



דוח מת"ת

פיזיקה ניסויית בתוכנית הלימודים: טעמים, דרכי פעולה ואתגרים

الفيزياء التجريبية في المنهاج الدراسي:
التفضيلات، أساليب العمل والتحديات

מרכז לידע ולמחקר בחינוך
مركز معلومات وبحث في التربية والتعليم
Center for Knowledge and Research in Education
האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים



מחבר: ד"ר גיל גרטל
נובמבר 2020

לשכת המדען הראשי והמזכירות הפדגוגית במשרד החינוך פנו ליוזמה - מרכז לידע ולמחקר בחינוך בבקשה ללמוד על האופן שבו משלבים התנסות במעבדות בתחום הדעת פיזיקה במערכות חינוך בעולם. זאת כחלק מבחינת רפורמה בתחום בישראל.

דוח מת"ת (מידע תומך תכנון) נועד להשיב על שאלות ממוקדות בסוגיות אקטואליות של צוותים להתוויית מדיניות. התוצר הוא מסמך ממוקד, בהיר ומותאם אישית לצורכי הגוף המזמין. דוח מת"ת סוקר ספרות מחקר עדכנית וכן מדיניות חינוך. הסקירה נעשית בהתאם לבושה הנדון והיא מכנה את הקוראים והקוראות להרחבות.

להפקת דוחות מת"ת אחראים חברי צוות היוזמה:
ד"ר תמי חלמיש אייזנמן: מנהלת;

ד"ר עדו ליטמנוביץ ושירה זיוון: עורכי הסדרה;

מוריה יזרעאלב: עורכת הפרסומים;

אמונה כרמל: מעצבת ועורכת גרפית;

אילה ולודבסקי-יובל: אחראית על הנגשת חומרים וידע ארגוני.

כמו כן השתתפו בתהליך ההפקה:

טל רייך: עריכת לשון;

נסים חורי: תרגום מעברית לערבית;

בכל שימוש במסמך זה או ציטוט ממנו יש לאזכר את המקור כדלקמן: גרטל, ג' (2020). **פיזיקה ניסויית בתוכנית הלימודים: טעמים, דרכי פעולה ואתגרים**. ירושלים: יוזמה - מרכז לידע ולמחקר בחינוך.

תהליך הכתיבה של דוחות מת"ת כולל התייעצות עם חוקרות, חוקרים, נשות שטח ואנשי שטח. זאת לצורך כתיבת דוח מקיף המותאם לשדה החינוך בישראל והולם את צורכי הגוף המזמין. רבות מההערות שקיבלנו הוטמעו בדוח זה. הערות כלליות על הדוח או כאלו העומדות בפני עצמן שולבו בנספח.

תודתנו נתונה לכל מי שסייעו בהכוונות, הערות, הארות ומתן חוות דעת (לפי סדר אלפביתי):
ד"ר שלמה גולדמן | לשכת המדען הראשי, משרד החינוך;

פרופ' עידית ירושלמי | ראש הקבוצה לחקר חינוך פיזיקה במחלקה להוראת מדעים, מכון ויצמן למדע;

פרופ' ירון להבי | ראש הרשות למחקר והערכה במכללה האקדמית לחינוך ע"ש דוד ילין וראש המרכז הארצי של מורי הפיזיקה במכון ויצמן;

ד"ר אופיר נווה | חוקר ומרצה למתמטיקה במרכז האקדמי לב.

בהוראת תוכנית הלימודים בפיזיקה ברחבי העולם משולבים שיעורי מעבדה. זאת מתוקף התפיסה של תחום דעת זה כמקצוע ניסויי וככלי להטמעת ידע ומיומנויות. שיעורי המעבדה נועדו לאפשר לתלמידים להתנסות במחקר מדעי ולהמחיש מושגים תיאורטיים הנכללים בתוכנית הלימודים.

דוח זה פורס את קשת הסוגיות הקשורות להוראת שיעורי מעבדה בפיזיקה:

הפרק הראשון מציג את הטעמים לשילוב שיעורי מעבדה ואת מטרותיהם של שיעורים אלה.

הפרק השני בוחן את האמצעים והמכשירים המשמשים בשיעורי מעבדה. נוסף על כך, הוא מתייחס לסוגיה העכשווית של מעבר ללמידה מרחוק, ומשווה בין מעבדה וירטואלית לבין מעבדה ממשית.

הפרק השלישי מציג את הכלים המשמשים להערכת עבודת התלמידים במעבדות.

הפרק הרביעי מתייחס להכשרת המורים להעברת שיעורי מעבדה בפיזיקה.

בפרק המסכם ערכנו רשימה של כלל האתגרים המרכזיים בהוראה במעבדת פיזיקה לצד הפתרונות המומלצים בספרות המחקר.

לצורך כתיבת הדוח נעשה שימוש במאמרים מחקרניים שפורסמו בכתבי עת מדעיים ועוסקים בהיבטים השונים של הוראת שיעורי מעבדה במסגרת תוכנית הלימודים בפיזיקה. כמו כן, נעזרנו במאמרים שבחנו היבטים אלה בקורסי פיזיקה בלימודי תואר ראשון במכללות ובאוניברסיטאות, שכן יש דמיון רב, בתכנים וביעדי ההוראה, בין קורסים אלה לבין לימודי הפיזיקה בתיכון.

المقدمة

تدريس المنهاج الدراسي في موضوع الفيزياء في أنحاء العالم يدمج دروس مختبر. وذلك من منطلق التعامل مع هذا الموضوع العلمي على أنه موضوع تجريبي واداة لترسيخ المعرفة والمهارات. الهدف من دروس المختبر هو تمكين الطلاب من التدرب على البحث العلمي وتفسير المصطلحات النظرية المشمولة ضمن المنهاج الدراسي.

يتناول هذا التقرير مجموعة من القضايا المرتبطة بتدريس دروس المختبر في موضوع الفيزياء:

يعرض الفصل الأول التفضيلات بما يتعلّق بدمج دروس المختبر والهدف من هذه الدروس.

الفصل الثاني يفحص الوسائل والأدوات المستخدمة في دروس المختبر. بالإضافة، يتطرق إلى مسألة التعليم عن بعد السائدة اليوم، ويقارن بين المختبر الافتراضي والمختبر الحقيقي.

يعرض الفصل الثالث الأدوات المستخدمة لتقييم عمل الطلاب في المختبرات.

الفصل الرابع يتطرق إلى تأهيل المعلمين لتقديم دروس المختبر في موضوع الفيزياء.

في الفصل التلخيصي، أعدنا قائمة بكافة التحدّيات المركزية في التدريس في مختبر الفيزياء، إلى جانب الحلول المقترحة في الأدبيات العلمية البحثية.

من أجل كتابة التقرير، استعنا بمقالات بحثية نُشرت في مجلات علمية وتتناول الجوانب المختلفة من تدريس دروس المختبر في إطار المنهاج الدراسي في الفيزياء. كما واستعنا أيضاً بمقالات تناولت هذه الجوانب في مسابقات الفيزياء في إطار اللقب الأول في الكليات والجامعات، فهناك تشابه كبير من حيث المضامين وأهداف التدريس بين هذه المسابقات وبين تدريس الفيزياء في المرحلة الثانوية.

6	1. הרציונל והמטרות של הוראת הפיזיקה במעבדות
6	1.1 הניסוי וההתנסות בהוראה בכלל ובהוראת פיזיקה בפרט
7	1.2 תכנון הלימודים - מטרות רבות לשיעורי המעבדה
7	1.3 המעבדה כשחזור המחקר: מעבדה חוקרת ומעבדה מאשרת
8	1.4 הרציונל והמטרות - מבט עכשווי
11	1.5 מחקרי הערכה על סוגי המעבדות ומטרותיהן
14	2. הציווד המשמש בהוראת פיזיקה במעבדות
14	2.1 המכשירים והשפעתם על הלמידה
15	2.2 תפקידי המכשירים
15	2.3 המעבדה הווירטואלית
18	2.4 שילוב סביבות לימוד: ממשית וווירטואלית
21	3. כלים להערכה של הוראה במעבדות לפיזיקה
21	3.1 מטרות ההערכה
21	3.2 דוח מעבדה
22	3.3 תצפית על פעילות התלמידים במעבדה
23	3.4 מחוון הערכה כללי להוראת מעבדות בפיזיקה
24	3.5 מבחן פתוח, מבחן ברירה ומבחן מעשי
24	3.6 הערכה באמצעות מעבדה ווירטואלית וסימולציות מחשב
27	4. הכשרת המורים ותכנון הלימודים לשיעורי מעבדה בפיזיקה
27	4.1 קורס הכשרה להוראה במעבדת פיזיקה
27	4.2 מודל לפיתוח מערך שיעורי מעבדה בפיזיקה
30	סיכום: אתגרים והצעות לפתרונות
32	נספח חוות דעת מקצועיות

1. הרציונל והמטרות של הוראת הפיזיקה במעבדות

בחלק זה בחנו את ההנמקות להוראת פיזיקה במעבדות ואת מטרותיה. כיוון ששימוש במעבדות לצורך הוראת פיזיקה נהוג זה שנים רבות, לפחות מאה וחמישים שנים, תיארונו את ההתפתחויות על ציר היסטורי, מהקדום ביותר ועד ההגדרות הנהוגות בימינו.

1.1 הניסוי וההתנסות בהוראה בכלל ובהוראת פיזיקה בפרט

את תיאור ההיסטוריה של ניסויי המעבדה במסגרת הוראת הפיזיקה נציע להתחיל בראשית המאה ה-17, בדברי הפילוסוף פרנסיס בייקון. בספרו "אטלנטיס החדשה" תיאר בייקון חברה מדעית אוטופית, המפעילה מוסד לימודים שבו לומדים בדרך האינדוקציה, כלומר הכללה הנשענת על איסוף פרטים רבים, כתוצר של תצפיות וניסויים (בייקון, 1615, 1984).

רעיונותיו של בייקון הוטמעו בידי יוהאן עמוס קומניוס בתוכניתו לייסוד מערכת של חינוך אוניברסלי, כבר בשנת 1632 (גרטל, 2010). העקרונות שניסח ליוו את הוראת הפיזיקה הניסויית לעתיד. נתאר כאן את המרכזיים שבהם:

1. הראשון הוא שהלמידה מתפתחת מהמוחשי אל המופשט, ולכן יש הכרח "שכל הדברים יילמדו באמצעות תצפית ממשית ותפיסה חושית" (שם).

2. עיקרון שני הוא שהלמידה תכלול התנסות של התלמידים בנושא הנלמד, כך שתיווצר אצלם "תפיסה חושית" של מושגי היסוד. קומניוס טען שרק על בסיס תפיסה איתנה זאת, יוכלו התלמידים לעבור לשלבים המופשטים של הלמידה כגון למיין, לאפיין, לשער ולהסיק מסקנות.

3. עקרון שלישי בהוראה הניסויית הוא שיש להציג בפני התלמידים את "היישום המעשי בחיי היום-יום" של הנושאים הנלמדים. הצגת ההיבט השימושי של התוכן הנלמד אמורה להגביר את הרלוונטיות של השיעור בעיני התלמידים, וכן להוכיח לתלמידים שהם לומדים אמת ומציאות, ולא אמונות או דעות של המורים.

בשלהי המאה ה-19 ובראשית המאה ה-20 קם דור נוסף של הוגים אשר צידדו בלמידה בדרך ההתנסות (ראו למשל דיואי, 1915, 1960). הביקורת שהשמיעו כלפי מערכת החינוך של זמנם מלמדת אותנו שרעיונותיו של קומניוס לא יושמו באותה העת.

בארצות הברית, בשנת 1878, מצאה ועדת החינוך של הממשל הפדרלי כי רק ב-11 מתוך 607 בתי ספר תיכוניים משולבת התנסות במעבדה בהוראת הפיזיקה והכימיה (Squire, 2019). הוועדה פרסמה תוכנית לימודים חדשה, שבמרכזה שיעורי מעבדה שנועדו לאפשר לתלמידים לתרגל חשיבה אינדוקטיבית (מהפרט לכלל).

ההצעה לחזק את הוראת החשיבה המדעית באמצעות "לימודים מעשיים", דהיינו ניסויים במעבדות, חוזרת שוב במדריך למורי פיזיקה וכימיה שפורסם בשנת 1902 ובספר על הוראת המדעים משנת 1903 (Amstrong, 1903; Squire, 2019).

בשנת 1906 פרסמה התאחדות מורי המדעים בארה"ב חוות דעת שלפיה "יש לפתח את תוכנית הבסיס בהוראת הפיזיקה בתיכון, כך שתהיה יותר מעניינת ומעוררת השראה לתלמידים" (Otero & Meltzer, 2017). נוסף על כך, נכתב שם:

כאשר מדע הוכנס לתוכניות הלימודים, הוא נלמד בדרך דוגמטית ודוקטיבית. אולם הגיעה העת שנכיר בכך שמדע הוא תהליך הפרשנות של תופעות ובעיות [...] על כן, אם תלמידים צעירים אמורים להיות בקיאים במדעים, הם חייבים לחשוב כיצד לפרש בעצמם. הם חייבים לפתח את ההרגל לפרש תופעות באופן מבוסס - הרגל אשר ניתן לרכוש רק על ידי לימודי מדע.

