כוחו של חוסר ודאות

דרכים לתקשר לתלמידים חוסר ודאות בתהליך החקר המדעי

מעובד על פי המאמר[1]:
Covitt, B.A. & Anderson, C.W. (2022): Untangling Trustworthiness and Uncertainty in Science. Science & Education. https://doi.org/10.1007/s11191-022-00322-6

לקראת סיום המאמר ההיסטורי של ווטסון וקריק על מבנה ה-DNA שפורסם ב-1953 בכתב העת nature הם כותבים[2]:

"הנתונים שפורסמו עד כה כצילומי קרני x אינם מספיקים כדי לבחון באופן קפדני את המבנה שלנו. עד כמה שאנו יכולים לומר, המבנה שאנחנו מציעים מתאים באופן כללי לנתוני הניסויים הללו, אבל אין לראות בו מבנה נכון עד שייבדק מול נתונים קפדניים ומדויקים יותר. חלק מנתונים אלה מפורסמים רק עתה. כשעבדנו על המבנה שאנו מציעים לא היינו מודעים לנתונים החדשים הללו, והמבנה שלנו מבוסס בעיקר, אם כי לא רק, על תוצאות שכבר פורסמו ועל שיקולים סטריאו-כימיים".

במרחק הזמן, אנו יודעים לומר שההסתייגות של ווטסון וקריק הוכחה כבלתי-רלבנטית. תוצאות הניסויים שהתקבלו מאז ועד היום ממשיכות להוכיח שהמבנה שהם הציעו ל-DNA הוא נכון. אלא שבאותה עֵת, כאשר הם הציעו אותו לראשונה, ולאור הנתונים שהיו בידיהם עד אז, היה נכון וחשוב לציין את ההסתייגות. ראוי היה להציג את המודל המוצע למבנה ה-DNA מתוך צניעות, והבנה שעדיין קיים חוסר ודאות בעניינו.

חוסר ודאות שזור בכל תקשורת בין מדענים, אם אלה מאמרי מחקר המתפרסמים בכתבי עת מדעיים, או בהרצאות בכנסים, או בספרים. לדוגמה, מאמרי מחקר נפתחים בשאלה העולה מתוך הידוע בתחום עד כה. בהמשך מציגים החוקרים בזהירות את תוצאות המחקר, ובפרק הדיון הם מעלים אפשרויות שונות לפירוש התוצאות, מציינים את מגבלות המחקר, סתירות לממצאים אחרים ושאלות חדשות שתוצאות המחקר מעלות.

חוסר ודאות מדעית יכול להיות כמותי, ולנבוע מאופן המדידה,

אחת הדרכים לתקשר מדע לציבור הרחב יכולה להיות מושכלת, ולהיעזר במחקרים שבדקו אילו דרכים יעילות יותר להביא בפני הציבור טענות לחוסר ודאות מדעית

ממידת החזרה על התוצאות, מהיכולת לנבא על סמך התוצאות או המודל, או מאופן לקיחת הדגימות וקביעת המדגמים. היבט אחר של חוסר ודאות הוא מהותי-איכותני, ומתבטא בקיומן של השערות חלופיות או בהצגת שאלות שטרם נענו. אחת הדרכים להקטין חוסר ודאות בתהליך החקר המדעי היא בעזרת ביקורת עמיתים: מומחים אחרים בתחום הקוראים את מאמרי המחקר וממליצים על פרסומם, על דחיית פרסומם או על בדיקות וניסויים נוספים כדי לחזק את המסקנות מהתוצאות.

בעוד שחוסר ודאות הוא חלק חשוב מתהליך החקר המדעי, ואף יכול להניע אותו וליצור אפשרויות מחקר חדשות, חשיפת הציבור הרחב לחוסר הוודאות עלולה לערער את האמון במדע. באופן נאיבי רבים מצפים ממדע לתשובות נחרצות לשאלות ולבעיות, מסוג "כן או לא" (Freudenberg et al., 2008), ולכן ככל שטענה מדעית נאמרת בנחרצות רבה יותר, כך אמון הציבור בה עשוי לגדול. נוסף על כך, מגוון התרבויות ותפיסות המציאות בקרב הציבור מעמיד את החקר המדעי בסימן שאלה, ומערב ערכים והשקפות עם פירושן של תוצאות ועדויות מדעיות (Schroeder, 2021). כאשר ערכי המדענים נתפסים כשונים מהערכים האישיים, קטן גם האמון במדע.

נוכח חוסר הוודאות שמלווה את תהליך החקר המדעי עולה השאלה מדוע על הציבור לתת אמון במדע, ולהשתמש בו בתהליכי קבלת החלטות ופתרון בעיות? השאלה עלתה במיוחד בעת האחרונה, במהלך התמודדות עם אירועים קיצוניים כמו מגפת הקורונה ושינוי האקלים, שמתבקש בה שילוב של מידע מדעי עם נושאים חברתיים.

שאלה זאת משמעותית גם בהקשר של חינוך והוראה. כותבי המאמר מציעים ליצור מצבים שבהם תלמידים יעסקו בחוסר הוודאות של תוצאות מחקרים ומגבלותיהם. הרעיון הוא לפתח את התפיסה שחקר מדעי הוא חסר ודאות ובעל מגבלות וללמד את התלמידים כיצד, למרות זאת, אפשר להיעזר בו, גם בשאלות מדעיות-חברתיות.

