

## ללמוד על חלבונים באמצעות שימוש ב-Jmol המציג מולקולות בתלת-ממד: השקפות מורים ותלמידים

ענת ירדן

אוהד לבקוביץ

מכון ויצמן למדע

מכון ויצמן למדע

[anat.yarden@weizmann.ac.il](mailto:anat.yarden@weizmann.ac.il)[ohad.levkovich@weizmann.ac.il](mailto:ohad.levkovich@weizmann.ac.il)

### Learning about Proteins Using Jmol 3-D Molecule Viewer: Teachers and Students Views

Ohad Levkovich

Anat Yarden

Weizmann Institute of Science

Weizmann Institute of Science

#### Abstract

Science students, who learn about proteins through using of software which presents visual molecular models, are able to acquire domain-specific content knowledge. For example, Israeli students who major in biotechnology, use Jmol, an open source molecule viewer for 3-D chemical structures, for acquiring content knowledge about proteins. This research analyzed students and teachers views about the use of Jmol and learning about proteins with it. Participants were 160 biotechnology students who answered a questionnaire and two experienced biotechnology teachers were interviewed. Findings indicate that Jmol using was perceived by students as interesting but challenging. In addition, the visualization of structure through the 3-D molecular models of proteins was viewed by students as adequate for acquiring protein structure knowledge but less for acquiring protein mechanism and function knowledge. The two teachers pointed out that they see the using of Jmol as an aspect of engagement for learning about proteins, but the procedural skills of using Jmol was not considered by them as important aspect for learning. In light of students and teachers views, one needs to consider research in learning of proteins through Jmol with two separate aspects: (1) Software using, and (2) structures' visualization through 3-D molecular models, as two factors that influence the acquisition of scientific knowledge.

**Keywords:** Scientific knowledge, proteins, molecular model, biotechnology.

#### תקציר

תלמידי מדעים הלומדים על מבנה, תפקוד ותפקיד של חלבונים ביצורים חיים באמצעות הפעלת תוכנה המציגה מודלים מולקולריים נדרשים לרכוש ידע מדעי ספציפי לתחום. לדוגמה, תלמידי מגמת ביוטכנולוגיה בישראל משתמשים ב-Jmol, תוכנת קוד פתוח המציגה מודלים מולקולריים בתלת-ממד של מבנים כימיים, כדי לרכוש ידע תוכן על חלבונים. במחקר הנוכחי נבחנו השקפות תלמידים ומורים על שימוש ב-Jmol ועל למידה של חלבונים באמצעותו. המשתתפים היו מאה ושישים תלמידים אשר ענו על שאלון ובנוסף רואיינו שני מורי ביוטכנולוגיה מנוסים. ממצאי המחקר מראים כי הפעלת Jmol נתפסה על ידי התלמידים כמעניינת אך מאתגרת. בנוסף, הצגת המודל התלת-ממדי של החלבון והמחשת המבנה נתפסה כמקדמת רכישת ידע תוכן אודות מבנה חלבונים אך פחות כמקדמת רכישת ידע על תפקוד ותפקיד החלבון. שני המורים דווחו כי הם רואים את הפעלת Jmol כמאפיין הרוותם את התלמידים ללמידה

על חלבונים, אך המיומנות הפרוצדורלית של הפעלת התוכנה לא נתפסה כחשובה או מועילה עבורם כמטרת למידה. לאור השקפות התלמידים והמורים, ייתכן ויש לבחון את הלמידה על חלבונים ב-Jmol, דרך (1) הפעלת התוכנה ו-(2) המחשת מבנים באמצעות מודלים תלת-ממדיים, כשני גורמים אשר משפיעים על רכישת ידע תוכן מדעי.

**מילות מפתח:** ידע מדעי, חלבונים, מודל מולקולרי, ביוטכנולוגיה.

## רקע תיאורטי

למידת מדעים במאה ה-21 בבתי הספר משלבת רכישת ידע תוכן דיסציפלינרי, ידע פרוצדורלי וכן ידע אפיסטמי על מדע אשר מתאגדים יחדיו לכדי ידע מדעי (Osborne, 2014). רכישת הידע המדעי על רכיביו מסייעת לתלמידי מדעים להבנות אוריינות מדעית (OECD, 2016). עם זאת, בהזדמנויות שונות נתקלים תלמידי מדעים בלמידה של מערכות מורכבות אשר כוללות מושגים הדורשים ידע מדעי ברמה גבוהה. מודל SBF (Structure, Behavior, Function) שהוצע על ידי Hmelo-Silver ו-Pfeffer (2004) ממיין את הידע המושגי על מערכות מורכבות, כדוגמת מערכות בגוף האדם, למבנה, תפקוד ותפקיד.