על פי כל המקורות מתקופה זו, המטרה של שילוב ניסויים במעבדה - בהוראת המדעים בכלל ובהוראת הפיזיקה בפרט - הייתה פיתוח חשיבה מדעית. מורים וחוקרים סברו כי הוראה המעודדת חשיבה מעניינת יותר מהוראת עובדות ותיאוריות מדעיות, ואף מעוררת יותר השראה.

1.2 תכנון הלימודים - מטרות רבות לשיעורי המעבדה

במחצית המאה ה-20 התפתח והתמקצע התחום של פיתוח תוכניות לימודים, ובתוך כך הנוהג להגדיר מטרות לכל תוכנית (ראו למשל Bloom et al., 1956). בשנת 1963 פורסם באנגליה דוח בשם [Science School in Work Practical](#), בשיתוף פעולה של חמש אוניברסיטאות. מטרת הדוח הייתה להגדיר את מטרותיה של העבודה המעשית בהוראת המדעים. לשם כך, אספו החוקרים מידע מכ-700 מורות ומורים למדעים ב-150 בתי ספר, אשר השיבו על השאלות מהן לדעתך המטרות של שילוב עבודה מעשית בהוראה, כיצד אתה מצליח בכך ומהם הקשיים (Bennett, 2003).

חשיבותו של הדוח נובעת מראשוניותו, ומכך ששימש בהמשך בסיס לניסוח של מטרות ההוראה במעבדות ברחבי העולם (Havlíček, 2015). במחקר זה ובמחקרים עוקבים הוזכרו המטרות הבאות:

1. לעודד התבוננות מדויקת וזהירה.
2. לקדם חשיבה מדעית פשוטה על בסיס הגיון בריא.
3. לפתח כישורי ביצוע.
4. לפתח יכולת פתרון בעיות.
5. להכין את התלמידים לבחינות מעשיות.
6. להבהיר מושגים תיאורטיים.
7. לאמת עובדות ועקרונות שכבר נלמדו.
8. לעודד חשיפת עובדות באמצעות חקירה וניסוח עקרונות.
9. לעורר עניין בלמידה ולשמר אותו למשך זמן.
10. להמחיש תופעות טבע.
11. לתרגל יכולת לעקוב אחר הוראות ולבצען.
12. לפתח גישה מקצועית.
13. לפתח יכולות תקשורת ועבודת צוות.

מכלל זה, נוסחו ארבע המטרות שהמורים דירגו כחשובות ביותר:

1. לעודד התבוננות מדויקת ומעקב קפדני.
2. להציג את תופעות הטבע באופן מוחשי.
3. לחזק את ההבנה של רעיונות מדעיים.
4. לעורר עניין ולשמרו לאורך זמן (במיוחד בקרב תלמידים צעירים).

1.3 המעבדה כשחזור המחקר: מעבדה חוקרת ומעבדה מאשרת

בדור הבא של תוכניות הלימודים נשענו חוקרים ואנשי החינוך על הגותו של ג'וזף שוואב (Schwab, 1962), אשר הציע שהוראת המדעים תתנהל כמהלך של שחזור המחקר שעליו נשען תוכן השיעור. מרשל הרון (Herron, 1971) פיתח רעיון זה כאשר הגדיר שלושה שלבים מרכזיים לכל מחקר:

- ניסוח שאלת המחקר.
- בחירה בשיטת המחקר.
- ניתוח התוצאות.

כל אחד מהשלבים יכול להיות מוכתב לתלמיד בתוכנית הלימודים, או שהוא יכול להיות נתון לבחירתו. באופן כזה הבחין הרון בין ארבעה דפוסים של מחקר מעבדה, שהחלוקה ביניהם מודגמת בלוח 1.

בטור הימני מוגדרת המעבדה המאשרת או הסגורה. הכוונה היא למהלך מחקר מוכן מראש שבו תוכנית הלימודים מכתיבה לתלמידים את השאלה, את השיטה ואף את המסקנות. מעבדה כזו היא למעשה הדגמה שנועדה לאשרר לעיני התלמידים את מה שכתוב בספר הלימוד.

בטור השמאלי מוגדרת המעבדה החוקרת או המעבדה הפתוחה, שבה התלמידים בעצמם הוגים שאלה, שיטה ומסקנות. זהו למעשה המהלך המדעי החופשי, ששוואב הציע להעמיד במרכז הוראת המדעים.

לוח 1: סוגי מעבדות; לפי Herron, 1971

שלב הניסוי	מעבדה מאשרת או סגורה	סוגי ביניים		מעבדה חוקרת או פתוחה
ניסוח שאלת המחקר	נקבע בתוכנית הלימודים	נקבע בתוכנית הלימודים	נקבע בתוכנית הלימודים	נקבע על ידי התלמיד
שיטת המחקר	נקבעת בתוכנית הלימודים	נקבעת בתוכנית הלימודים	נקבעת על ידי התלמיד	נקבעת על ידי התלמיד
ניתוח התוצאות	נקבע בתוכנית הלימודים	נקבע על ידי התלמיד	נקבע על ידי התלמיד	נקבע על ידי התלמיד

בזכות הבחנות אלה גילו חוקרים את הפער בין כוונת המתכננים של תוכניות הלימודים להוביל את השיעור כמהלך מחקרי לבין היכולת לתכנן מהלך כזה הלכה למעשה: מרבית הניסויים ששולבו בהוראת המדעים היו מהסוג המאשר והסגור (Hodson, 1988). התברר כי עצם מהלך התכנון של תוכנית הלימודים צמצם את האפשרות לשלב בתוכה מעבדות פתוחות, כלומר כאלה שמאפשרות לתלמידים להתנסות במחקר מדעי. זאת משום שהתוכנית מורכבת מרצף הוראה של פרקי לימוד הנשענים זה על זה. מרגע שקובעים נושא לשיעור, מכתיבים למעשה מה יהיה הניסוי שמדגים נושא זה. זאת ועוד, מתכנן תוכנית הלימודים חייב להגדיר מהן המסקנות שאליהן יגיעו התלמידים בסוף שיעור המעבדה, שכן זהו הבסיס שישמש אותו בפיתוח השיעור העוקב (צבר בן יהושע, 1988).

1.4 הרציונל והמטרות - מבט עכשווי

בתחילת שנות האלפיים נערכו באיחוד האירופי ובארצות הברית שני דוחות מטא-אנליזה שעסקו בהלימה בין מטרות המעבדות במקצועות המדעיים לבין הביצוע של הניסויים במעבדות אלו.

בשנת 2005 פרסם האיחוד האירופי דוח בנושא שילוב מעבדות בהוראת המדעים (Séré et al., 2005). הדוח מסכם כמה מחקרים שנערכו במהלך עשר שנים על ידי קבוצות חוקרים בשבע מדינות: דנמרק, גרמניה, בריטניה, צרפת, יוון, איטליה וספרד. מטרת המחקר הייתה לעמוד "על התפקיד של המעבדות בהוראת המדעים בבתי הספר התיכוניים ובמכללות". בין השאר, כלל הדוח המשגה ומיפוי של המצב הקיים, מידע על תפיסת המדע אצל מורים ותלמידים, בדיקה מהן מטרות ההוראה במעבדה בעיני מורים והערכת תוצרים של 23 מקרי בוחן.

נדגיש כי בדוח לא מוצג ניתוח כמותי של דרכי פעולה והישגים, אלא ניתוח עיוני (אפיסטמולוגי) שנועד להבהיר ולבדל את יעדי הלמידה במעבדות, כדי לסייע בעתיד למפתחי תוכניות הלימודים.

מחברי הדוח לא מצאו הבדל בין דרך יישום ההתנסות במעבדות במדינות השונות. בכל המדינות היה שימוש רב במעבדות לצורך הוראה, רובן ככולן מעבדות מאשרות וסגורות. התלמידים עבדו בצוותים ועסקו ישירות בחומרים ובאובייקטים, ועקבו אחר הנחיות מתודולוגיות שנוסחו בידי המורה או בידי הצוות שחיבר את תוכנית הלימודים. סדרת הפעולות הייתה קריאה של הוראות עבודה, הצבת מכשירים, ביצוע ניסוי, תיעוד התוצאות בטבלאות והסקת מסקנות, והיא חזרה בכל מקרי הבוחן.

מעבדות פתוחות נמצאו נדירות ביותר, במיוחד בבתי ספר תיכוניים אולם גם בקורסים מעשיים במוסדות להשכלה גבוהה.

עוד נמצא שעל פי דעת מרבית המורים, המטרה המרכזית של הוראה במעבדה היא לקשר בין ידע עיוני לבין התנסות מעשית, כלומר להמחיש את המושגים הנלמדים בכיתה. בעדיפות נמוכה יותר ציינו המורים בתיכון שהמעבדה נועדה לתרגול מיומנויות ניסוי וכן לטיפול דרך החשיבה המדעית.

כאשר נשאלו המורים איזו טכניקת מעבדה טובה יותר, הם ציינו כי מעבדה פתוחה שהתלמידים מובילים בעצמם מתאימה יותר להשגת מטרות הלמידה מאשר מעבדה סגורה שבה התלמידים עוקבים אחר דף הוראות או מעבדה שבה המורה מדגים את הניסוי. עם זאת, כאמור, בפועל רוב המעבדות התנהלו על פי הדגם הסגור.

תפיסת המדע של התלמידים נמצאה בלתי יציבה, כלומר תלמידים שיקפו בתשובותיהם עמדות שונות ואף מנוגדות. תפיסותיהם נעו בין שתי עמדות קיצון: תפיסה אחת הוגדרה "ממוקדת נתונים", ולפיה תוצאות של מדידות הן תיאור מהימן של תופעה בטבע; תפיסה מנוגדת הוגדרה "רליטיבית רדיקלית", ולפיה לא ניתן להעריך ידע מדעי במונחים של יחידות מידע.

בהקשר זה נמצא כי במחצית מזמן שהותם במעבדה התלמידים עוסקים במדידות, ורק בעשרה אחוזים מהזמן הם משוחחים ביניהם על מושגים מדעיים. למעשה נמצא במחקרים כי ביצוע המדידות כשלעצמו, וכן שאר העבודה הטכנית כגון הצבת המכשירים, אינם תורמים לטיפול חשיבה מדעית. התלמידים מבצעים את מה שהורו להם לבצע ואינם קושרים בהכרח בין רצף הפעולות לבין התפיסה המדעית העומדת מאחוריהם.

כדוגמה לתיקון מצב זה מובא מקרה שבו שאל מורה את התלמידים שאלות שהצריכו חשיבה מעמיקה תוך כדי עבודה. למשל, לאחר הצבת המכשירים ובטרם הפעלתם נשאלו התלמידים מה הם מצפים שיהיו התוצאות. שאלות כאלה קושרות בין הפעולה הטכנית לבין משמעותה הלימודית העמוקה.

בסיכום המליצו מחברי הדוח על קיום מעבדות פתוחות לטובת שלוש מטרות:

- 1. הבנה של ידע מדעי**, כלומר למידה של מודלים ותיאוריות מדעיות. לשם כך יש להגדיר בתוכניות הלימודים בצורה מדויקת יותר איזו תיאוריה מדעית נלמדת בכל מעבדה ולמקד את שאלות ההכוונה של המורים בהתאם.
- 2. פיתוח יכולות ומיומנויות מחקר**. בתחום זה מחברי הדוח ממליצים להוסיף לתוכנית הלימודים פרק העוסק בטכניקות לעיבוד מידע.
- 3. פיתוח תפיסה מדעית**. החוקרים קובעים שקשה לבודד את השפעת המעבדה על פיתוח התפיסה המדעית מתוך השפעת כלל לימודי המדעים. עם זאת, הם קובעים כי ניכרת תרומה של שיעורי המעבדה להבנת התלמידים את ההליך הנדרש בעת חקירה אמפירית.

בשנת 2006 פרסמה האקדמיה הלאומית למדעים **בארה"ב** דוח ועדה מיוחדת, שבחנה את שילוב המעבדות בהוראת המדעים בבתי הספר התיכוניים (Singer et al., 2006). הוועדה מצאה כי למרות ההשקעה המסיבית בתכנון לימודי המדעים, במשך שלושים שנה (משנת 1969 ועד 1999), לא חל שיפור כלשהו באוריינות המדעית של בוגרי התיכונים בארה"ב. זאת למרות שבכל התקופה שולבו לימודים במעבדות בהוראת הפיזיקה, הכימיה והביולוגיה בהיקף של לפחות שעה בשבוע, ולמרות הבטחות המומחים שהדבר אמור להביא לשיפור הרצוי.

הוועדה הגדירה "התנסות במעבדה" כהתנסות המאפשרת לתלמידים מפגש בלתי אמצעי (אינטראקציה) עם העולם החומרי (או עם מידע הנובע ממנו) תוך כדי שימוש במכשירים, בטכניקות לאיסוף מידע, במודלים מדעיים ובתיאוריות מדעיות.