איך מיישמים מטרה חינוכית כזאת? כדי לענות על כך יש להבין לעומק כיצד מדענים יוצרים טענות על רקע חוסר ודאות; כיצד אנשים מבינים טענות מדעיות של חוסר ודאות; כיצד

[1] הגרסה המובאת כאן היא סקירה של תוכני המאמר המקורי, ונועדה להנגיש את המידע לציבור המורים לביולוגיה. העיבוד כלל הוספת הסברים ואיורים לתכנים מורכבים, סינון מידע שאינו נקשר לרעיון המרכזי של הגרסה המעובדת, הגדרת מונחים מקצועיים, ובמידת האפשר קישור הדברים לתהליכי למידה והוראה. המעוניינים לקרוא את המאמר המקורי מוזמנים לפנות למקור המובא בתחילת הגרסה המעובדת.

[2] בתרגום חופשי של עורכת העלון.

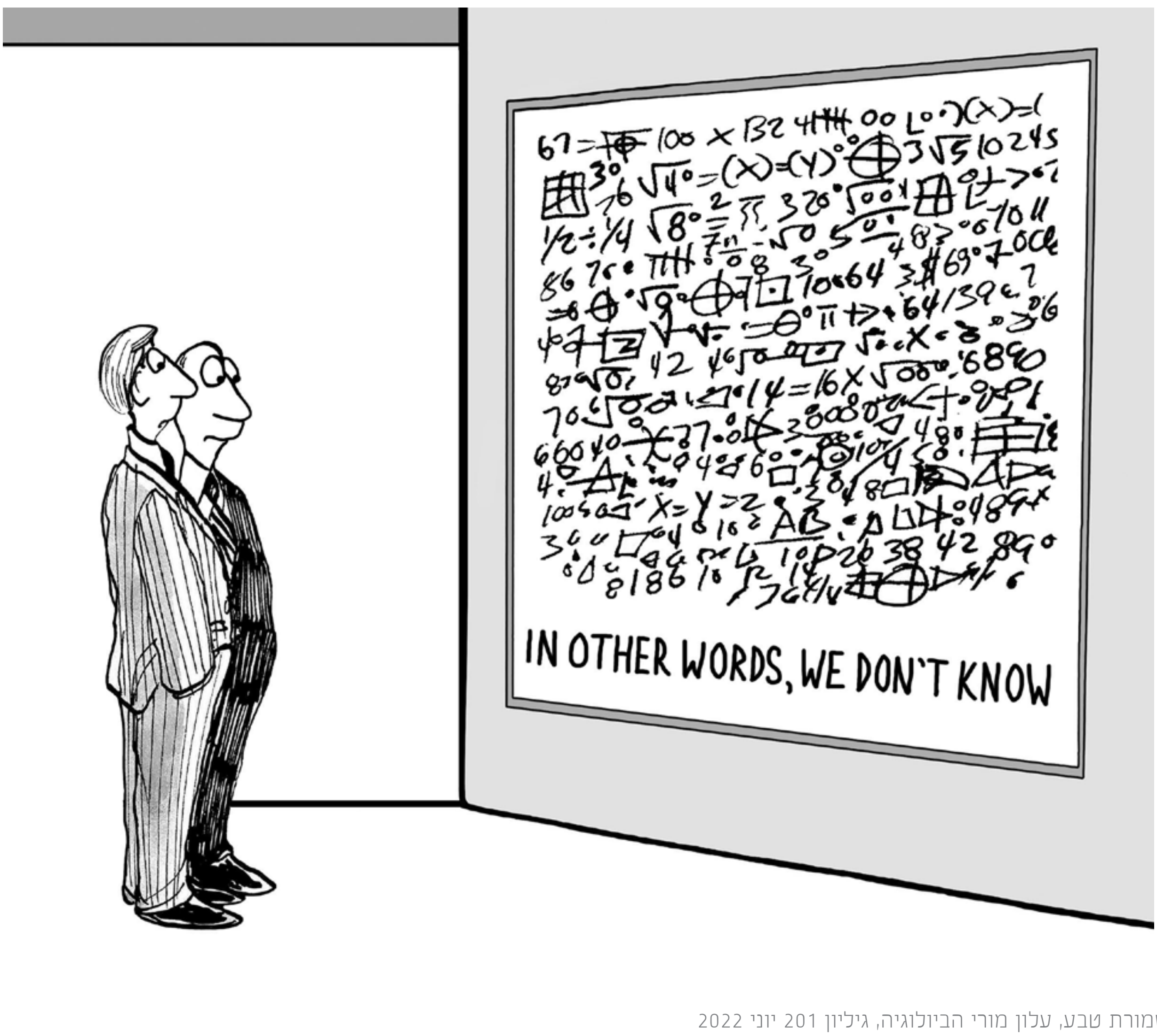
מדענים ועיתונאים מתקשרים חוסר ודאות לציבור הרחב; ומהן ההשלכות הרלבנטיות להוראת המדעים.

כיצד מדענים יוצרים טענות על רקע חוסר ודאות?

