המשכיות; כאשר התוכנית נשענה על מורה בודד או יוזמה אישית, עלתה תחושת פגיעות גבוהה יותר.

ניתן להציג את מודל הקיימות המיטבי בצורה הזו:



חסמים ותנאים מערכתיים

הטמעת תוכניות עומק להוראת בינה מלאכותית במערכת החינוך אינה תלויה רק באיכות התוכן הפדגוגי או ברמת העניין של התלמידים. מן הראיונות עולה כי גם תוכניות מקצועיות ומוערכות מתקשות להתבסס לאורך זמן כאשר התנאים המערכתיים אינם תומכים בהפעלתן. במקרים רבים, הצלחת התוכנית נשענת על מחויבות יוצאת דופן של מורה מסוים, על נכונות של הנהלת בית הספר להקצות משאבים, או על פתרונות מקומיים שאינם בהכרח ניתנים להרחבה למערכת כולה.

החסמים שזוהו אינם פועלים בנפרד, אלא מחזקים זה את זה. עומס בתוכנית הלימודים מגביל את היכולת להקצות שעות לתחום חדש; המחסור בזמן מקשה על הכשרה וליווי של מורים; הקצב המהיר של ההתפתחות הטכנולוגית מחייב עדכון תכוף של חומרי ההוראה; והשונות בין תלמידים ובין בתי ספר מקשה על יישום של תוכנית אחידה. לצד זאת, ללא הכרה רשמית ותמיכה ארגונית, הוראת הבינה המלאכותית נותרת לעיתים בגדר פעילות נוספת, התלויה ביוזמה מקומית ולא חלק יציב מתוכנית הלימודים.

הטבלה הבאה מציגה את החסמים המרכזיים שעלו מן השטח ואת התנאים הנדרשים כדי להתמודד עמם:

טבלה 10: חסמים מרכזיים ותנאים נדרשים להצלחה

חסם	תנאי הצלחה נגדי
עומס תוכנית לימודים ומחסור בזמן	הקצאת שעות ייעודיות; שילוב רשמי בתוכנית הלימודים
הצורך בהכשרה מתמשכת	מודל הכשרה מתמשך (ראו פרק 12)
התאמת התוכנית לאוכלוסיית התלמידים	גמישות פדגוגית ומסלולים מדורגים (לא תוכנית אחידה)
קצב טכנולוגי מהיר מקצב מערכת החינוך	ליבה מושגית ומתמטית יציבה שאינה מתיישנת, לצד עדכון שוטף ולא חד-פעמי של מעטפת הכלים וההשתלמויות
תמיכה ניהולית וארגונית	הנהגה חינוכית תומכת + הכרה רשמית בתוכנית

16. מסקנות מרכזיות

לאור הניתוח המוצע לעיל עולות חמש מסקנות מרכזיות:

- אין ולא צריכה להיות תוכנית לימודים אחידה להוראת בינה מלאכותית. השונות הרבה בין התוכניות שנבחנו אינה כשל שיש לתקן, אלא ביטוי בריא למגוון המטרות, אוכלוסיות היעד והמשאבים שמתוכם צומחות תוכניות אלה. עם זאת, מתחת לשונות הזו מסתתרת תשתית עקרונות פדגוגיים חוזרת: הבנה מושגית קודמת לשליטה טכנית, למידה הנבנית כרצף התפתחותי ולא כרשימת נושאים, והכרה בכך שהתוכן חייב להיות מותאם למי שבפועל ילמד אותו.
- המתח בין אוריינות לכלל התלמידים לבין התמחות מעמיקה הוא ציר מארגן, לא מכשול לפתרון. הממצאים מצביעים על מבנה שכבתי מכוון: מעבר לשכבת אוריינות AI לכלל התלמידים (החורגת ממוקד המחקר), ניתן להבחין בין שכבת אוריינות AI מדעית-טכנולוגית – שימוש מושכל בכלי AI בתכנות, בחקר מדעי ובעבודה הנדסית, כבסיס לתלמידי המדעים – לבין שכבת התמחות ב-AI, המיועדת לתלמידים בעלי עניין ורקע מתמטי-חישובי מתאים ומקנה הבנה מעמיקה של המנגנון כבסיס לפיתוח AI. בשכבת ההתמחות מוצע מבנה של ליבה משותפת וענפים דיסציפלינריים. חשיבה ביקורתית ואתיקה הן רכיב רוחבי בכל השכבות.
- המורה, לא הטכנולוגיה או תוכנית הלימודים, הוא משתנה ההצלחה המרכזי. השקעה בתוכן איכותי ללא השקעה מקבילה בביטחונו המקצועי של המורה, בהכשרתו המתמשכת ובקהילת התמיכה שמסביבו צפויה להניב תוצאות חלקיות בלבד. פיתוח כוח הוראה אינו שלב מקדים לפיתוח תוכנית הלימודים אלא רכיב שווה ערך לו.
- למידה מבוססת פרויקטים היא הכיוון הפדגוגי המועדף כמעט פה אחד, אך הצלחתה תלויה בתנאים מערכתיים שאינם ניתנים כיום כמובן מאליו – זמן, גמישות במערכת השעות, והכרה בכך שלא כל תלמיד מגיע מוכן ללמידה עצמאית וממושכת.