בשונה מההמלצות שנכללו בדוח שפרסם **האיחוד האירופי** בשנת 2005, הוועדה המליצה על לפתח יחידות לימוד שבהן יוגדרו מראש תוצרי למידה ברורים, מתוך קשר חזק בין המעבדה לבין התוכן הנלמד בכיתה. במובן זה, הם ממליצים על שיעורי מעבדה סגורים, שבהם הכול נקבע מראש בתוכנית הלימודים. נוסף על כך, מובאת המלצה לפתח בתוכניות הלימודים יחידות לימוד אינטגרטיביות, שיש בהן שילוב מתוכנן של מתודות הוראה שונות כגון הרצאה, התנסות במעבדה, קריאה, דיונים ורפלקציה.

כאשר בוחנים מטרות מוצהרות של תוכניות לימודים כיום ניתן עדיין לזהות את הפער בין הגישה הפתוחה, שאלה שואפים כפי שיתואר להלן באנגליה ובקנדה, לבין הגישה הסגורה שאלה שואפים בארה"ב:

בתוכנית הלימודים במדע באנגליה לדרגה 4 (המקבילה לכיתות ט'-י'), נכתב כי מדע יש להורות בדרך שתבטיח שהתלמידים ירכשו את הידע הנחוץ כדי לאפשר להם לפתח התעניינות בעולם הטבע, תובנות לגבי עבודת המדענים והערכה של הרלוונטיות של המדעים לחיי היום-יום. בתוכנית מפורטות מטרותיה של הוראת המדעים:

1. פיתוח ידע מדעי והבנה דרך תחומי הדעת ביולוגיה, כימיה ופיזיקה.
2. פיתוח הבנה של טבעו, מהלכיו ושיטותיו של המדע, באמצעות סוגים שונים של חקירה מדעית אשר יסייעו לתלמידים לענות על שאלות מדעיות על העולם הסובב אותם.
3. פיתוח ויישום מיומנויות פעולה, תצפית, יצירת מודלים, חקירה ופתרון בעיות וכן מיומנויות מתמטיות - במעבדה, בשדה (כלומר, בשטח, במהלך סיורים בחוץ) ובסביבות לימוד אחרות.
4. פיתוח היכולת להעריך טענות מבוססות מדע באמצעות חשיבה ביקורתית על השיטה, על הממצאים ועל המסקנות, בגישה האיכותנית ובגישה הכמותית.

בתוכנית הלימודים בפיזיקה לבית הספר התיכון **בקולומביה הבריטית בקנדה**, מוזכרת המעבדה בחלק העוסק בכישורים (מיומנויות). תחת הכותרת "יכולת תכנון וביצוע" נכתב כי על התלמידים להיות מסוגלים לתכנן, לבחור ולהשתמש בשיטות מחקר מתאימות, כולל מחקר שדה וניסויים במעבדה, כדי לאסוף נתונים מהימנים, כמותיים ואיכותניים. עליהם להיות מסוגלים לעשות זאת בעבודה פרטנית או שיתופית.

בתוכנית הלימודים להוראת פיזיקה **בפלורידה, ארה"ב** (לכל 12 שנות הלימודים) נכתב:

חקירות במעבדה הכוללות גיבוש שאלה מדעית, מחקר, מדידות, פתרון בעיות, שימוש במכשירים ובטכנולוגיה, הליך ניסויי והוראות בטיחות, הן חלק בלתי נפרד מתוכנית הלימודים. האיגוד הלאומי של מורי המדעים (NSTA) ממליץ שלאורך הלימודים בתיכון כל התלמידים ישתמשו במעבדה או בשדה לצורך איסוף מידע מדי שבוע.

המועצה הלאומית למחקר (NRC) מגדירה עבודות חקר במעבדה בבית הספר כהתנסות

במעבדה, בכיתה או בשדה אשר מספקת לתלמידים הזדמנות לקיים קשר בלתי אמצעי עם תופעות טבע או עם מידע הנאסף על ידי אחרים, תוך כדי שימוש בכלים, בחומרים, בשיטות איסוף מידע ובמודלים.

עבודות חקר מעבדה בבית הספר התיכון צריכות לסייע לתלמידים לחוות את המורכבות של העבודה האמפירית, וגם לפתח את הכישורים לכייל ציוד ולפתור בעיות המתעוררות בעת שימוש בו בביצוע תצפיות. תלמידים צריכים להבין שגיאות במדידה ולרכוש את הכישורים הנדרשים כדי לקבץ, לפרש ולהציג את המידע המתקבל.

1.5 מחקרי הערכה על סוגי המעבדות ומטרותיהן

מן המחקר עולה שביצוע מעבדות פתוחות משרת טוב יותר את מטרות ההוראה. עם זאת, וכפי שכבר הוזכר, יש פער בין הכוונות של מפתחי תוכניות הלימודים לבין האפשרות ליישמן בשטח ולאפשר למידה במעבדות חקר פתוחות.

במחקר על סטודנטים בקורס פיזיקה במכללה בארה"ב דיווחו הסטודנטים שהם לא היו שותפים כלל לקבלת החלטות כלשהן הנוגעות לניסויים במעבדות. נמצא כי החשיבות שייחסו לניסויים בפיזיקה לאחר הקורס הייתה נמוכה יותר מזו שייחסו להם לפניו (Holms et al., 2017). מסקנה דומה נמצאה במחקר קודם, שלפיו סטודנטים לפיזיקה שמבצעים רק ניסויים סגורים ומובנים חשים תחושת מסוגלות נמוכה ותחושה נמוכה של בעלות על ידע (Stanley et al., 2015). בשני המאמרים מדובר בפרקי הלימוד הבסיסיים הנלמדים גם בתיכון - אופטיקה ומכניקה.

במחקר המשך, בחנו הולמס ווימן (Holmes & Wieman, 2018) את תוכנית הלימודים בפיזיקה בתשע מכללות בארה"ב. בחמישה קורסים לתואר ראשון שולבו מעבדות, אולם כולן היו מעבדות מאשרות שנועדו לחזק את ההבנה של המושגים שנלמדו בכיתות. אין פירוט במחקר לגבי התכנים שנלמדו, אולם ניתן להבין כי מדובר בפרקי לימוד בסיסיים. בבדיקת הישגיהם של כ-3,000 סטודנטים לא נמצא הבדל בהבנת התכנים שנלמדו בין סטודנטים שלמדו בקורסים עם מעבדות מאשרות לבין אלה שלמדו בקורסים ללא מעבדות כלל.

בעקבות המחקרים של הולמס ואחרים נטען שיש הצלחה גדולה יותר בפיתוח תפיסה מחקרית ומיומנויות מחקר אצל התלמידים כאשר קורס המעבדה הוא עצמאי, כלומר אינו משולב בקורס עיוני ואינו מיועד לאמת את המושגים שנלמדים בכיתה.

וילקוקס ולבנדובסקי (Wilcox & Lewandowski, 2017) הציעו במחקרם שפיתוח תפיסה מדעית בקרב תלמידות ותלמידים מושג באופן עקיף מתוך מטרות אחרות: הרחבת הידע המדעי ופיתוח מיומנויות מחקר. הם ערכו מחקר רב היקף שנועד לבחון איזו משתי המטרות תורמת יותר לפיתוח תפיסת התלמיד כמדען מומחה בתחום הפיזיקה הניסויית.

במחקר הם בחנו קרוב לחמשת אלפים סטודנטים הלומדים במכללות ובלימודי תואר ראשון אוניברסיטאי, שלמדו במסגרת 147 קורסים שונים לפיזיקה שכללו שימוש מחקרי במעבדות. בשלב ראשון נשאלו הסטודנטים אם לדעתם המעבדות ששולבו בקורס נועדו לתרגול מיומנויות מחקר או להרחבת הידע המדעי. סטודנטים שהשתתפו ב-50 קורסים השיבו שהמעבדות התמקדו בפיתוח מיומנויות, סטודנטים מ-19 קורסים השיבו שתפקיד המעבדות היה להרחיב את הידע שלהם, וסטודנטים מ-78 קורסים ענו שהשימוש במעבדות שירת את שתי המטרות.

סטודנטים שהשתתפו בקורסים הממוקדים במיומנויות נשאלו לגבי היקף הביצוע של פעילויות מחקר שונות במהלך הקורס: אימות עיקרון שנלמד בכיתה, ניסוח שאלה, עבודה בצוות, בניית מודל מתמטי, כימות אי ודאות, כתיבת דוח מעבדה ועוד.

במחקר נמצא כי ככל שהקורס התמקד יותר במיומנויות מעבדה ופחות בלמידה של מושגים, כך השתפרה תפיסתם המדעית-ניסויית של התלמידים, על פי השוואה בין מועדי הבדיקה לפני הקורס ואחריו. מכאן הסיקו החוקרים ששימוש במעבדות לצורך פיתוח מיומנויות מחקר תורם יותר מכל גישה אחרת לטיפול תפיסת "מדען מומחה", המזהה את הפיזיקה כמדע ניסויי.

לסיכום, נראה שיש הסכמה רחבה ורבת שנים בדבר החשיבות העקרונית של שילוב שיעורי מעבדה בהוראת פיזיקה. אומנם לעיתים המטרות מוגדרות בכלליות, כלומר שלא בדרך שמכוונת לפעולה ברורה מצד המורים, אולם בסופו של דבר חוזרות ועולות שלוש מטרות מרכזיות של ההוראה במעבדות:

1. המחשה של ידע מדעי שנלמד במסגרת תוכנית הלימודים. המטרה היא הבנה של המושגים הנלמדים, בהתאם לפרקי הלימוד ובאמצעות הפעילות הניסויית במעבדה.

2. התנסות במחקר. המטרה היא ללמוד ולתרגל מיומנויות חקר ועבודה במעבדה. חלקן מיומנויות חשיבה כגון ניסוח שאלת מחקר, ארגון ועיבוד נתונים או הסקת מסקנות; וחלקן מיומנויות פעולה כגון הצבת מכשירים, ביצוע הפרוצדורה של הניסוי ומדידות.

3. יישום או שיקוף של החשיבה המדעית. המטרה היא לפתח תפיסה מדעית, כלומר, יכולת להגיע באמצעות איסוף ממצאים שיטתי להכללות לגבי החוקיות העומדת בבסיס תופעות הטבע.

בהקשר של יישום המטרות, מקורות המידע שנסקרו מצביעים על קושי מרכזי המוכר שנים רבות. כותבי תוכניות הלימודים לא מצאו את הדרך לבנות שיעורי מעבדה שבהם התלמידים אכן מתנסים במחקר פתוח, על כל משמעויותיו, ולא רק עוקבים אחר רשימת הוראות לביצוע. נראה כי רוב הניסויים המשולבים בתוכניות הלימודים הם סגורים ומוֹבְּנִים, מהסוג שהוגדר "מעבדה מאשרת". ניסויים כאלה לא נמצאו כתורמים לפיתוח חשיבה מדעית ולרכישת מיומנויות מדעיות, והם אף עלולים לפגוע בהבנת התלמידים את הפיזיקה כמדע ניסויי.

מכלל הדברים עולות שתי המלצות:

1. להתמקד במטרה של פיתוח מיומנויות מחקר, מתוך הבנה כי מטרה זאת תשרת בצורה הטובה ביותר גם את שתי המטרות האחרות - רכישת ידע ופיתוח תפיסה מדעית.

2. לפתח מעבדות חקר פתוחות, שמטרתן אינה רק המחשה של מושגים הנלמדים בכיתה. כאמור, ככל שתוכנית הלימודים מוגדרת בצורה הדוקה יותר, כך שיעור המעבדה יהיה סגור יותר. לכן, התנסות במעבדות פתוחות מחייבת גם שחרור מהתכנון המקדים הנהוג בתוכניות הלימודים.