תקשורת מקצועית בין מדענים מקדישה רק חלק קטן להיבטים הוודאיים של המחקר, המתבטאים בעיקר בתוצאות. רובה מוקדשת לדיון בחוסר הוודאות במחקר בשתי דרכים: דרך אחת מראה כיצד המחקר המתואר תורם לצמצום חוסר ודאות שהיה קיים בתחום. כל מאמר מדעי מתחיל בתיאור שאלות לא פתורות בנושא שהמחקר עוסק בו. בהמשך החוקרים מעלים היפותזות הקשורות לשאלות אלה וגישות מחקר אפשריות כדי לענות עליהן. בפרק השיטות מנסים החוקרים להקטין חוסר ודאות על ידי תיאור השיטות, דרכי המדידה ואופן ניתוח התוצאות שהשתמשו בהם במחקר. בהמשך המאמר, פרקי התוצאות והדיון עוסקים בדרך שבה הפחית המחקר את חוסר הוודאות בנושא כפי שתואר במבוא. הדרך האחרת מנסה להתמודד עם חוסר ודאות שמעלות התוצאות החדשות שנאספו במחקר. לרוב מתלווה לתוצאות כימות של חוסר הוודאות, כמו סטיות תקן, הטיה כתוצאה מהדרך שבה ניטלו הדגימות וכן אנליזות סטטיסטיות המחזקות את הדגם שנחשף במחקר. בפרק הדיון מפורטות ההסתייגויות מהתוצאות, מתי הן תקפות ומתי לא, איך אפשר לפרשן במגוון דרכים, כיצד הן סותרות או הולמות תוצאות ממחקרים אחרים ואילו שאלות חדשות הן מעלות שעשויות להיות נושא למחקר חדש (Guillaume et al., 2017).

בניגוד לכל אלה, בספרי לימוד למדעים המיועדים לתלמידי תיכון או לסטודנטים באוניברסיטאות מוצגות תוצאות של מחקרים מדעיים כעובדות מוגמרות, ללא הסתייגויות וללא התייחסות לחוסר ודאות. לעיתים קרובות, מודל מדעי מוצג ללא ציון המדידות מן המאמר המקורי שעל פיהן הוצע המודל. הצגת המחקר המדעי בדרך זאת יוצרת תמונה לא מדויקת שבה חוסר הוודאות נעדר מתהליך החקר המדעי.

לתפיסה כזאת של מדע יש השפעה על התגובה לבעיות מדע וחברה, כמו שינוי האקלים ומגפת הקורונה: התחזית של הטמפרטורה העולמית הממוצעת ב-2050 או חיזוי שיעור התמותה בעקבות התפשטות SARS-Cov2 מלווים בחוסר ודאות משמעותי ולכן ההחלטות בנושאים אלה צריכות להתבצע בתנאים של חוסר ודאות יחד עם פגיעה באמון במדע (Lee, 2012).



בעוד שהמומחים מתמקדים בהיבטים כמותיים של חוסר ודאות ובדרכים למדוד אותו, האדם הסביר עסוק בידיעת הסיכונים, עצמם או חשש מפניהם, או היכולת לשלוט בהם

הקהילה המדעית פיתחה כלים כמו חישוב סיכונים (Gerba, 2006), איתור משאבים או תכנון על סמך אירועים אקראיים, המסייעים לכמת חוסר ודאות, ובתוך כך מאפשרים ליצור תחזיות, בייחוד בהקשר של בעיות מדע וחברה.

כיצד הציבור מתייחס לחוסר ודאות בהשוואה למדענים?

מחקר רב בפסיכולוגיה מוקדש להשוואה בין תפיסת חוסר ודאות בקרב האדם הסביר לבין תפיסתה בקרב מומחים בתחום מסוים (Tversky & Kahneman, 1974; Slovic, 1987; Dieckmann et al., 2017). על פי תוצאות המחקרים הללו, האדם הסביר, בדומה למומחים, מבחין בחוסר ודאות. אלא שבעוד שהמומחים מתמקדים בהיבטים כמותיים של חוסר ודאות ובדרכים למדוד אותו, האדם הסביר עסוק בהיבטים איכותניים, כמו ידיעת הסיכונים עצמם או חשש מפניהם, או היכולת לשלוט בהם (Slovic, 1987). בעבר היה מקובל לחשוב שמדענים צריכים לתקשר לציבור את התפיסה ה"נכונה" של חוסר ודאות, אבל כיום הגישה בתהליכי קבלת החלטות מבוססת יותר על שקיפות, התייעצות והכלה (Frewer, 2004). לדוגמה, אנרגיה גרעינית אינה מתקבלת כמקור אנרגיה עיקרי, שכן הסיכונים המתלווים לכורים גרעיניים נתפסים בציבור כבלתי-נשלטים והרסניים, ולעומת זאת מדעני גרעין תופסים אותם באופן הרבה פחות מסוכן. יש הטוענים שהדרך שבה הציבור תופס סיכונים עשירה יותר מזאת של מומחים ומשקפת דאגות לגיטימיות שלרוב לא עוסקים בהן בחישובי סיכון מקצועיים (Slovic, 1987). פועל יוצא של טענה כזאת הוא ששיטות מדעיות אינן מובילות בהכרח לדרך פעולה מיטבית (Scott, 2008).

אולם, בבואו להבין חישובי חוסר ודאות מדעית, הציבור נתקל בקשיים. אלה נובעים לעיתים מהנטייה להסיק מסקנות באופן חפוז, בעוד שאנליזות מדעיות וההשלכות הנובעות מהן מצריכות זהירות וזמן (Covitt et al., 2021). נוסף על כך, חוסר ודאות נתפס בעיני הציבור כהוכחה לרמה נמוכה של נתונים, לחוסר מהימנות או לחוסר תועלת (Broomell & Kane, 2017). כמו כן, הקשיים נובעים מערבוב בין היפותזות מנוגדות שאפשר להכריע ביניהן באמצעות חקר, לבין חילוקי דעות פוליטיים, כלכליים או חברתיים שחקר מדעי אינו יכול לפתור (Rice et al., 2018). כאמור, ערבוב כזה גורם לבלבול בין מדע לבין ערכים או אינטרסים, ומרחיק אותו מהציבור כאשר אלה מנוגדים להשקפתו.