- קיימות אינה תוצאה אוטומטית של הצלחה פדגוגית. תוכנית שהוכיחה את עצמה בפיילוט אינה הופכת מאליה למדיניות רחבת היקף; המעבר מפיילוט להטמעה מחייב השקעה מכוונת בבניית יכולת פנימית – מורים, חומרי הוראה, ליווי מקצועי ותמיכת הנהלה – שתפחית בהדרגה את התלות בגורמים חיצוניים.

17. המלצות — מובחנות לפי סוג תוכנית, שכבת גיל ופרופיל מורה

ההמלצות הבאות אינן מוצגות כרשימה אחידה, אלא משויכות במפורש לסוג התוכנית, לשכבת הגיל ולפרופיל המורה שעבורם הן רלוונטיות - משום שכפי שהודגם לעיל, מסקנה שנכונה לתוכנית מבוא חד-שנתית בכיתה ט׳ עשויה שלא לחול כלל על תוכנית אוריינות בכיתה ח׳ או על מסלול עומק רב-שנתי בתיכון.

טבלה 11: המלצות מותאמות לפי סוג תוכנית ושכבת גיל

סוג תוכנית / שכבה	המלצה עיקרית
ניצנים של בינה — חטיבת ביניים (כיתה ח׳)	לשמר עיצוב ללא תלות במתמטיקה; להקדים רכיבי ליבה ואתיקה לאמצע השנה ולא לסוף.
אדם, בינה ומכונה	להקצות שעות ייעודיות נפרדות, או לקבוע מראש אילו רכיבים מוותרים עליהם באופן מתוכנן ולא כפוי
המכינה לבינה מלאכותית	לפרוס על פני שנתיים; להימנע מהוראת Python מרוכזת ולשלבו בהדרגה בתוך משימות AI
מסלולי עומק רב-שנתי — תיכון	לשמר את הפריסה הרב-שנתית כמודל מועדף; לתעד באופן שקוף אילו נושאים מוצאים מהסילבוס במודע לעומת מה שנפגע משיבוש.

17.1 המלצות לפי פרופיל מורה

- מורים לאוריינות AI (רקע מגוון, כולל ללא מדעים/טכנולוגיה): להשקיע בהכשרה בעקרונות, נתונים, הטיות ואתיקה - לא נדרש רקע מתמטי.
- מורים למבוא טכנולוגי (לרוב עם רקע במדמ"ח): להקפיד על הכשרה ממוקדת ברכיבים הטכנולוגיים המשתנים (סביבות עבודה, ממשקים וכלים), גם כאשר הרקע הכללי חזק.
- מורים ל-ML/DL ומדע חישובי (פיזיקה/מדמ"ח עם רקע מתמטי): לאפשר זמן ותמיכה לבניית מומחיות מתמשכת (שנים, לא חודשים).
- בכל הפרופילים: לתגמל ולטפח התלהבות אישית וקהילות מקצועיות כמשתנה מנבא הצלחה.