- בייקון, פ' (1615, 1984). *אטלנטיס החדשה*. תל אביב: הקיבוץ המאוחד.
- גרטל, ג' (2010). *דרך הטבע, הפדגוגיה הטבעית והטיול החינוכי*. בני ברק: ספריית הפועלים.
- דיואי, ג' (1915, 1960). *דמוקרטיה וחינוך, מבוא לפילוסופיה של החינוך*. ירושלים: ביאליק.
- צבר בן יהושע, נ' (1988). *תכנית לימודים בגלגוליה*. תל אביב: יחדיו.
- Armstrong, H. E. (1903). *The teaching of scientific method and other papers on education*. London: Macmillan.
- Bennett, J. (2003). *Teaching and learning science: A guide to recent research and its applications*. London & New York: Continuum.
- Bloom, B. S., Engelhart, M. D., Furst, E. J., Hill, W. H., & Krathwohl, D. R. (1956). *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain*. New York: David McKay Company.
- Havlíček, K. (2015). [Experiments in physics education: What do students remember?](#). *WDS 2015 Proceedings of Contributed Papers–Physics*, 144-148.
- Herron, M. D. (1971). The nature of scientific inquiry. *School Review*, 79(2), 171-212.
- Hodson, D. (1988). Experiments in science and science teaching. *Educational Philosophy and Theory*, 20(2), 53-66.
- Holmes, N. G., Olsen, J., Thomas, J. L., & Wieman, C. E. (2017). Value added or misattributed? A multi-institution study on the educational benefit of labs for reinforcing physics content. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 1-12.
- Holmes, N. G., & Wieman, C. E. (2018). Introductory physics labs: WE CAN DO. *Physics Today*, 71, 1-38.
- Otero, V., & Meltzer D. (2017). The past and future of physics education reform. *Physics Today*, 70, 5-50.
- Schwab, J. J. (1962). The teaching of science as inquiry. In J. J. Schwab & P. E. Brandweine (Eds.), *The teaching of science*. Cambridge, Mass: Harvard university press.
- Séré, M. G., Leach, J., Niedderer, H., Psillos, D., Tiberghien, A., & Vicentini, M. (2005). *Lab work in science education – final report*. The European Commission: Targeted Socio-Economic Research Programme.
- Singer, S. R., Hilton, M. L., & Schweingruber, H. A. (2006). *America's lab report: Investigations in high school science. Committee on high school science laboratories: Role and vision*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Squire, S. L. (2019). Efficacy of a Physics Laboratory Model Centered on Scientific Reasoning. Thesis for Master of Science, California State University.
- Stanley, J. T., Dounas-Frazer, D. R., Kiepora, L., & Lewandowski, H. J. (2015). *Investigating student ownership of projects in an upper-division physics lab course*. Physics Education Research Conference. Sacramento, CA: 336-339.
- Wilcox, B. R., & Lewandowski H. J. (2017). [Developing skills versus reinforcing concepts in physics labs: Insight from a survey of students' beliefs about experimental physics](#). *Physical Review Physics Education Research* 13(1), 010108 (1-9).

2. הציוד המשמש בהוראת פיזיקה במעבדות

בחלק זה נסקור מאמרים אחדים המציגים את החשיבות של בחירת המכשירים והאמצעים במעבדות לפיזיקה, את תפקידם של המכשירים ואת השיקולים בעד ונגד שילוב מעבדות וירטואליות בהוראת פיזיקה ניסויית.

במאמרים אחדים מצאנו את הציטוט: "ההיסטוריה של מדע הפיזיקה היא במידה רבה ההיסטוריה של המכשירים והשימוש המושכל בהם" (Muller, 1940). דוגמה לכך היא פיתוח הטלסקופ והתצפיות על ירחי כוכב צדק שביצע גלילאו בשנת 1610. המכשיר והשימוש בו פתחו את השער למדע האסטרונומיה המודרני.

מכשירים, מודלים ודגמים שנועדו להמחיש תופעות מן העולם האמיתי היו פופולאריים כבר בראשית המאה ה-19, אך שימוש במכשירים לצורך הוראה נעשה נפוץ רק במחצית המאה ה-20.

2.1 המכשירים והשפעתם על הלמידה

המכשירים הם גורם המתווך בין התופעות בעולם האמיתי לבין התלמידים. מדידה של משתנים כגון מהירות או טמפרטורה ממחישה לתלמידים את התוכן הנלמד. למשל, כאשר חפץ נע בעולם האמיתי אנו רואים את שינוי המיקום שלו, אבל לא בהכרח ערים למהירותו, לתאוצה שלו או לכבידה ולחיכוך הפועלים עליו. המכשירים חושפים ומבליטים את המדדים השונים, ובעזרתם התלמידים לומדים יותר ממה שניתן ללמוד בהסתכלות ללא מכשירים (Bernhard, 2007).

עם זאת, המבט "דרך" המכשירים אינו חסר השפעה. המכשירים לא רק מציגים מידע שלא ניתן לראות בלעדיהם, אלא גם מסיטים את המבט לכיוון מסוים, ובמובן מסוים הם אף "מייצרים" את התופעה.

דוגמה להשפעה של המכשירים על הלמידה הוצגה במחקר שערך ברנהרד (Bernhard, 2018). במחקר הושושו שלוש קבוצות של תלמידים, שכל אחת מהן ערכה ניסוי אחר במסגרת למידה על כוחות ותנועה:

1. ניסוי שבו דאון נע על מסילת אוויר (אמצעי לביטול חיכוך בניסויים בתחום האווירונאוטיקה). התנועה מתועדת כאשר הדאון עובר בשתי נקודות שבהן מוצבות מצלמות. התלמידים מקבלים מידע על מועד המעבר בנקודות הצילום ומשלימים על פיו את תיעוד מסלול התנועה.
2. ניסוי שבו עגלה נעה על מסילה משופעת. התנועה מתועדת באמצעות סימן דיו שהעגלה מותירה במרווחי זמן קבועים על גבי נייר הפרוס לאורך המסילה. התלמידים מקבלים רצף של כעשר נקודות, והמרחקים המשתנים ביניהן מעידים על שינוי מהירות התנועה.
3. ניסוי דומה של עגלה הנעה על מסילה משופעת, אולם כאן התנועה מתועדת באמצעות גלאי המעביר מידע רציף למחשב. התלמידים רואים במסך המחשב את גרף התנועה של העגלה בזמן אמת.

צוותי התלמידים הוקלטו בווידאו בזמן שערכו את הניסויים, והשיחות ביניהם תומללו ונותחו. המחקר הראה שהצוות הראשון, שהניסוי שביצע המחיש את התנועה ברמה הנמוכה ביותר, אכן עסק פחות במושגים הנלמדים. כמו כן, הצוותים הראשון והשני היו עסוקים במרבית הזמן בהתייחסות להיבטים הטכניים של ביצוע הניסוי, בעוד הצוות השלישי - שחבריו ראו לנגד עיניהם בזמן אמת את גרף התנועה - הקדיש את מרבית זמן העבודה במעבדה לשיחה על מאפייני התנועה. במילים אחרות, בעוד שני הצוותים הראשונים היו עסוקים בנקודות, הצוות השלישי היה עסוק

בתמונה הגדולה שהן מרכיבות.

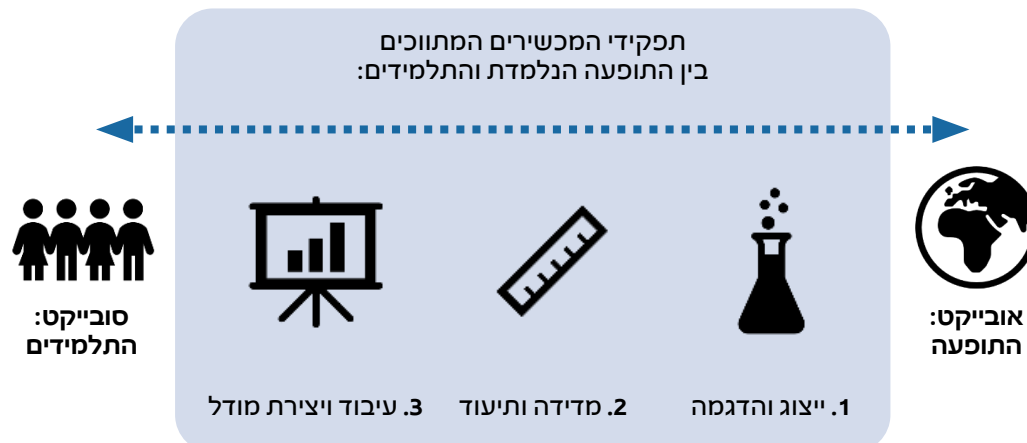
המסקנה העולה מהדברים היא שעל המורים לפתח מודעות להשפעת המכשירים על תהליכי החשיבה ועל הלמידה במעבדה. עליהם לבחור את המכשירים רק לאחר שניתחו והבינו מה המכשירים ממחישים.

2.2 תפקידי המכשירים

כפי שהוזכר, המכשירים הם מדיום מתווך בין התלמידים (סובייקט) לבין התופעה הנלמדת (אובייקט). ביתר פירוט, ניתן לזהות שלוש קטגוריות מרכזיות של תפקידי המכשירים והאמצעים (Kyza et al., 2009):

1. ייצוג, הדגמה והמחשה של התופעה הנחקרת. בקטגוריה הזו נכללים מכשירים כגון עגלה, מגלשה, כדור ומנוע, הנבחרים בהתאם לפרק הלימוד.
2. מדידה ותייעוד של התופעה, כלומר של מדדים שונים שלה. כאן נכללים מכשירים כגון מד-חום, סרגל מרחק, מד-זרם (אמפרמטר) וכן הלאה.
3. מיון, עיבוד, הכללה למודל והצגת המידע שנאסף מהתופעה. בקטגוריה הזו נכללים מכשירים כגון טבלאות, מחולל גרפים, כלים לחישוב סטטיסטי וכדומה.

איור 1: תפקידי המכשירים במעבדה (מעובד לפי Bernhard, 2007)



2.3 המעבדה הווירטואלית

בשנים האחרונות התפתחה האפשרות לקיים ניסויים במדיה דיגיטלית. בספרות המחקר העכשווית יש מאמרים רבים העוסקים בהגדרת טיבה של המעבדה הווירטואלית ובהשוואתה למעבדה בסביבת הלימוד הרגילה.

באופן כללי, המעבדה הווירטואלית נתפסת בעיני התלמידים כאטרקטיבית יותר, ומבחינת בית הספר יש לה יתרונות רבים כגון הוזלת עלויות, נוחות שימוש, נגישות וזמינות. עם זאת, אין הוכחה מחקרית לאפקטיביות של המעבדה הווירטואלית בהוראת מושגים בפיזיקה.

כמה מושגי יסוד משמשים בספרות המחקר בדיון על המעבדה הרגילה והמעבדה הדיגיטלית. נתעכב על ביאור המושגים ואלו ישמשו אותנו בהמשך הדיון.

המעבדה הרגילה מתוארת בספרות המחקר בכמה מונחים:

- traditional lab - מעבדה מסורתית.
- hands on lab - מעבדה המבוססת על עבודה ידנית.
- real laboratories וכן reality learning environment - מעבדה ריאלית או ממשית.

בספרות המחקר משמשים המונחים הבאים בדיון על מעבדות הדיגיטליות:

- מעבדה וירטואלית - מעבדה שבה המכשירים הנדרשים לייצוג התופעה, למדידת המשתנים ולעיבוד הממצאים מתוכנתים על גבי מדיה דיגיטלית.
- הדמיה (סימולציה) ממוחשבת - כינוי לרכיב ההמחשה של התופעה, כגון שינוי מהירות ההתקדמות של עגלה לנוכח שינוי השיפוע. המונח מעבדה וירטואלית הוא מונח מקיף יותר הכולל מספר רב של הדמיות, נוסף על שליטה במשתנים ובכלי מדידה.
- מעבדה מרחוק (laboratory remote) - מעבדה וירטואלית שבה החומרה והתוכנה נמצאות מחוץ לבית הספר, והתלמידים מתחברים אליה דרך רשת האינטרנט.

המעבדות הווירטואליות נבדלות זו מזו בטיב ההמחשה של התופעה (visualization), בהיקף השליטה של התלמידים במשתנים של כל ניסוי (כגון שינוי טמפרטורה, שיפוע, מתח חשמלי וכדומה), ובאיכות ממשק המשתמש (Mackay & Fisher, 2014).

לדוגמה, בניסוי מתוך אתר virtlabs בנושא תנועה (ראו איור 2), התלמידים יכולים לקבוע את משקל העגלה הנעה על גבי המסילה ואת משקל המשקולת המושכת אותה מימין. במסך המחשב שבמרכז הם יכולים להציג את גרף המהירות או את גרף התאוצה, לבחירתם.



2.3.1 חסרונות ויתרונות של מעבדה וירטואלית

החיסרון המרכזי במעבדה הווירטואלית הוא שהתלמידים אינם מתנסים בטכניקות העבודה עם כלים ומכשירים, כגון החזקת האובייקטים וכלי המדידה והצבתם במקום המתאים, זהירות והקפדה על כללי בטיחות והתמודדות עם טעויות הנובעות משימוש לא מדויק בכלים ובמכשירים. חיסרון זה עלול לפגוע בפיתוח מיומנויות החקר והניסוי, שהוא אחת המטרות המרכזיות של ההוראה

במעבדות. על כן מומלץ לשלב שימוש במעבדות וירטואליות וממשיות, כפי שיורחב בהמשך (Chin et al., 2017).

לשימוש במעבדה וירטואלית יתרונות רבים:

1. בטיחות עבודה.
2. אפשרות להדגים מצבים קיצוניים או תופעות שלא ניתן לשחזר בכיתה.
3. אפשרות להציג תרחישים מרובים ולשנות מספר רב של משתנים.
4. זמינות מוגברת, שכן לא נדרשים חומרים מתכלים.
5. יכולת לחזור על ניסוי פעמים רבות.
6. אפשרות לתקן את ערכי המשתנים במהלך הניסוי תוך כדי ניסוי וטעייה.
7. איסוף נתונים מדויק.
8. עיבוד הנתונים בזמן אמת, לרבות אפשרות להשוואה בין צוותי מחקר שונים.
9. חיסכון רב בזמן במהלך ההתארגנות, הביצוע ועיבוד המידע.
10. נגישות לתלמידים עם מוגבלויות תנועה ומוגבלויות אחרות.
11. הפחתה של נטל הניהול והעבודה המוטל על המורים וטכנאי המעבדות.