חשוב לשים לב לעובדה שיש קהילות שמתמודדות עם חוסר ודאות בדרכים שונות ממדענים בתרבות המערבית. בקהילות אלה סביר שהניסיון רב השנים של הקהילה כתוצאה מחיים במערכת אקולוגית מסוימת או בתרבות מסוימת יכול לספק מידע רב ועשיר על הסביבה שבה האנשים בקהילה זו חיים, אולם ניסיון זה אינו מתוקשר בשפה מדעית ולכן מדענים מערביים עלולים לדחות אותו (Snively & Corsiglia, 2001).

כיצד חוסר ודאות מתבטא בתקשורת מדעית פופולרית?

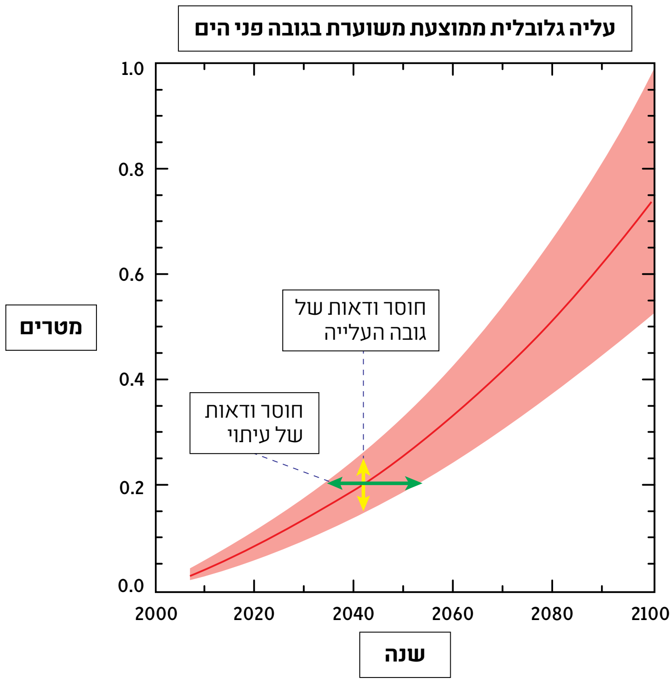
לרוב, כתבות ומאמרים בתקשורת הפופולרית מציגים תגליות מדעיות כבלתי-מעורערות, ועוסקים בעיקר בתוצאות ובהשלכות שלהן על חיינו (Baram-Tsabari & Yarden, 2004). בדומה לאלה ולספרי לימוד במדעים, גם סרטי טבע ותערוכות במוזאונים עוסקים בעיקר בתכנים מדעיים מבוססים שבהם חוסר הוודאות מצומצם והם מוצגים כעובדות מוגמרות. נוסף על כך, יש מדענים ועיתונאים שתופסים את הציבור כבעל הבנה מעטה בחוסר ודאות מדעית, ולכן כדי לפשט מסרים בוחרים להציג בהרצאות ובכתבות תגליות מדעיות ללא שפת התקשורת המדעית המקצועית (Ruhrmann et al., 2015). כל אלה תורמים לרושם המוטעה שתכנים מדעיים אינם מוטלים בספק (Cordner & Brown, 2013).

לעומת זאת, תכנים העוסקים בתפר שבין מדע לחברה מוצגים בתקשורת בהקשר של נושאים שבחזית המחקר המדעי, כך שמטבע הדברים הם מלווים בהיבטים שונים של חוסר ודאות. כך למשל, בכתב העת אטלנטיס התפרסם באפריל 2021 מאמר המציג ארבע תיאוריות אפשריות המעניקות הסברים שונים לתופעה הנדירה של קרישת דם כתוצאה מחיסון הקורונה של חברת אסטרזניקה. השאלה איזו מהתיאוריות קרובה יותר למציאות עוסקת בהיבטים תפיסתיים-איכותניים של חוסר ודאות במדע. לעומת זאת, מאמר שהתפרסם בניו-יורק טיימס בפברואר 2021 עסק בדעות מנוגדות בעניין חיסון נשים בהיריון נגד נגיף הקורונה, וחוסר הוודאות עסק בניתוח הסטטיסטי של המדגם שלא כלל קבוצה זאת של נשים, כלומר, בהיבט כמותי של חוסר ודאות.

לעיתים, תוצאות מחקרים מוצגות בעיתונות הפופולרית כשנויות במחלוקת; אלא שהמחלוקת אינה מגיעה מהמדענים עצמם או מתוך רצון לספר על מחלוקת הקיימת בין מדענים כחלק מתהליך מחקרי. במקרים אלה, נושא המאמרים הוא לרוב נושא מדעי-חברתי, כמו שינוי האקלים, והמחלוקת היא בעיקר על המדיניות שראוי לאמץ בהקשר של הנתונים המדעיים (Rice et al., 2018). בעקבות הדרך שבה המחלוקת מוצגת עלול הציבור שוב להתבלבל, ולפרש את הדברים כאילו תוצאות המחקר המדעי עצמן הן שנתונות לוויכוח.