17.2 שש המלצות מדיניות מסכמות

- לבנות מודל שכבתי מכוון מדיניות: להבחין במפורש בין שכבת אוריינות AI מדעית-טכנולוגית, כבסיס לתלמידי המדעים והטכנולוגיה, לבין מסלולי התמחות ב-AI, ולהגדיר לכל שכבה יעדי למידה, דרישות קדם ופרופיל מורה נפרדים – במקום לתכנן תוכנית אחת שמנסה לשרת את שני הקהלים בעת ובעונה אחת. במסלולי ההתמחות, לבנות ליבה מושגית ומתמטית משותפת שעליה נבנים ענפים דיסציפלינריים, ולהגדיר רצפה מתמטית מנגנונית משותפת לצד רובד פורמלי מתקדם (ראו פרק 7).

- להשקיע בהכשרת מורים כתהליך מתמשך ולא כאירוע חד-פעמי: לבנות מנגנוני ליווי, קהילות מקצועיות ועדכון שוטף של מעטפת הכלים, ולראות בכך תנאי הכרחי להצלחה, לא תוספת רצויה.
- להטמיע חשיבה ביקורתית ואתיקה כרכיב חוצה-תוכנית ולא כיחידת לימוד נפרדת: לשלב דיון בהטיות, באמינות מידע ובסכנת ההאנשה לאורך כל שלבי הלמידה, ובפרט בחטיבת הביניים.
- לתמוך במעבר בין מודלי הוראה, לא רק בבחירה ביניהם: לתכנן מראש את מסלול ההעברה ההדרגתית של האחריות לכוח ההוראה הבית-ספרי — כולל לוחות זמנים, יעדי הכשרה ומדדי הצלחה למעבר עצמו.
- לתקצב זמן ולא רק תוכן: כדי שלמידה מבוססת פרויקטים תתקיים בפועל, נדרשת הקצאה מפורשת של שעות במערכת, כולל גמישות מסוימת בהספק הנדרש. בכל מקום שבו תכני AI מתווספים לתוכנית קיימת, להחליט מראש ובמפורש מה יצומצם כדי לפנות להם מקום, כך שהוויתורים יהיו מתוכננים ולא כפויים.
- למדוד קיימות, לא רק שביעות רצון מפיילוט: לפני הרחבת תוכנית, לבחון האם נבנתה בה יכולת פנימית - מורים מוכשרים, חומרי הוראה עצמאיים, ליווי מקצועי ותמיכת הנהלה.

נספח א׳ – מיפוי המרואיינים

הערה: הסיווג מתייחס לתפקיד המרואיין/ת ביחס לתוכנית או למסגרת שנחקרה. תפקיד מקצועי נוסף הרלוונטי לפרשנות הממצאים מצוין בנפרד, ולכן חלק מן המרואיינים מייצגים יותר מנקודת מבט מקצועית אחת.