נוסף על אלה, למעבדה וירטואלית המתאימה לעבודה מרחוק יתרונות נוספים:

1. חיסכון כספי. רכישת מנוי זולה יותר מרכישת ציוד למעבדה ממשית.
2. יכולת לבצע את הניסויים בכל עת ומכל מקום (תלוי באמצעי הקצה).
3. קצב התקדמות שאינו תלוי במשך השיעור ולכן מותאם לצרכים של כל תלמיד.
4. אפשרות לעבודה משותפת עם תלמידים מבתי ספר אחרים ואף מארצות שונות.

2.3.2 טלפונים חכמים כמכשירי קצה

היתרונות של המעבדה הווירטואלית המתאימה ללמידה מרחוק באים לידי ביטוי בצורה הטובה ביותר כאשר התוכנה מאפשרת שימוש בטלפונים חכמים כאמצעי קצה. הטלפון החכם, שממילא מצוי ברשותם של חלק מהתלמידים, מוזיל את העלויות של הפעלת המעבדה. כמו כן, התלמידים יכולים להתנסות בעבודה במעבדה מכל מקום ובכל עת, ולהמשיך "לשחק" במשתנים שבניסוי ככל שירצו (Mutton et al., 2019).

השימוש בטלפונים חכמים מאפשר גם שימוש במציאות רבודה, אשר מגבירה את ממד ההמחשה של התופעה ואת שליטת התלמידים במשתני הניסוי. בניסוי שערכו פרנק וקפילה (Frank & Kapila, 2017) השתמשו 75 סטודנטים לתואר ראשון בטלפונים חכמים כאמצעי התקשורת עם מעבדה וירטואלית רחוקה. המעבדה הדגימה עקרונות של מערכות בקרה של מנוע זרם ישר ושילבה טכניקה של מציאות רבודה עם שימוש במעבדה הווירטואלית. החוקרים סיכמו כי "השימוש בייצוגים מרובים של תופעה מדעית הוכח כתואם באופן יעיל לשונות בסגנונות הלמידה ובהעדפות של תלמידים שונים".

2.3.3 הערכת אפקטיביות הלמידה במעבדה וירטואלית

מחקרים אחדים בחנו את הישגי התלמידים ואת עמדותיהם כלפי ניסויים במעבדות וירטואליות. על פניו ניכרת העדפה של התלמידים לשימוש במעבדה הווירטואלית, בשל היתרונות שהוזכרו לעיל. עם זאת, נראה שאין הבדל משמעותי בהישגים הלימודיים, וייתכן שחלק מהעמדות החיוביות קשורות לאטרקטיביות של השימוש באמצעים הדיגיטליים ולא דווקא לתוכן הנלמד.

באחד המחקרים נבדקו 42 סטודנטים לתואר ראשון שלמדו בקורס פיזיקה את הפרקים אלקטרוניקה ואופטיקה (Asiksoy & Islek, 2017). הקורס כלל חמישה מפגשי מעבדה שבהם בוצעו ניסויים שעסקו בתחומים הבאים: חוק אוהם, חוקי קירכהוף, טעינה ופריקה של קבל, חוט מוליך ושדה מגנטי של סליל. מחצית התלמידים ביצעו את הניסויים במעבדה ממשית והאחרים במעבדה וירטואלית.

במבחן עמדות שנערך בסיום הקורס נמצאו עמדות חיוביות יותר אצל התלמידים שהתנסו במעבדה הווירטואליות. התלמידים ציינו את היתרונות של המעבדה הווירטואלית כפי שהוזכרו לעיל, ובמיוחד את היכולת לבצע את הניסוי מספר רב של פעמים, את היכולת לתכנן ניסויים חדשים ולשנות את המשתנים, ואת מניעת הטעיות הנובעות משגיאות בתיעוד המידע.

במחקר אחר נבדקו עמדות התלמידים ונכונותם לעבוד בצוות בעת שימוש במעבדה מרחוק (Evangelista, 2017). 37 תלמידי תיכון למדו את נושא החשמל, ובמהלכו שולבו ארבע התנסויות במעבדה במערכת [VISIR](#), המאפשרת ניסויים מגוונים במעגלים חשמליים. התלמידים התקשרו עם המערכת באמצעות 13 מחשבים שהיו בכיתה, בצוותים של שלושה תלמידים.

מערכת הבקרה של המעבדה מרחוק הראתה כי שלושה צוותים של תלמידים נכנסו למערכת גם מחוץ לזמן השיעורים כדי להשלים את הניסויים. בשאלון העמדות הראו התלמידים התלהבות רבה מהמערכת, ו-97 אחוזים מהם המליצו להשתמש בה גם בעתיד. כמו כן, העבודה המשותפת עם תלמידים אחרים מול מסך המחשב זכתה להתייחסות חיובית ביותר.

נקודה מעניינת שעלתה במחקר זה היא שרבים מהתלמידים התעניינו כיצד עובדת מערכת ההדמיה הממוחשבת. נקודה זו התבררה גם במקרים נוספים והיא מלמדת כי חלק מהעמדות החיוביות קשורות לאטרקטיביות של תוכנות ההדמיה (כלומר לאמצעי) ולא בהכרח לעניין בתוכן הנלמד (Concari & Marchisio, 2013).

בשונה מהאמור עד כה, במחקר שבחן הישגי סטודנטים לתואר ראשון בתחום התוכן, כלומר שליטה במושגים הכלולים בתוכנית הלימודים בפיזיקה, לא נמצא הבדל בין אלה שהתנסו במעבדה ממשית לבין אלה שהתנסו במעבדה וירטואלית (Hawkins & Phelps, 2013).

2.4 שילוב סביבות לימוד: ממשית ווירטואלית

מחקרים מצביעים על יתרון לשימוש משולב במעבדה וירטואלית ובמעבדה ממשית. לדוגמה, במחקר שהשתתפו בו תלמידי תיכון נעשה שימוש במעבדה וירטואלית בשיעור הכנה למעבדה ממשית (Chin et al., 2017). 50 תלמידים למדו את נושא התנועה. מחצית מהם עברו שיעור הכנה למעבדה, שבו המורה הסביר את מה שעומדים לנסות במעבדה, ומחצית מהם קיבלו בשיעור ההכנה אפשרות להתנסות בהדמיה המוכרת בשם: "[the moving man](#)". בהדמיה זו התלמידים מניעים דמות על גבי המסך, ומקבלים בזמן אמת את גרף התנועה ביחס לזמן, גרף המהירות וגרף התאוצה.

לאחר שיעורי ההכנה, השתתפו כל התלמידים בשיעור במעבדה ממשית, לפי תוכנית הלימודים. במבחן המסכם קיבלו התלמידים שהתנסו בהדמיה ציונים מעט יותר טובים, אולם לא נצפה הבדל מובהק, כנראה עקב המדגם הקטן. בראיונות עם התלמידים העידו רובם כי ההדמיה במחשב סייעה להם להבין את המושגים שהומחשו במעבדה.

אחד האתגרים המוכרים בהוראת פיזיקה הוא התפיסות המוטעות של מושגים מדעיים בכלל, ושל מושגים בתחום הכוחות והתנועה בפרט (Tomara et al., 2017). מניתוח של 136 מחקרים שפורסמו במהלך עשרים השנים קודם לכתובת מאמרם, החוקרים מסיקים כי שילוב מעבדות ממשיות ווירטואליות הוא מהלך נכון שיכול לסייע לתיקון תפיסות מוטעות. הסיבה לכך היא

שתפיסה מוטעית נובעת מקישור המושג המדעי לדוגמה אחת המוכרת לתלמידים. כדי לערער על המוכר יש להציע לתלמידים מגוון רב ככל שניתן של התנסויות. ככל שהתלמיד ייחשף לדוגמאות שונות ורבות, כך יגדל הסיכוי כי הוא ישתחרר מהדוגמה האחת הכובלת את תפיסתו, ויבנה תפיסה נכונה של המושג הנלמד.

בשונה ממסקנה זאת, במחקר אחר לא נמצא יתרון לשילוב. 240 סטודנטים לתואר ראשון בקורס פיזיקה חולקו לארבע קבוצות עבודה במעבדה בנושא חום וטמפרטורה: קבוצה אחת התנסתה בשימוש במעבדה ממשית, קבוצה שנייה התנסתה במעבדה וירטואלית, קבוצה שלישית התנסתה בשילוב מעבדה וירטואלית וממשית וקבוצת ביקורת לא התנסתה במעבדה כלל. בבדיקת הישגי התלמידים נמצא כי כל סוגי המעבדות היו יעילים באותה מידה, ושלוש הקבוצות שהתנסו בהם הגיעו להישגים גבוהים יותר מאלה של קבוצת הביקורת שלא התנסתה במעבדות (Zacharia & Olympiou, 2011).

לסיכום, על המורים להיות מודעים להשפעה של המכשירים על תהליכי החשיבה והלמידה בשיעורי המעבדה. בשנים האחרונות נפתחה האפשרות להשתמש במעבדות וירטואליות. למעבדות אלה, ובמיוחד למעבדות וירטואליות המתאימות ללמידה מרחוק באמצעות שימוש בטלפונים חכמים כמכשירי קצה, יתרונות רבים, בעיקר זמינות ונגישות. עם זאת, הן אינן מאפשרות עבודה ממשית (עבודת ידיים) עם חומרים, כלים ומכשירים.

מכאן עולה ההמלצה על שימוש משולב: מעבדה וירטואלית כהכנה למעבדה ממשית.

מקורות

Asiksoy, G., & Islek, D. (2017). [The impact of the virtual laboratory on students' attitude in a general physics laboratory](#). *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, 13(04), 20-28.

Bernhard, J. (2007). Humans, intentionality, experience and tools for learning: Some contributions from post-cognitive theories to the use of technology In Physics Education. Physics education research: Cognitive science and physics education research. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 951, No. 1, pp. 45-48). American Institute of Physics.

Bernhard, J. (2018). [What matters for students' learning in the laboratory? Do not neglect the role of experimental equipment!](#). *Instructional Science*, 46(6), 819-846.

Brenni, P. (2012). The Evolution of Teaching Instruments and Their Use Between 1800 and 1930. *Science & education*, 21, 191-226.

Chin, J., Lodge-McIntire, G., Murphy, J., & Youngs, M. (2017). [Do online simulations improve high school physics labs?](#)

Concari, S. B., & Marchisio, S. T. (2013). [The remote laboratory as a teaching resource in the scientific and technological training](#). *Creative Education*, 4(10), 33-39.

Evangelista, I., Farina, J. A., Pozzo, M. I., Dobboletta, E., Alves, G. R., García-Zubía, J., & Gustavsson, I. (2017). Science education at high school: A VISIR remote lab implementation. In *4th Experiment@ International Conference*, University of Algarve, Faro, Portugal. pp. 13-17.

Frank, J. A., & Kapila, V. (2017). [Mixed-reality learning environments: Integrating mobile interfaces with laboratory test-beds](#). *Computers & Education*, 110, 88-104.

Hawkins, I., & Phelps, A. (2013). Virtual laboratory vs. traditional laboratory: Which is more effective for teaching electrochemistry? *Chemistry Education. Research Practice* 14(4), 516-523.

Kyza, E. A., Erduran, S., & Tiberghien, A. (2009). Technology-enhanced learning in science. In N. Balacheff, S. Ludvigsen, T. de Jong, A. W. Lazonder, & S. Barnes (Eds.), *Technology-enhanced learning: Principles and products* (pp. 121–134). Dordrecht: Springer.

Mackay, S. & Fisher, D. (2014). *Practical online learning and laboratories: [Chapter 8: Review of traditional and online laboratories](#)*. Perth: IDC Technologies Pty Ltd.

Müller, R. H. (1940). American apparatus, instruments, and instrumentation. *Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition*, 12(10), 571-630.

Mutton, Z., Rywalt, C., Varney, M., & Burnham, N. (2019). Physics education research on inexpensive active-learning lab modules. *Worcester polytechnic institute report*.

Tomara, M., Tselfes, V., & Gouscos, D. (2017). [Instructional strategies to promote conceptual change about force and motion: A review of the literature](#). *Themes in Science and Technology Education*, 10(1), 1-16.

Zacharia, C. Z. & Olympiou, G. (2011). Physical versus virtual manipulative experimentation in physics learning. *Learning and Instruction*, 21(3), 317-331.

3. כלים להערכה של הוראה במעבדות לפיזיקה

בפרק זה נסקרים הכלים להערכה של עבודת התלמידים בשיעורי מעבדה בפיזיקה. הפרק פותח בהתייחסות לחשיבות של הגדרת מטרות ההערכה. בהמשך מובא תיאור של כלי ההערכה הבאים: דוח מעבדה, תצפית על עבודת התלמידים במעבדה, מחוון כללי למעבדות, מבחן בכתב עם שאלות פתוחות, מבחן בכתב עם שאלות ברירה (המכונה מבחן אמריקאי), מבחן מעשי ומבחן באמצעות סימולציות מחשב.