תלמידי הלומדים ביולוגיה וביוטכנולוגיה עשויים להעמיק את ידיעותיהם בנושא התא באמצעות ידע על חלבונים (Alberts, 1998). רכישת ידע על מבנה, תפקוד ותפקיד חלבונים ביצורים החיים יכולה להיות מתווכת על ידי תצוגה תלת-ממדית של מודל מולקולרי ממוחשב (Goodsell et al., 2010; O'Donoghue et al., 2015). על אף האמצעים הממוחשבים, רכישת ידע תוכן אודות הקשרים בין מבנה, תפקוד ותפקיד חלבון אינה פשוטה כלל ועיקר אף לסטודנטים בהשכלה הגבוהה (Bivall, Ainsworth, & Tibell, 2011).

ביואינפורמטיקה היא תחום יישומי העוסק בפיתוח ויישום של מאגרי מידע וכלים ממוחשבים המשמשים לארגון, אחסון, ניתוח והצגה של מידע ביולוגי ניסויי (NIH, 2001). בשנים האחרונות תלמידי תיכון בישראל אשר לומדים את מקצוע הבחירה מערכות ביוטכנולוגיות (ביוטכנולוגיה), מרחיבים את לימודיהם בנושא ביואינפורמטיקה, ובכלל זה הם לומדים אודות חלבונים. הפרק "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה – חקר מתוקשב" מופיע בתכנית הלימודים (משרד החינוך, 2014) וסביבת למידה מבוססת חקר הנקראת "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה" פותחה ועוצבה עבור תלמידים אלו ומוריהם (<https://st-moodle.weizmann.ac.il/course/view.php?id=350>). הסביבה מקדמת התנסות בכלים ביואינפורמטיים לצורך פתרון משימות למידה ביולוגיות בעלות היבטים יישומיים, תוך רכישת ידע תוכן ביולוגי וביואינפורמטי וכן ידע פרוצדורלי (Machluf, Gelbart, Ben-Dor, & Yarden, 2016). בנוסף, משימות הלמידה מספקות הזדמנות להיחשף לאפיסטמולוגיה של מדע אותנטי (Chinn & Malhotra, 2002).

אחד מהכלים בהם נעשה שימוש במשימות בסביבה הוא Jmol. תוכנת Jmol מציגה מודלים מולקולריים בתלת-ממד של מבנים כימיים ובכללם חלבונים, בהתבסס על נתונים ממאגר מידע אשר בו מקובצים מספר רב של רצפים ומבנים שנקבעו בשיטות ניסוייות. התלמידים משנים ומעצבים את המודל התלת-ממדי ב-Jmol. דרישות ההפעלה מתלמידים המשתמשים ב-Jmol כוללות בין השאר: שינוי התצוגה המבנית של מודל החלבון וכן הצגה והדגשה של מרכיבים מסוימים בתצוגה, כגון חומצות אמיניות החשובות לפעילות החלבון. המיומנויות בהפעלת Jmol נרכשות באמצעות שליטה בסרגלי התפריטים וכן מתוך ניסוח וכתובה של פקודות בלוח בקרה. כך לדוגמה, התלמידים מתמחים בשינוי תצוגת מבנה חלבון ממבנה שניוני לתצוגת כדור-מקל או מציגים חומצות אמינו נבחרות, יונים המשתתפים בפעילות החלבון ועוד.

המחשה באמצעות מודלים של מבנים מולקולריים המוצגים על מסך המחשב נמצאה כמקדמת רכישת ידע תוכן דיסציפלינרי בקרב תלמידי תיכון (Dori & Kaberman, 2012; Wu, Krajeck, & Soloway, 2001) אך הפעלת התוכנה עצמה לא נבדקה כגורם משפיע. במחקר זה, המהווה שלב מקדים לבחינת למידה ורכישת ידע מדעי באמצעות שימוש ב-Jmol, נבחנו השקפות תלמידים ומורים על השימוש ב-Jmol כמקור לרכישת ידע מדעי ספציפי הקשור לחלבונים על פי שני מאפיינים נפרדים: הפעלת התוכנה (Software Using) שיש בה מרכיב פרוצדורלי, והמחשה (Visualization) באמצעות מודלים תלת-ממדיים של חלבונים, אשר בה יש מרכיב פרוצדורלי-תכני (Osborne, 2014). ידע התוכן הספציפי לחלבונים נבחן בנפרד עבור מבנה, תפקוד ותפקיד על פי המסגרת התיאורטית של Hmelo-Silver ו-Pfeffer (2004).