מרואיין/ת	תוכנית / מסגרת	תפקיד ביחס לתוכנית שנחקרה	תפקידים מקצועיים נוספים	שכבת גיל
	ניצנים של בינה (גוגל), רמת גן	מורה בתוכנית	רכזת תקשוב; שותפה בפיתוח/התאמה והטמעה של תוכנית AI בחטיבה	ח׳
	ניצנים של בינה (גוגל), רמת גן	מורה בתוכנית	—	ח'
	אדם, בינה ומכונה (מכון ויצמן ואורט), נוף הגליל	מורה בתוכנית	מנהלת אשכול פיס נוף הגליל	ח׳–ט׳
	אדם בינה ומכונה (מכון ויצמן ואורט), כרמיאל	מורה בתוכנית	—	ח'-ט'
	המכינה לבינה מלאכותית (מכון ויצמן, מגשימים וגוגל), כפר סמיע	מורה בתוכנית	—	ט׳
	המכינה לבינה מלאכותית (מכון ויצמן, מגשימים וגוגל) , נחף	מורה בתוכנית	—	ט׳
	המכינה לבינה מלאכותית (מכון ויצמן, מגשימים וגוגל), חולון	מורה בתוכנית	—	ט׳
	המכינה לבינה מלאכותית (מכון ויצמן, מגשימים וגוגל), אשדוד	מורה בתוכנית	—	ט׳
	המכינה לבינה מלאכותית (מכון ויצמן, מגשימים וגוגל), רמת גן	מורה בתוכנית	—	ט׳–י״ב
	מגשימים AI, חדרה	מדריך בתוכנית	מלמד תלמידים בחינוך בלתי־פורמלי	י׳–י״ב
	מדע חישובי – מכון דוידסון (אסטרופיזיקה חישובית)	מורה ומפתח תוכן	מעביר גם השתלמויות מורים	י׳–י״ב
	הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה – שי פרח ומכון ויצמן, פ״ת	מורה בתוכנית	—	י״א–י״ב
	הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה – שי פרח ומכון ויצמן, חיפה	מורה בתוכנית		תיכון
	מדע חישובי – מכון דוידסון (BioCode)	מנהלת ומובילת התוכנית	עוסקת בהוראה ובפיתוח פדגוגי	תיכון
	מדע חישובי – יאס״א	מורה בתוכנית	—	י׳–י״ב
	מדע חישובי – יאס״א	מורה בתוכנית	עוסקת גם בהכשרת/הדרכת מורים	י׳–י״ב
	מדע חישובי – יאס״א	מורה ושותף בפיתוח	שותף בפיתוח התוכנית	תיכון
	הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה – משרד החינוך, חיפה	מורה ומפתחת תוכניות	פיתוח תוכניות וחלופות בהנדסת תוכנה/AI	תיכון
	תוכנית הוראת סטטיסטיקה – אוניברסיטת חיפה + מגמת מידע ונתונים, יגור	מורה ורכזת המגמה	מעבירה השתלמויות מורים; עוסקת גם במטה בשילוב AI במגמות STEM	ט' – י"ב

מרואיין/ת	תוכנית / מסגרת	תפקיד ביחס לתוכנית שנחקרה	תפקידים מקצועיים נוספים	שכבת גיל
	הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה – משרד החינוך (הובלה ארצית)	מוביל ארצי, מפתח תוכן ומדריך	תפקיד בפיקוח; במקביל מורה פעיל	מערכתי/תיכון
שי פרח	הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה – שי פרח ומכון ויצמן	מנהל/מוביל התוכנית	—	תיכון
גיורא אלכסנדרון	המכינה לבינה מלאכותית (מכון ויצמן, מגשימים וגוגל); אדם, בינה ומכונה (מכון ויצמן ואורט)	מנהל/מוביל תוכניות	—	ט'-י"ב
מרב ורסנו	מדע חישובי – מכון דוידסון	מנהלת תוכנית	—	תיכון
רז נתנזון	ניצנים של בינה (גוגל)	מנהלת תוכנית	—	ח׳
דן שטייניץ	מדע חישובי – יאס״א	מנהל תוכנית	—	תיכון

נספח ב׳ – מסמכי התוכניות שנסקרו

לצד הראיונות נסקרו המסמכים הבאים, שהתקבלו מן התוכניות. המסמכים שימשו להכנת הראיונות ולהמחשת רכיבי הידע ורמות העומק.

תוכנית	מסמכים שנסקרו
אדם, בינה ומכונה (מכון ויצמן ואורט)	סילבוס התוכנית לשנת תשפ״ז: יחידות הלימוד, היקף השעות, מטרות היחידות, התנסויות מרכזיות והתייחסות למסגרת הרעיונית. פריסת תוכנית הלימודים – גאנט שנתי, תשפ״ז
ניצנים של בינה (גוגל)	סילבוס כיתות ח׳, תשפ״ו
מדע חישובי – מכון דוידסון	סילבוס אסטרופיזיקה חישובית – הנושאים שנלמדו במחזור א׳, בכיתות י׳–י״ב
הנדסת תוכנה בהתמחות למידה עמוקה – משרד החינוך	תוכנית הלימודים להתמחות למידת מכונה (Machine Learning)
רוחבי	תוצרי תלמידים מהתוכניות השונות