לתקשר מדע בצורה מושכלת

דרך אחרת לתקשר מדע לציבור הרחב יכולה להיות מושכלת, ולהיעזר במחקרים שבדקו אילו דרכים יעילות יותר להביא בפני הציבור טענות לחוסר ודאות מדעית (Corbett & Durfee,2004; Dieckmann et al., 2017). לדוגמה, במחקר שנערך בנושא שינוי האקלים, הוצגו לשתי קבוצות נחקרים נתונים זהים על עלייה בטמפרטורות ועל עלייה בגובה פני הים (Ballard & Lewandowsky, 2015). לקבוצה האחת הוצגו הנתונים תוך הדגשה של חוסר ודאות מבחינת היכולת לזהות מה תהיה הטמפרטורה ומה יהיה גובה פני הים בנקודת זמן מסוימת בעתיד. לקבוצה השנייה הוצגו הנתונים תוך הדגשה של חוסר ודאות מבחינת היכולת לזהות מתי תהיה טמפרטורה מסוימת ומתי יהיו פני הים בגובה מסוים בעתיד (איור 1). הנחקרים נשאלו על תחושת האיום שהם חשים מהבנת התוצאות, ונמצא שתחושת האיום של הקבוצה השנייה הייתה גבוהה יותר והנחקרים מקבוצה זאת היו מוכנים לנקוט פעולות מנע רבות יותר. כלומר, אנשים דיווחו על תחושת איום גבוהה יותר ועל רצון לפעול כאשר גובה העלייה היה ודאי אבל לא היה ברור מתי היא תתרחש, ועל תחושת איום נמוכה יותר ופחות נטייה לנקוט פעולות מניעה כאשר היה ברור מתי היא תתרחש אך לא היה ברור לאיזו עלייה לצפות.



איור 1: בגרף נראית העלייה המשוערת של גובה פני הים על פי התחזיות המחמירות של IPCC ארצות הברית (מקור: IPCC Working Group I). אפשר לזהות שני מרחבים של חוסר ודאות: (א) עיתוי. לדוגמה, גובה פני הים יעלה ב -0.2 מטרים בין השנים 2035 לערך עד 2054 לערך, אבל לא ידוע מתי בדיוק. (ב) גובה. לדוגמה, בשנת 2040, יכול גובה פני הים לעלות בין 0.15 מטרים ל- 0.25 מטרים, אך לא ידוע בכמה בדיוק.

קיימים מחקרים שבודקים מאפיינים שונים של "הציבור", ומאפשרים להתאים את אופן הצגת חוסר הוודאות המדעית לקהלים ייחודיים. כך למשל, לאנשים התופסים חקר מדעי כעיסוק מתמשך בשאלות פתוחות חשוב להיחשף לחוסר ודאות כדי להשתכנע, ואילו אנשים התופסים מדע כתהליך המגלה עובדות חד-משמעיות יראו בחוסר ודאות נקודת חולשה של הנתונים (Rabinovich & Morton, 2012).

גישות מבוססות מחקר מעניינות מוצעות גם על ידי המדענים עצמם. לדוגמה, דו"ח של רשות המחקר הלאומית של ארצות הברית (National Research Council, 2010) מציע גישה כוללת לשלל פעולות אפשריות כהתמודדות עם שינוי האקלים, המשלבת היבטים מדעיים, חברתיים, פוליטיים, כלכליים, תרבותיים וערכיים, אך מתבססת על ההנחה שנוכח העובדה כי מתבררים נתונים חדשים והמציאות משתנה, יהיה צורך כל העת לחזור לתהליך קבלת ההחלטות, לבצע חשיבה מחודשת ולחשב שוב את הסיכונים הכרוכים בהמשך המהלך.

חינוך לשימוש באנליזות מדעיות של חוסר ודאות

מעט המחקרים העוסקים בדרך שבה תלמידים מבינים חוסר ודאות מדעית מראים שאפילו תלמידים בבית הספר היסודי יכולים להפגין הבנה משמעותית איכותנית וכמותית של חוסר ודאות, שיש לה קווי דמיון לגישות מדעיות למושג. 70% מתלמידי כיתות ב' ו-87% מתלמידי כיתות ד', שביצעו תהליך מחקר, הראו יכולת להבין חוסר ודאות של אחד או יותר רכיבים בתהליך חקר מדעי (Metz, 2004): ציפייה לתוצאה מסוימת, נתונים, מגמה בנתונים, היכולת להכליל על סמך המגמה, ואיזו תיאוריה מתאימה כהסבר למגמה. כמעט כל התלמידים (80% בכיתה ב' ו-97% בכיתה ד') שהבינו את חוסר הוודאות ברכיב אחד או יותר של החקר שביצעו הציעו שיפורים בתוכנית המחקר של עצמם כדי להקטין את חוסר הוודאות.

במחקר אחר נמצא שתלמידי כיתות ט' חושבים שגישות מחקר שונות של מדענים יכולות להוביל להשקפות שונות על הנתונים (Schroeder et al., 2019). תלמידים מעטים במחקר זה אף העלו את החשיבות של שקילת העדויות כאשר משווים בין מסקנות שונות אפשריות (כלומר, אילו עדויות תומכות באפשרות אחת ואילו באחרת). מחקר אחר בדק התייחסות לחוסר ודאות בקרב תלמידי תיכון שעבדו עם מודל ממוחשב על תיאור מקרה של זיהום מקורות מים. התלמידים הסבירו שמדענים בוחנים את הדיוק של מודל ממוחשב שהם מציעים באמצעות איסוף נתונים מהעולם האמיתי (Covitt et al., 2020). באותו מחקר התלמידים ציינו שמודל ממוחשב קשה לכייל, ושמודל כזה אינו מתאר במדויק את המציאות, מפני שקשה להתייחס באמצעותו לנתונים שאי אפשר לבודד.