מכלל הדברים עולה שונות רבה בהגדרת המטרות ובכלים המשמשים להערכה. ניתן להכליל ולומר כי הכלים היעילים יותר לשימוש, כגון מבחן ברירה, נמצאו בעלי מהימנות נמוכה, בעוד הכלים הצורכים משאבים רבים, כגון מבחן מעשי, הם בעלי מהימנות גבוהה. נראה כי השימוש במעבדה וירטואלית הכוללת הדמיות של ניסויים ממצה את הטוב משתי האפשרויות - היא יעילה מאוד לשימוש ומאפשרת הערכה של מיומנויות ניסוי הלכה למעשה.

3.1 מטרות ההערכה

כמו בכל הערכה של הישגי תלמידים, חשוב להגדיר מהן מטרות ההוראה של תוכנית הלימודים, ולגזור מהן את מטרות ההערכה. כפי שהוצג בפרק הראשון בדוח, אין אחידות ובהירות בהגדרת המטרות של שיעורי המעבדה, ובזה טמון אחד האתגרים בפיתוח כלי ההערכה.

באתר [התאחדות מורי הפיזיקה](#) בארה"ב מצאנו את ההגדרה הבאה:

הערכה של הלמידה בפיזיקה צריכה לכלול הערכה של מיומנויות שפותחו בפעילות במעבדות, וכן ידע שנרכש במהלך פעילויות אלה. השאלות במבחן נועדו לא רק להעריך את הלמידה במעבדה, אלא גם להעביר מסר לתלמידים בדבר החשיבות של למידה זו.

בנוסף זה ניתן לזהות שלוש מטרות: (1) הערכה של מיומנויות ניסוי; (2) הערכה של בקיאות במושגים בפיזיקה; (3) העצמת החשיבות של המעבדות. אולם, רוב רובם של המחקרים המופיעים בספרות המחקר מתמקדים בהערכה של פיתוח מיומנויות הניסוי, שכן זו התפוקה הייחודית של שיעורי המעבדה. עם זאת, יש שונות רבה בהגדרתן של "מיומנויות הניסוי".

כך, למשל, לודוויג ושותפיו קבעו כי היכולת לנסח טיעונים מדעיים היא המיומנות החשובה ביותר, שכן היא מעידה על הבנה משמעותית של התוכן ולא רק על זיכרון של עובדות (Ludwig et al., 2019). לעומת זאת, במחקר אחר פותח מבחן שמטרתו לבחון ארבע מיומנויות אחרות הנרכשות במעבדה: תכנון ניסוי, ביצוע הניסוי, איסוף הממצאים ודיווח על הממצאים (Sarjono et al., 2018). זאת מבלי להתייחס כלל ליכולת לנסח השערות, וגם לא לניתוח הממצאים לצורך הערכת ההשערות. ישנם מחקרים שבהם בחרו החוקרים להתמקד בהערכת מיומנות "חשיבה ביקורתית" (Walsh et al., 2019; Emiliannur et al., 2017), ובמחקר נוסף בחרו החוקרים להתמקד בהערכת יכולת התלמיד להתייחס לממד חוסר הוודאות של תוצאות הניסויים (Day & Bonn, 2011).

נסקור להלן את כלי ההערכה המרכזיים בשיעורי הפיזיקה:

3.2 דוח מעבדה

דוח מעבדה הוא מסמך שבו התלמידים מתעדים את עבודתם במעבדה, ולעיתים הוא משמש את המורים ככלי הערכה. בדוח התלמידים מתעדים, בדרך כלל, את נושא המעבדה, את מטרת הניסוי, את שלבי הניסוי, את הממצאים שנאספו, את הדיון בעקבות הניסוי ואת מסקנותיו (ראו דוגמה באתר [להוראת פיזיקה](#) בארה"ב).

במחקר נבדקה איכות ההערכה באמצעות דוח מעבדה מסכם, בהשוואה להערכה באמצעות מבחן מעשי (Schreiber et al., 2016). החוקרים השוו תצפיות על עבודת תלמידים במעבדה לדוחות הכתובים שהם הגישו. בכל הקשור להערכת שלב תכנון הניסוי ושלב ניתוח הממצאים, נמצא מתאם גבוה בין שני כלי ההערכה. כלומר, התלמידים קיבלו ציונים דומים במבחן המעשי ובהערכת דוח המעבדה שהגישו. עם זאת, נמצא מתאם נמוך בציונים בהערכת שלב ביצוע הניסוי. כלומר, פער (לא בכיוון אחד) בין הציון שקיבל כל תלמיד על ביצוע הניסוי במבחן המעשי לבין הציון שקיבל על תיאור הביצוע בדוח המעבדה שכתב. מסקנת החוקרים היא שהפער נובע מכך שדוחות המעבדה הכתובים אינם משקפים נאמנה את "תהליך העבודה והלמידה" המתרחש במעבדה. במעקב צמוד אחר התהליך מתגלה מידע על הלמידה שהתלמידים לא מתעדים בדוחות, כגון התלבטויות של התלמידים, שיח ביניהם, ניסוי וטעייה וכדומה.

3.3 תצפית על פעילות התלמידים במעבדה

לאור המסקנה האחרונה, כלי ההערכה המתאים לבקרה על תהליך הלמידה הוא התצפית המשתתפת. התצפית חושפת את ההתלבטויות של התלמידים בשלבי הלמידה השונים ומאפשרת לעמוד על שיקולי הדעת שלהם תוך כדי הניסוי. קבוצת חוקרים בלונדון פיתחה כלי הערכה בתצפית עבור סטודנטים לפיזיקה הלומדים בשנה א בקולג' האוניברסיטאי, אשר נוסף על תיעוד ההתרחשויות נועד לטפח התנהגויות חקר (Dunnett et al., 2019). לשם כך, קיבלו התלמידים הסבר מלא על כוונת המורים להשתמש בכלי ההערכה החדש, מתוך תקווה שהשימוש בכלי יוביל לשינוי התנהגותם בכיוון הרצוי.

בפיתוח כלי ההערכה הגדירו החוקרים חמש התנהגויות שהם מעוניינים לטפח אצל התלמידים:

1. **עבודה קבוצתית:** התייעצות בין חברי הצוות ואף עם תלמידים בצוותים אחרים נחשבת להתנהגות מפתח במיומנויות הניסוי. בכלי התצפית ניתן ציון בין ארבע דרגות, החל מתלמיד שפועל לבדו ועד תלמיד המתייעץ עם חברי צוותו ועם תלמידים אחרים במעבדה.
2. **הטלת ספק:** מדד זה נועד למנוע מתלמידים לנהוג בחיפזון ולהסתפק בתשובה הנכונה המצופה, ולעודד אותם להתעכב גם על נתונים שגויים תוך כדי הטלת ספק וחשיבה ביקורתית כלפי עצם מהלך הניסוי ואיסוף הממצאים.
3. **חקירה:** הכוונה כאן להבעת סקרנות במהלך הניסוי, סקרנות המתבטאת בהכנסת שינויים במשתנים, בביצוע בדיקות נוספות על המוצעות בדף ההוראות, בשימוש מקורי בציוד וביצירת מטרות חדשות לניסוי.
4. **גישה:** מדד זה ממוקד בהתנהגות האישית של התלמיד, כגון הגעה במועד לתחילת השיעור, הבאת כל הציוד הנדרש והתנהגות תקינה שאינה מפריעה לצוות או לצוותים אחרים במעבדה.
5. **התקדמות:** מדד זה נבדק באמצעות דוח המעבדה שהגישו התלמידים, והציון ניתן בהתאם למספר הפרקים שהתלמיד השלים בדוח: מבוא תיאורטי ומטרת הניסוי, תיאור מהלך הניסוי ואיסוף הנתונים, ניתוח הנתונים, דיון ומסקנות.

במהלך העבודה במעבדה, העניקו החוקרים שצפו בתלמידים ציון לכל תלמיד. הציון הוענק בכל אחד מחמשת הממדים, ובכל אחת משש המעבדות ששולבו בקורס. הממצאים מראים כי חל שיפור בציונים של מרבית התלמידים לאורך הקורס. כלומר, לנוכח השימוש בכלי ההערכה, תלמידים שינו את התנהגותם ושיפרו את העבודה הקבוצתית, את הטלת הספק, את הבעת העניין בחקירה, את הגישה החיובית כלפי העבודה במעבדה ואת העמידה בדרישות הקורס. החוקרים טוענים שהתלמידים שיפרו את התחומים הללו משום שנאמר להם שאלה הם מדדי ההערכה.

ממצא חשוב נוסף שניכר בתוצאות הוא שלא כל התלמידים שיפרו את התנהגותם באותה מידה.

שינוי הציון של כל תלמיד הוא אחר. יש תלמידים שהשתפרו בכל המדדים באופן רציף, מהמעבדה הראשונה ועד השישית, ויש תלמידים שאצלם ניכרה נסיגה באחד המדדים בחלק מהמעבדות. מכאן הסיקו החוקרים שיש חשיבות להערכה במספר שלבים בקורס, המעניקה מידע מהימן יותר מאשר מבחן יחיד.

3.4 מחוון הערכה כללי להוראת מעבדות בפיזיקה

קבוצת חוקרים מהאוניברסיטה למדעים במלזיה פרסמה לאחרונה מחוון הערכה אשר לטענתם מתאים לשימוש במעבדות לפיזיקה ונועד להעריך מיומנויות מגוונות (Liew et al., 2019). החוקרים הגדירו ארבע מיומנויות מרכזיות שיש להעריך, ולכל אחת מהן מספר מיומנויות משנה. לכל המיומנויות נקבעו ארבעה ערכי ציון המתוארים מילולית. למשל, במיומנות זיהוי משתנים ניתן ציון 0 לתלמיד שאינו מצליח לזהות משתנה אחד וציון 3 למי שמזהה שלושה משתנים.

המיומנויות במחוון (ללא ההגדרות המילוליות לציון כל מיומנות):

1. יכולת תכנון:

- 1.1 זיהוי נכון של המשתנים.
- 1.2 עיצוב מערך ניסוי פונקציונאלי.
- 1.3 קביעת טווח מתאים למשתנה התלוי.
- 1.4 בחירת מרווח מתאים לערכים של המשתנה התלוי.

2. יכולת ביצוע:

- 2.1 בחירת מכשירי מדידה מתאימים.
- 2.2 בדיקת האיכות וההתאמה של המכשירים והכלים.
- 2.3 התקנת המכשירים.
- 2.4 בדיקת מערך הניסוי.
- 2.5 שימוש במכשירי המדידה בטכניקה נכונה.
- 2.6 נקיטת אמצעי זהירות בהכנת הניסוי על מנת לשפר את הנתונים שנאספים.
- 2.7 תיעוד כל המדידות.
- 2.8 הקפדה על הוראות הבטיחות במעבדה.

3. יכולת ניתוח:

- 3.1 עריכת חישובים נכונים בעת עיבוד הנתונים.
- 3.2 ניתוח הנתונים כדי לקבוע תוצאות.
- 3.3 הסקת מסקנה נכונה לגבי הקשרים בין הנתונים.

4. יכולת הערכה:

- 4.1 סיכום הממצאים של הניסוי.
- 4.2 הערכת הדיוק והמהימנות של התוצאות.
- 4.3 ציון טווח הטעות (חוסר הוודאות) של הנתונים.
- 4.4 זיהוי חולשות בעיצוב מערך הניסוי.
- 4.5 הצעת דרכים להתגבר על החולשות או על טווח הטעות.

את המחוון המלא ניתן לראות במאמרם של לין, לים, סל ואונג (Liew, Lim, Sale & Ong, 2018), [Development of scoring rubrics to access physics practical skills](#). המחוון עבר בדיקות תוקף ומהימנות פנימית במחקר שהשתתפו בו 153 תלמידים מעשרה בתי ספר תיכוניים.

3.5 מבחן כתוח, מבחן ברירה ומבחן מעשי

קבוצת חוקרים בראשות פרופ' האמן פיתחה שלושה מבחנים לבדיקת היכולת של התלמידים לתכנן ניסוי ולנתח מידע העולה ממנו: מבחן בכתב עם שאלות פתוחות, מבחן בכתב עם שאלות ברירה ומבחן מעשי במעבדה (Hammann et al., 2010). במחקר נבדקו תלמידים מכיתות ו': 1,006 תלמידים נבחנו במבחן ברירה, 323 במבחן הפתוח ו-24 במבחן המעשי. כל אחד מהמבחנים נמצא בעל מהימנות פנימית גבוהה, אולם התגלו פערים גדולים בהישגי התלמידים בין המבחנים. במבחן הברירה התקבלו הציונים הגבוהים ביותר ובמבחן המעשי הציונים הנמוכים ביותר.

בניתוח הממצאים התבררו הדברים הבאים: במבחן השאלות הפתוחות נבדקה היכולת לתכנן ניסוי, וכדי להצליח בו נדרשו התלמידים לשלוט בארבע מיומנויות משנה:

1. הכרה והבנה של הצורך בקבוצת ביקורת.
2. התייחסות לכל המשתנים התלויים שאותם רוצים לחקור.
3. התייחסות לכל המשתנים הבלתי תלויים שאותם רוצים לבדוד.
4. תכנון ניסוי ללא בלבול בין המשתנים.