על פי הממצאים הללו, תלמידים מסוגלים לזהות ולהבין חוסר ודאות בהיבטים איכותניים וכמותיים, אולם הבנת חוסר ודאות מדעית יכולה להיות קשה ללמידה. לדוגמה, במקרה של זיהום המים (Covitt et al., 2020), לאחר שיעור שעסק בהקטנת חוסר ודאות באמצעות איסוף נתונים נוספים וניתוחם, קיבלו התלמידים מפה של אזור הזיהום שחולק לתתי-אזורים. בכל אחד מהאזורים הייתה כמות שונה של נקודות לניטור הזיהום. התלמידים נשאלו באיזה אזור יהיה חוסר הוודאות הגדול ביותר בהקשר של הנתונים. רק 18% מהתלמידים ציינו שיהיה קשה להסתמך על הנתונים באזורים שיש בהם מעט נקודות ניטור.

הזדמנויות לזיהוי וחיפוש חוסר ודאות מדעית בתהליכי חקר

המחקרים שתוארו לעיל עסקו בהטמעה של חומרי למידה המשתמשים בחוסר ודאות מדעית כדי לעודד תלמידים לחפש דרכים לביסוס נתונים במהלך החקר ולפתח מיומנויות חקר, טיעונים מבוססי עדויות וכן הסברים. כך למשל, התחושה בנוגע לחוסר ודאות מדעית יכולה להתפתח מחשש עקב חוסר הוודאות להרגשה נוחה ביחס אליו ואף עד להתרגשות, כאשר חוסר ודאות מזוהה בהדרגה כהזדמנות ללמידה (Radoff et al., 2019); וביטויים של חוסר ודאות מעודדים דיון פורה ומתמשך בקרב תלמידי בית הספר היסודי ובקרב סטודנטים באוניברסיטה (Watkins et al., 2018). מכאן שהבנת חוסר ודאות מדעית יכולה לפתח חשיבת חקר ולעודד תהליכי למידה מעמיקים.

כיצד יוצרים הזדמנויות לעסוק בחוסר ודאות מדעית בכיתה? מחקר שעקב אחר דרכים של מורים למדעים לפתח השקפה מעמיקה על חוסר ודאות זיהה שלוש אסטרטגיות הוראה במהלך למידת חקר עם תלמידים (Manz, E., & Suarez, 2018): האחת היא להתחיל את רצף ההוראה או את החקר בתופעה מורכבת. השנייה היא לחזור על פעולות חקר כמו איסוף נתונים חוזר ונשנה. השלישית היא למנף הבדלים בדרכי החקר של התלמידים. בהתאם לכך, מאפיין חשוב של משימות המעודדות תהליכי למידה מעמיקים במדעים הוא דווקא חוסר בהירות (Tekkumru-Kisa et al., 2021).

כיצד מתבטאות משימות כאלה בפועל?

א. התמודדות עם חוסר ודאות מדעית בתהליכי חקר

במחקר בנושא הבנת חוסר ודאות שנערך בקרב תלמידי בית ספר יסודי, הם התבקשו למדוד את המרחק בין קצות הידיים של המורה שלהם כאשר הן פרוסות לצדדים (Lehrer et al., 2011). המדידות שהתלמידים ביצעו היו מעט שונות זו מזו. התלמידים נחשפו לתוצאות המדידה של חבריהם, והתבקשו לבדוק איך אפשר להגיע להערכה הטובה ביותר של מדידה אמיתית. לשם כך הוטלו על התלמידים שתי משימות: האחת, למצוא איך אפשר להשתמש בפיזור של המדידות כדי להעריך טוב יותר את המרחק שבין ידי המורה. השנייה, איך אפשר לבטא את ההבדלים בין המדידות שלהם בצורה כמותית. כשנבדקו דרכי ההתמודדות של התלמידים עם משימות אלה, נמצא שהם העלו רעיונות המשיקים למושגים סטטיסטיים כמו חציון, טווח ופיזור.

דוגמה נוספת אפשר למצוא בחומרים שפותחו עבור תלמידי חטיבת ביניים, שבהם התלמידים מתבקשים לזהות מגמות בנתונים עם רעש רקע גבוה, כלומר נתונים שקשה לזהות בהם מגמה כלשהי. בפעילות חקר אחת התבקשו התלמידים להחליט איזו תרופה טובה יותר מבין שתי תרופות לאיידס (Cobb et al., 2003), על סמך מדידות של תאי T מחולים רבים. בפעילות אחרת, התבקשו התלמידים לקבוע מה הקשר בין תאריך לבין ריכוזי פחמן דו-חמצני באטמוספרה מתוך מדידות רבות בזמנים שונים לאורך 40 שנה (McClain et al., 1999). בשני המקרים היה על התלמידים לפתח כלים סטטיסטיים למגמה המרכזית ולשונות. לאחר מכן היה עליהם להשתמש בכלים שפיתחו כדי להגיע להסכמה על התשובה הטובה ביותר לשתי השאלות, וכמו כן לקבוע עד כמה הם בטוחים בתשובה שנתנו.

בפרויקט זיהום המים שהוזכר לעיל (Covitt et al., 2020), התלמידים למדו על דרך שבה מדענים הקטינו חוסר ודאות מדעית באמצעות איסוף נתונים שאפשרו לקבוע היכן היו מקורות הזיהום באזור. לסיום, היה עליהם להמליץ איך להגיב לזיהום, בהתחשב במגבלות תקציב, ולהתחשב במגוון בעלי עניין הקשורים למקרה. מעיסוק כמותי בחוסר ודאות מדעית התרחב הנושא לתפר שבין מדע לחברה, ולעיסוק בחוסר ודאות איכותני.

ב. התמודדות עם חוסר ודאות מדעית בתקשורת הפופולרית

כמעט שלא פותחו כלים כדי לסייע לתלמידים לזהות ולהעריך אמירות מפורשות של חוסר ודאות בטקסטים מהתקשורת, ובהכרח גם אין מחקר על יעילותם של כלים מסוג זה. כלים אלה יכולים להשתלב עם כלים אחרים לפיתוח אוריינות תקשורתית, כמו הנמקה רוחבית, כלומר, בדיקת מקורות מידע נוספים לצורך הערכה של מהימנות המידע המקורי (Wineburg & McGrew, 2019). אפשר ליצור כלי שיעודד תלמידים להבדיל בין עניינים הקשורים למתן אמון במדע, לבין עניינים הקשורים לחוסר ודאות מדעית. כלי אחר יכול לסייע לתלמידים לזהות ביטויים של חוסר ודאות איכותני, כמו הצגת השערה בלתי-פתורה ואפשרויות שונות שמדענים מציעים כדי לבדוק אותה; או כמו מחלוקת בין מדענים לקבוצות אחרות של בעלי עניין. כלים כאלה יכולים לפתח רגישות וביקורת בקרב תלמידים לדרך שבה חוסר ודאות מדעית מוצג בתקשורת, וכן ליציבות הטיעון המדעי לאורך זמן בהינתן מידת חוסר הוודאות המדעית שמתלווה לנושא.

> חוסר ודאות שזור בכל תקשורת בין מדענים, אם אלה מאמרי מחקר המתפרסמים בכתבי עת מדעיים, או בהרצאות בכנסים, או בספרים

סיכום

אירועים קיצוניים, כמו מגפת הקורונה ושינוי האקלים, החריפו את משבר האמון בין קבוצות מסוימות בציבור לבין המדע, והעלו שוב את השאלה: מדוע על הציבור לבטוח במדע? כותבי המאמר מציעים כי פיתוח הבנה של חוסר ודאות מדעית, באופן איכותני וכמותי, יכול לעזור להחליף את השאלה הזאת בשאלה אחרת: כיצד על הציבור לבטוח במדע? היכרות עם הדרכים שבהן מדענים מתייחסים לחוסר ודאות מדעית ומכמתים אותו, יחד עם זיהוי מצבים שבהם אין פירוט על חוסר ודאות מדעית בתקשורת הפופולרית, יכולים למזער את חוסר האמון כלפי מידע מדעי וכלפי שילובו בקבלת החלטות בנושאים חברתיים-מדעיים. לחינוך המדעי ניתן תפקיד חשוב במאמר; החוקרים

מציגים בו קווים מנחים לפיתוח חומרי למידה שייצרו עבור תלמידים הזדמנויות לעסוק בחוסר ודאות במחקר מדעי. חומרי למידה אלה יסייעו להם להשתמש במידע מדעי בצורה פורייה כאזרחים, ואף יעודדו סקרנות ורצון לחפש מידע. השאלות אם מדע ראוי לאמון ואם יש בו חוסר ודאות נוגעות לשני היבטים שונים אך קשורים זה בזה, וחשוב לאפשר לתלמידים להבחין בין השניים, אך גם לתת להם הזדמנויות להבין את הקשר ביניהם.

אנשים בעלי אוריינות מדעית מבינים שמדע הוא מוגבל, חסר ודאות ועם זאת - שימושי. המשמעות היא שיהיו שאלות שאין עליהן תשובה מדעית בלבד, ושאלות שכלל לא יקבלו תשובות מדעיות; שבנושאים חברתיים-מדעיים המידע המדעי הוא רק חלק מהמידע הדרוש לפתרון הבעיה; ועם זאת, שלמידע המדעי יש חשיבות בתהליך והוא שימושי למרות חוסר הוודאות המאפיין אותו. מדע מספק כלים חזקים להסברים ולתחזיות שיכולים לסייע לקבל החלטות מושכלות באתגרים כמו שינוי האקלים ומגפות עולמיות. אנשים בעלי אוריינות מדעית יודעים לחפש עוד מידע כשהם נתקלים בחוסר ודאות, ולהעריך מסקנות מדעיות ותחזיות באמצעות מגוון של אפשרויות וגישות. בכלים אלה הם קובעים אם ראוי לתת אמון במידע המדעי ועד כמה הוא חסר ודאות.

Ballard, T. & Lewandowsky, S. (2015): “When, not if: The inescapability of an uncertain climate future”. Philosophical Transactions of the Royal Society a: Mathematical, **Physical and Engineering Sciences 373**(2055): 20140464.

Baram-Tsabari, A. & Yarden, A. (2004): “Text Genre as a Factor in the Formation of Scientific Literacy”. **Journal of Research in Science Teaching 42(4)**: 403-428.

Broomell, S.B. & Kane, P.B. (2017): “Public perception and communication of scientific uncertainty”. **Journal of Experimental Psychology: General 146(2)**: 286.