במבחן הברירה קיבלו התלמידים כנתון את קיומה של קבוצת הביקורת, לרבות השינוי שהיא כוללת במשתנים (ולכן לא נדרשו למיומנויות 1-2 לעיל). מכאן שהפער בציוני התלמידים נובע מכך שמבחן השאלות הפתוחות בחן שתי מיומנויות נוספות שלא נבדקו במבחן הברירה.

הישגי התלמידים במבחן המעשי היו כאמור הנמוכים ביותר. 16 מתוך 24 תלמידים לא הצליחו בשלב תכנון הניסוי, ו-22 מתוך 24 תלמידים לא הצליחו בשלב ניתוח הממצאים. החוקרים מסבירים שבשלב התכנון במבחן המעשי, כאשר התלמידים קיבלו את האמצעים לביצוע הניסוי, הם נטו לחשיבה הנדסית ולא לחשיבה מדעית. חשיבה הנדסית עוסקת בשאלה המעשית כיצד להרכיב את המערכת כדי שתעבוד (בדומה לילד המשחק בקוביות). לעומת זאת, חשיבה מדעית היא תיאורטית יותר, ועוסקת בניתוח שכלתני של המשתנים השונים והצורך לבדוד אותם.

אשר לשאלה על ניתוח הממצאים במבחן המעשי, החוקרים מסבירים שבמבחן השאלות התלמידים קיבלו ממצאים מן המוכן והתבקשו להסבירם. לעומת זאת, במבחן המעשי הם קיבלו ממצאים שנבעו מהאופן שבו תכננו את הניסוי. כלומר, הם גררו לשלב הניתוח את השגיאות שעשו בשלב התכנון, מה שיכול להסביר את ההישגים הנמוכים.

מסקנת מחקר זה, המצוטט על ידי רבים, היא שההבדל המהותי בין כלי ההערכה אינו רק נוחות השימוש של המורה או המהימנות הפנימית של המבחן. כל סוג מבחן בודק למעשה כישורים אחרים. מסקנה נוספת שעולה מהניסוי היא שהבחירה של המורים בכלי הערכה זה או אחר משפיעה על הישגי התלמידים בקורס.

3.6 הערכה באמצעות מעבדה וירטואלית וסימולציות מחשב

מעבדה וירטואלית הכוללת סימולציות מחשב פותחה ככלי הערכה בידי קבוצת חוקרים מאינדונזיה (Dickmann et al., 2013). לטענתם, מבחני כתיבה עם שאלות פתוחות וסגורות נמצאו בעלי תוקף נמוך בהערכה של מיומנויות ניסוי. מצד שני, מבחן מעשי הוא יקר מאוד לביצוע, עקב הצורך לתחזק מעבדה, להשתמש בחומרים ולבחון כל תלמי ותלמידה בנפרד. מכאן שהמבחן הווירטואלי על בסיס הדמיית ניסוי ממצה את הטוב משני העולמות: הוא דומה לניסוי של ממש ויעיל מאוד מבחינת משך העבודה של המורים עד קבלת התוצאות.

נוסף על כך, במבחן מעשי (כפי שהוזכר לעיל) התלמיד גורר טעויות שביצע בשלבי הניסוי המוקדמים לשלבים המתקדמים בו. כדי להתמודד עם בעיה זו, תוכנן המבחן הווירטואלי כך שכל

פריט בו מתייחס למיומנות ניסוי ספציפית.

במהלך פיתוח המבחן הגדירו החוקרים שלושה שלבים מרכזיים בניסוי: תכנון והכנות, ביצוע ומדידות וניתוח ומסקנות. לכל שלב הגדירו החוקרים שתיים-שלוש מיומנויות מרכזיות נדרשות, כך שהגיעו לשמונה מיומנויות ניסוי שביקשו להעריך. המבחן עבר בקרת תוקף ומהימנות על תלמידים בכיתות ח'-ט', אולם החוקרים לא פרסמו דוגמאות של השאלות. במקום זאת, ניתן להתרשם מהגדרת המיומנויות שבחרו להעריך, כפי שהן מופיעות בלוח 2.

**לוח 2: מיומנויות ניסוי להערכה במבחן וירטואלי,
לפי Dickmann et al., 2013**

הכנות	
1. תיאור הרעיון הכללי של הניסוי	
2. תיאור שלבי הניסוי במילים או באיור, או בחירה של מכשירים מתוך רשימה	
3. תכנון הלוח לאיסוף הנתונים	
ביצוע	
4. הרכבת המכשירים יחד ובדיקת מערך הניסוי	
5. מדידת המשתנים ותיעודם בלוח	
הערכה	
6. תכנון הערכה של הנתונים	
7. עיבוד הנתונים	
8. הסקת מסקנות	

לסיכום, יש שונות רבה בהגדרת מטרות ההערכה ובהגדרת המיומנויות שיש להעריך את מידת השליטה בהן. בהכללה, הכלים הנוחים יותר לשימוש, כגון מבחן עם שאלות ברירה נמצאו בעלי מהימנות נמוכה; בעוד הכלים הצורכים משאבים רבים, כגון מעבדה מעשית, נמצאו בעלי מהימנות גבוהה. נראה כי השימוש במעבדה וירטואלית הכוללת הדמיות של ניסויים ממצה את הטוב משתי האפשרויות: היא יעילה מאוד לשימוש ומאפשרת הערכה של מיומנויות ניסוי הלכה למעשה.

מקורות

Day, J., & Bonn, D. (2011). [Development of the concise data processing assessment](#). *Physical Review Physics Education Research*, 7, 0101114.

Dickmann, M., Eickhorst, B., Theyßen, H., Neumann, K., Schecker, H., & Schreiber, N. (2013). Measuring experimental skills in large scale assessments: A simulation-based test instrument. *ESERA Conference paper*.

Dunnett, K., Gorman, M. N., & Bartlett, P. A. (2019). Assessing first-year undergraduate physics students' laboratory practices: seeking to encourage research behaviours. *European Journal of Physics*, 40, 015702.

Emiliannur, E., Hamidah, I., Zainul. A., & Wulan, A. R. (2017). Using performance assessment model in physics laboratory to increase students' critical thinking disposition. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 895, 012143.

Hammann, M., Hol Phan. T. T., Ehmer, M., & Grimm. T. (2010). Assessing pupils' skills in experimentation. *Journal of Biological Education*, 42(2), 66-72.

Liew, S. S., Lim, H. L., Saleh. S., & Ong, S. L. (2019). [Development of scoring rubrics to assess physics practical skills](#). *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 15(4), 1691.

Ludwig, T., Priemer, B., & Lewalter, D. (2019). [Assessing secondary school students' justifications for supporting or rejecting a scientific hypothesis in the physics lab](#). *Research in Science Education*, 1-26.

Sarjono., M. D., Mardapi. D., & Mundilarto (2018). [Development of physics lab assessment instrument for senior high school level](#). *International Journal of Instruction*, 11(4), 17-28.

Schreiber, N., Theyßen, H., & Schecker, H. (2016). Process-oriented and product-oriented assessment of experimental skills in physics: A comparison. In *Insights from research in science teaching and learning* (pp. 29-43). Springer, Cham.

Walsh, C., Quinn, K. N., Wieman, C., & Holmes, N. G. (2019). Quantifying critical thinking: Development and validation of the physics lab inventory of critical thinking. *Physical Review Physics Education Research*, 15, 010135.

4. הכשרת המורים ותכנון הלימודים לשיעורי מעבדה בפיזיקה

רק מעט מהספרות המחקרית עוסקת בסוגיית הכשרת המורות והמורים להוראת שיעורי מעבדה בפיזיקה. עם זאת, בהינתן המחסור העולמי במורים מוסמכים להוראת פיזיקה, נראה שלנושא חשיבות רבה. למשל, על פי [קואליציית המוסדות להכשרת מורים לפיזיקה](#) בארה"ב, רק 47 אחוזים מהמורים לפיזיקה בבתי הספר העלייסודיים הם בעלי הכשרה מקצועית מתאימה והסמכה להוראת פיזיקה.

4.1 קורס הכשרה להוראה במעבדת פיזיקה

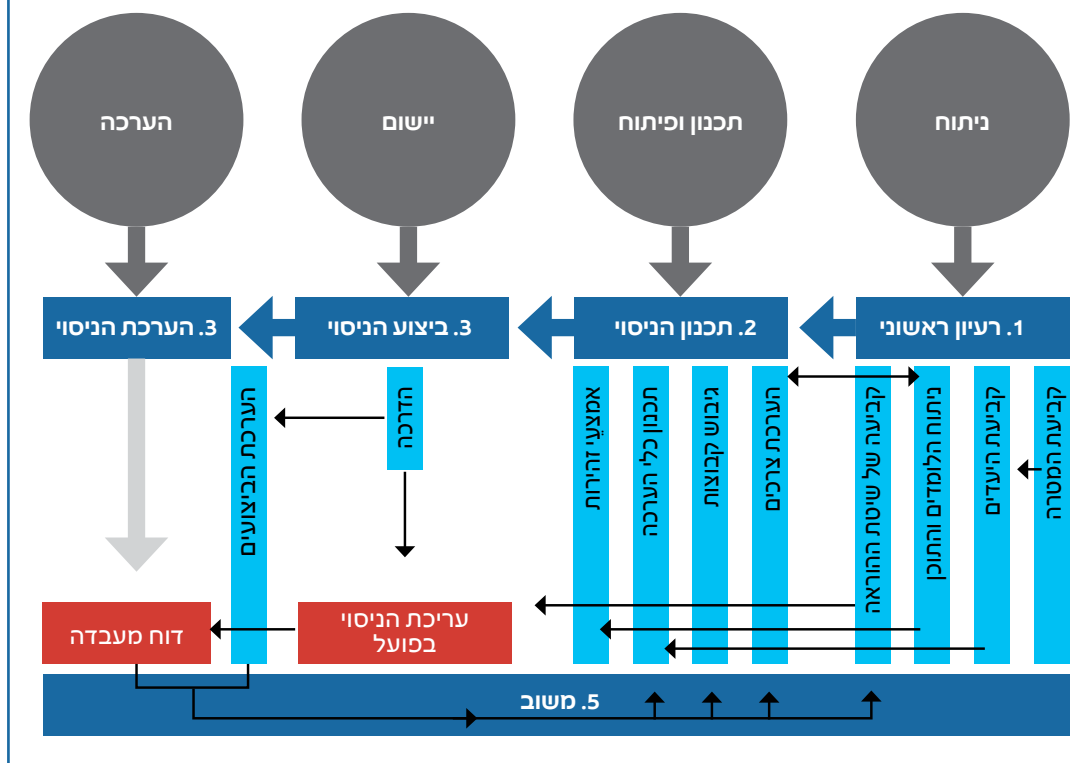
במוסדות המכשירים מורים לפיזיקה רווחת ההנחה כי די בכך שפרחי הוראה משתתפים במעבדות במסגרת הקורסים התיאורטיים שהם לומדים כדי להכשירם להורות שיעור מעבדה (Gkioka, 2019). אולם, נמצא כי הסטודנטים להוראה חסרים מיומנויות ניסוי בסיסיות, ובמיוחד הבנה נכונה של המושגים תוקף, מהימנות ומדד אי־ודאות הממצאים. כמו כן, הסטודנטים התקשו לפתח מערך שיעור להוראה במעבדה, ודוחות המעבדה שכתבו היו ירודים (Gkioka, 2019).

במחקר האמור פותח קורס שנתי בשם "מעבדות מדעים בתיכון", והשתתפו בו 24 סטודנטים הלומדים לקראת קבלת תעודת הוראה בפיזיקה. בסמסטר הראשון נלמדו בקורס הנושאים פיתוח תפיסה מדעית ניסויית (מושגים כגון תוקף ומהימנות) ופיתוח מערכי שיעור למעבדה, כולל שימוש במתודות הוראה מגוונות. הסמסטר השני כלל התנסות מעשית, ובמסגרתה הסטודנטים העריכו דוחות מעבדה של תלמידים בבתי ספר (וכך למדו בדיעבד לשפר את דוחות המעבדה שלהם עצמם) וכן התנסו בהעברת שיעורי מעבדה לתלמידים.

4.2 מודל לפיתוח מערך שיעורי מעבדה בפיזיקה

אחת המיומנויות הנדרשות מהמורים לפיזיקה היא תרגום הידע המדעי שהם שולטים בו למערכי שיעור במעבדה. בלטה (Balta, 2015) פיתח מודל לתכנון מערך שיעור מעבדה, על סמך תצפיות בשיעורי מעבדה וראיונות עם 34 מורות ומורים לפיזיקה בתיכון. המודל מבוסס על מודלים קיימים לתכנון לימודים (פיתוח תוכניות לימודים), אולם הוא מותאם ספציפית לטיבו של שיעור מעבדה. באיור המודל המצורף, בעמוד הבא, השלבים מודגשים בכחול, פעילות המורה בתכלת ופעילות התלמידים באדום.