Cobb, P., McClain, K. & Gravemeijer, K. (2003): “Learning about statistical covariation”. **Cognition and Instruction 21(1)**: 1–78.

Cordner, A. & Brown, P. (2013, September): “Moments of uncertainty: Ethical considerations and emerging contaminants”. **Sociological Forum 28(3)**: 469–494.

Covitt, B.A., Berkowitz, A., Boone, R., Caplan, B., Cooper-Wagoner, J., Gunckel, K.L., Jahnke, M., Love, G., Marino, D. & Moore, J. (2020, March): “Developing and validating a learning progression for computational thinking in Earth and Environmental Systems Sciences”. Paper presented at NARST, Portland, OR. https:// narst. org/ confe rences/ 2020- annual- confe rence (Conference cancelled).

Covitt, B.A., Parker, J., Kohn, C., Lee, M., Lin, Q. & Anderson, C.W. (2021): “Understanding and responding to challenges students face when engaging in carbon cycle pool-and-flux reasoning”. **Journal of Environmental Education 52(2)**: 98–117.

Dieckmann, N.F., Gregory, R., Peters, E. & Hartman, R. (2017): “Seeing what you want to see: How imprecise uncertainty ranges enhance motivated reasoning”. **Risk Analysis 37(3)**: 471–486.

Frewer, L. (2004): “The public and effective risk communication”. **Toxicology Letters 149(1–3)**: 391–397.

Freudenburg, W.R., Gramling, R. & Davidson, D.J. (2008): “Scientific certainty argumentation methods (SCAMs): science and the politics of doubt”. **Sociological Inquiry 78(1)**: 2-38.

Gerba, C.P. (2006): “Chapter 14: Risk assessment”. **Environmental and Pollution Science 2**: 553.

Guillaume, J.H., Helgeson, C., Elsawah, S., Jakeman, A.J. & Kummu, M. (2017): “Toward best practice framing of uncertainty in scientific publications: A review of water resources research abstracts”. Water Resources Research 53(8): 6744–6762.

Lee, Y.C. (2012): “Socio-scientific issues in health contexts: Treading a rugged terrain”. **International Journal of Science Education 34(3)**: 459–483.

Lehrer, R., Kim, M.J. & Jones, R.S. (2011): “Developing conceptions of statistics by designing measures of distribution”. **ZDM – Mathematics Education 43(5)**: 723–736.

Manz, E. & Suarez, E. (2018): “Supporting teachers to negotiate uncertainty for science, students, and teaching”. **Science Education 102(4)**: 771–795.

McClain, K. (1999): “Reflecting on students’ understanding of data”. **Mathematics Teaching in the Middle School 4(6)**: 374–380.

Metz, K.E. (2004): “Children’s understanding of scientific inquiry: Their conceptualization of uncertainty in investigations of their own design”. **Cognition and Instruction 22(2)**: 219–290.

National Research Council (2010): Adapting to the Impacts of Climate Change. Washington, DC: **The National Academies Press**. https://doi.org/10.17226/12783.

Rabinovich, A. & Morton, T.A. (2012): “Unquestioned answers or unanswered questions: Beliefs about science guide responses to uncertainty in climate change risk communication”. **Risk Analysis: An International Journal 32(6)**: 992–1002.

Radoff, J., Jaber, L.Z. & Hammer, D. (2019): “‘It’s scary but it’s also exciting’: Evidence of meta-affective learning in science”. **Cognition and Instruction 37(1)**: 73–92.

Rice, R.E., Gustafson, A. & Hoffman, Z. (2018): “Frequent but accurate: A closer look at uncertainty and opinion divergence in climate change print news”. **Environmental Communication 12(3)**: 301–321.

Ruhrmann, G., Guenther, L., Kessler, S.H. & Milde, J. (2015): “Frames of scientific evidence: How journalists represent the (un) certainty of molecular medicine in science television programs”. **Public Understanding of Science 24(6)**: 681–696.

Schroeder, M., McKeough, A., Graham, S.A. & Norris, S.P. (2019): “Students’ views of uncertainty in formal and personal science”. **Research in Science & Technological Education 37(2)**: 239–257.

Schroeder S.A. (2021): “Democratic Values: A Better Foundation for Public Trust in Science”. **The British Journal for the Philosophy of Science 72(2)**: 545-562. https://doi.org/10.1093/bjps/axz023

Scott, J.C. (2008): **Seeing like a state**. Yale University Press.

Slovic, P. (1987): “Perception of risk”. **Science 236(4799)**: 280–285.

Snively, G. & Corsiglia, J. (2001): “Discovering indigenous science: Implications for science education”. **Science Education 85(1)**: 6–34.

Tekkumru-Kisa, M., Preston, C., Kisa, Z., Oz, E. & Morgan, J. (2021): “Assessing instructional quality in science in the era of ambitious reforms: A pilot study”. **Journal of Research in Science Teaching 58(2)**: 170–194.

Tversky, A. & Kahneman, D. (1974): “Judgment under uncertainty: Heuristics and biases”. **Science 185(4157)**: 1124–1131.

Watkins, J., Hammer, D., Radoff, J., Jaber, L.Z. & Phillips, A.M. (2018): “Positioning as not understanding: The value of showing uncertainty for engaging in science”. **Journal of Research in Science Teaching 55(4)**: 573–599.

Wineburg, S. & McGrew, S. (2019): “Lateral reading and the nature of expertise: Reading less and learning more when evaluating digital information”. **Teachers College Record 121(11)**: 1–40.