איור 3: מודל לפיתוח שיעור מעבדה -
(SLID) design instructional laboratory science



במודל חמישה שלבים עוקבים:

1. ניתוח: שיעור המעבדה אינו שיעור אקראי, ובטרם תכנונו יש להתייחס לארבעה משתנים:

- קביעת המטרות והיעדים. כפי שהוזכר יש שלוש מטרות מרכזיות: המחשה של המושגים הנלמדים כדי לחזק את הבנתם; תרגול ורכישת מיומנויות חקר ומיומנויות ביצוע ניסוי; טיפוח תפיסה מדעית שלפיה באמצעות איסוף ממצאים והכללות ניתן להגדיר את החוקיות המניעה תופעות בעולם האמיתי.
- ניתוח היכולות של התלמידים. בעיקר ניסיון קודם בעבודת חקר (שאלה, השערות וכך הלאה), מיומנויות מעבדה (שימוש בכלים ובמכשירים), הרגלי למידה עצמאית (כגון התמדה) וכישורי עבודת צוות.
- ניתוח התוכן הנלמד. הגדרה מדויקת של התוכן ושל המסר הרעיוני של השיעור בתוך רצף תוכנית הלימודים: מה נלמד עד כה ומה יילמד בהמשך על בסיס השיעור הנוכחי.
- קביעת רצף ההוראה של השיעור. פיתוח מתודולוגי כגון פתיחה בהסבר לכל הכיתה, חלוקה לצוותים, מתן הנחיות לביצוע הניסוי וכך הלאה.

2. תכנון: בשלב זה ארבעה משתנים נוספים:

- הערכת הצרכים של התלמידים, כגון ידע קודם שנרכש או שצריך להשלימו, היקף ההנחיות והוראות העבודה שנדרשים וכדומה.
- בחירת צוותי העבודה של התלמידים. החלוקה יכולה להיות חופשית (חברתית), חלוקה קבועה הומוגנית (תלמידים באותה רמה) או חלוקה לצוותים הטרוגניים, כך שתלמידים מתקדמים יסייעו לחלשים.

- ג. הגדרת כלי הערכה של השיעור. כפי שהוזכר הכלים המרכזיים הם תצפית על עבודת הצוותים, דוח המתאר את העבודה במעבדה ואת תוצאותיה ומבחני ידע.
- ד. ניסוח הוראות הבטיחות, בהתאם לניסוי, לכלים ולחומרים.

3. יישום

בשלב זה מוקד הפעילות נמצא אצל התלמידים המבצעים את הניסוי. תפקיד המורה ללוות ולהנחות את התלמידים, לשאול שאלות שיגרמו להם לעבור מהביצוע להפנמת התפיסה המדעית שהוא ממחיש וכן להעריך את ביצועיהם.

4. הערכה

גם בשלב זה מוקד הפעילות נמצא אצל התלמידים. הם מסכמים את עבודתם בדוח המעבדה או משיבים על מבחן הערכה מסכם.

5. משוב

בהתאם למידע העולה מהערכת הביצועים ומבדיקת דוח המעבדה, המורה מברר עם עמיתיו באיזו מידה שירתה המעבדה את המטרות והיעדים שנקבעו ואילו שינויים ניתן להכניס בתוכנית השיעור כדי לשפר את האפקטיביות שלו.

לסיכום, נראה כי מעמדם של שיעורי המעבדה בהוראת פיזיקה תלוי, בין השאר, בהכשרתם של המורות והמורים. במסגרת זאת, הסטודנטים להוראה צריכים להתנסות במעבדות לא רק כתלמידים אלא גם מנקודות המבט של מתכנן תוכנית הלימודים, מפתח מערך שיעור המעבדה והמורה המעביר את שיעור המעבדה.

מקורות

Balta, N. (2015). [A Systematic Planning for Science Laboratory Instruction: Research-Based Evidence](#). *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 11(5).

Gkioka, O. (2019, August). [Learning how to teach experiments in the school physics laboratory](#). *Journal of Physics: Conference Series*, 1286(1), 012016.

סיכום: אתגרים והצעות לפתרונות

בפרק זה נציג סיכום של הדוח, נתייחס לאתגרים המרכזיים בהוראת שיעורי מעבדה בפיזיקה ונציע דרכים להתמודדות עימם המוזכרים בספרות המחקר.

באופן כללי מצאנו הסכמה רחבה ורבת שנים לגבי חשיבותם של שיעורי המעבדה: הניסויים שעורכים התלמידים משרתים גישת חינוך קונסטרוקטיביסטית, המאפשרת הבנייה של הידע מתוך התנסות ומעורבות. זאת בשונה מהוראה פרונטלית הנסמכת על העברת מידע ושינון. עם זאת, למרות שימוש רב במעבדות בבתי ספר, המחקרים אינם מעידים על שיפור באוריינות המדעית של התלמידים. המחקרים שנסקרו בדוח זה מצביעים על רכיבים שונים של שיעורי המעבדה, שכל אחד מהם יכול להסביר את הפער האמור בין ההשקעה לתוצרים:

1. ריבוי מטרות

מטרות ההוראה הן מרכיב יסודי בפיתוח מערכי השיעורים במעבדות ובהערכת הלמידה ותוצאותיה. במהלך השנים הוצעו מטרות חינוכיות רבות לשיעורי המעבדה, מצב המעיד על עמימות התחום. ככל שהמטרות רבות ומגוונות יותר, כך קשה יותר למקד את הפיתוח הקוריקולרי. את המטרות הרבות נהוג לרכז בשלושה תחומים: הוראת מושגי היסוד בפיזיקה, פיתוח מיומנויות מחקר וטיפול תפיסתי חקר מדעית.

מספרות המחקר עולה כי שיעורי מעבדה המתמקדים בפיתוח מיומנויות מחקר משרתים טוב יותר גם את טיפוח התפיסה המדעית של התלמידים.

2. מעורבות נמוכה של התלמידים

מחקרים מראים כי מרבית המעבדות הן מעבדות מאשרות (סגורות), שבהן התלמידים עוקבים אחר רשימת מטלות לביצוע ואינם שותפים למהלך המחקר. הבעיה היא מהותית, שכן כל עוד מתכנני תוכניות הלימודים או המורים קובעים מראש מה ילמדו התלמידים, הם בהכרח מתקשים לאפשר להם מהלך למידה פתוח.

פתרון אפשרי הוא תכנון שיעורי מעבדה או קורס במעבדה העומדים בפני עצמם ואינם משרתים המחשה של מושגים הנלמדים בשיעורים התיאורטיים. במעבדה בלתי תלויה יש אפשרויות רבות יותר להציע לתלמידים להתנסות במחקר פתוח.

3. מגבלות אמצעי המחשה

הכלים והמכשירים שבהם נעשה שימוש מבליטים וממחישים את התופעות הנחקרות, אולם הם עצמם מסננת שעלולה לעוות את התמונה השלמה.

כדי להתמודד עם הקושי הזה, על המורים לנתח היטב את התמונה המתקבלת בניסוי ולבחור באמצעים המציגים לתלמידים את "התמונה השלמה" ולא רק נקודות. כמו כן, מומלץ להשתמש ביותר ממערך כלים אחד כדי להמחיש את אותה תופעה בדרכים שונות. המלצה זאת יכולה לסייע גם בהתמודדות עם הקושי המוזכר בסעיף הבא.

4. תפיסות מדעיות מוטעות

בעיה קרובה לקודמת היא שתלמידים חווים את העולם באופן אינטואיטיבי, ולעיתים מגיעים לשיעורי פיזיקה עם תפיסות מדעיות מוטעות.

מומלץ לבצע ניסויים שונים הממחישים את אותה תופעה כך שהתלמידים לא ייצמדו לדוגמה אחת העלולה להטעות. השימוש בייצוגים מרובים של תופעה מדעית הוכח כתואם באופן יעיל לשונות בסגנונות הלמידה ובהעדפות של תלמידים שונים.

5. מעבדה צורכת משאבים רבים

שיעור מעבדה דורש משאבים רבים כגון חדר, מכשירים שחלקם יקרים במיוחד וזמן עבודה של מדריכי מעבדה ומורים.

הפתרון המוכר לבעיה זו הוא איגום משאבים והקמת מרכז מעבדות המשרת כמה בתי ספר, כגון זה המוכר של [חמד"ע](#) בתל אביב.

פתרון נוסף שהספרות בתחום הוראת פיזיקה בוחנת בשנים האחרונות הוא שימוש במעבדה וירטואלית, שבה התופעה הנחקרת והשליטה במשתנים ובמכשירי המדידה מתוכנתים במדיה דיגיטלית. לזה יש להוסיף את האפשרות להשתמש במעבדה וירטואלית המתאימה לעבודה מרחוק, שבה השרת נמצא מחוץ לבית הספר והתלמידים מתקשרים אליו דרך רשת האינטרנט, לעיתים דרך טלפונים חכמים כאמצעי קצה. היתרונות של המעבדה הווירטואלית מרחוק הם רבים, ובראשם נגישות, זמינות, שימוש חוזר ללא מגבלה, בטיחות, דיוק במדידות וקבלת תוצאות בזמן אמת.

המגבלה המרכזית של המעבדה הווירטואלית היא שאין בה התנסות טכנית באחזקה ובהצבה של המכשירים וכלי המדידה. כדי להתמודד עם כך, מוצע לשלב שימוש במעבדות וירטואליות ורגילות.

6. הערכת שיעורי מעבדה

כלי ההערכה הנפוצים הם דוח מעבדה, שאלון ברירה, מבחן שאלות פתוחות ומבחן מעשי. מבין אלה, ככל שהכלי יעיל יותר לשימוש (מבחינת זמן עבודה של המורים) כך הוא נמצא בעל מהימנות נמוכה בהערכת מיומנויות החקר של התלמידים.

נוסף על הדרישה לשעות עבודה רבות של המורים, מבחן מעשי בעייתי גם כי התלמיד גורר שגיאות שעשה בשלב אחד של הניסוי לשלב הבא בו.

בשל כך ההמלצה היא לקיים את תהליך ההערכה במעבדת וירטואלית, הממצה את הטוב משתי האפשרויות: המעבדה יעילה מאוד לשימוש ומאפשרת הערכה של מיומנויות ניסוי הלכה למעשה.

7. הכשרת מורים לא עוסקת באופן ממוקד בהוראת מעבדה

בבתי הספר יש מחסור במורים מוכשרים ומוסמכים להוראת פיזיקה, ובהתאם גם להוראת פיזיקה במעבדה. נוסף על כך, בקורסים בפיזיקה הנכללים בהכשרת המורים משולבות מעבדות מאשרות (סגורות), כך שהסטודנטים נחשפים לדוגמה שלילית של שימוש במעבדה. זאת ועוד, יש הנחה שהתנסות במעבדה במהלך הקורסים העיוניים ללא רפלקציה מספיקה כדי לרכוש מיומנויות תכנון והוראה של שיעור מעבדה.

ההמלצה היא לשלב בהכשרת המורים קורס הוראה במעבדות, ובתוכו לכלול פיתוח תפיסה מדעית, פיתוח מיומנויות מחקר, פיתוח מערך שיעור במעבדה והתנסות מעשית בהוראת מעבדה.

נספח חוות דעת מקצועיות

עם סיום כתיבת טיוטת הדוח פונה היוזמה לחוקרים וחוקרות וכן למומחים ולמומחיות בתחום כדי לקבל חוות דעת על הדוח - על הסוגיות שהוא מציף, על הסתייגויות שיכולות לעלות מקריאתו ועל הרלוונטיות שלו למקרה הישראלי. שמות הקוראים והקוראות מופיעים בפתח הדוח. בנספח זה יופיעו ההערות וההארות הרוחביות על הדוח ועל המגמות שהוא מעלה:

כדאי היה להרחיב עוד על מקומה של המעבדה בתוכנית הלימודים של הוראת הפיזיקה בחטיבה העליונה.

יש סוגים רבים של ניסויים וירטואליים. חשוב למקד את הדוח ולהציג דוגמאות.

הטלפונים הניידים החכמים מרחיבים מאוד את אפשרויות ההוראה, הן בעזרת כוח החישוב שלהם, הן בזכות החיישנים המרובים המאפשרים לערוך מדידות אישיות. אין מדובר בהכרח בתחליף למעבדה המסורתית אלא גם באפשרות להעצמתה. במילים אחרות, מרחב האפשרויות שמכשירים אלה פותח יכול, אם בוחרים בכך, דווקא להעצים את המעבדה המסורתית.

מעבדות וירטואליות לא מחליפות את החלק החשוב במעבדה, שהוא תכנון הניסוי ולעיתים אף תכנון המבנה של מערכת הניסוי. נוסף על כך, אי אפשר להשיג במעבדה הווירטואלית מעורבות של התלמידים ותחושת בעלות שלהם על הניסוי.

העובדה שסטודנטים לתואר ראשון מתקשים במעבדה מעידה על המחיר של מעמדה הנמוך של המעבדה בלימודי התואר הראשון.