## מטרת המחקר ושאלות המחקר

מחקר זה מתמקד בהשקפות תלמידים ומורים על האתגר בלמידה אודות חלבונים באמצעות Jmol וכן בהשקפותיהם על רכישת ידע תוכן על חלבונים באמצעות הפעלת התוכנה והמחשה דרך הצגת המודלים התלת-ממדים של החלבונים. במחקר נבחנו השאלות הבאות:

1. כיצד נתפס בקרב התלמידים Jmol בהשוואה לכלים ביואינפורמטיים אחרים?
2. אילו מאפייני שימוש ב-Jmol תורמים להנאה ולהבנה לדעתם של תלמידים?
3. מהן השקפות התלמידים על האתגר בלמידה באמצעות Jmol?
4. מהן השקפות שני מורים מנוסים על רכישת ידע תוכן וידע פרוצדורלי על ידי תלמידים הלומדים באמצעות Jmol?

## מתודולוגיה

### מדגם

הנתונים לשלושת שאלות המחקר הראשונות נאספו מתוך שאלון אינטרנטי שהופץ ברשת באמצעות חלק ממורי הביוטכנולוגיה לתלמידי כיתותיהם כשבוע לפני בחינת הבגרות בביואינפורמטיקה שנערכה בשנה"ל תשע"ו. במהלך השנה תלמידים בבתי ספר שונים בצעו משימות למידה מסביבת "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה" אשר כללו שימוש ב-Jmol, וכן משימות למידה אחרות שבהן הפעילו כלים ביואינפורמטיים אחרים. מספר התלמידים שענו על השאלון היה 160, כולם תלמידי מגמת ביוטכנולוגיה בכיתה י"ב, משלושים וחמישה בתי ספר בישראל (110 בנות ו-50 בנים). משך איסוף השאלונים ארך כשבועיים. כדי לתת מענה על שאלת המחקר הרביעית, רואינו שני מורי ביוטכנולוגיה המנוסים בהוראת הביואינפורמטיקה ושימוש ב-Jmol. שני המורים בעלי תואר שני ביולוגיה, מורה א' בעל 20 שנות וותק ומורה ב' בעלת 31 שנות וותק בהוראה.

### כלי המחקר ואופי ניתוח הנתונים

כדי לתת מענה על שאלת המחקר הראשונה, התבקשו תלמידים לבחור כלי ביואינפורמטי שבהפעלתו ובשימוש בו התמחו, על פי הקריטריונים הבאים: המעניין ביותר ללמידה, הקשה ביותר להפעלה, בעל דף התוצאה המורכב ביותר לניתוח וכן הקשור ביותר לידע שרכשו בנושא הנדסה גנטית אשר נלמד באותה שנה. ארבעת הכלים שבהם התמחו התלמידים באותה שנה היו: ENTREZ שהוא מנוע חיפוש לרשומות הנושאות מידע ביולוגי המצוי במאגרי מידע; BLAST שהוא מנוע חיפוש המתבסס על דמיון רצפי בין רצף שאילתה לבין רצפים ממאגר מידע; ORF-Finder שהוא כלי המנבא מסגרת קריאה פתוחה מתוך רצפים גנטיים בעלי משמעות; וכן Jmol שמטרתו ומאפייניו תוארו בפרק הקודם. כל המשימות התבססו על מחקר מדעי אותנטי, כאשר בכל משימה כלי אחר מסייע בפתרון בעיית המחקר (Machluf & Yarden, 2013). התפלגות הבחירה של התלמידים בכלים השונים עלתה על 100% מכיוון שניתנה להם האפשרות לבחור יותר מכלי ביואינפורמטי אחד בכל קריטריון.

כדי לתת מענה על שאלת המחקר השנייה, התלמידים התבקשו לענות על שתי שאלות נוספות: האחת היא "מהו המאפיין שגרם לי להנאה רבה יותר?" והשנייה היא "מהו המאפיין שגרם לי להבין יותר על חלבונים?" התלמידים נדרשו לבחור באחת מבין האפשרויות הבאות כתורמת ביותר להנאה או להבנה: הפעלת Jmol (Software Using), הצגת מבנה החלבון (Visualization), שניהם או אף אחד מהם.

כדי לתת מענה לשאלת המחקר השלישית, בחלק השלישי של השאלון, ביטאו התלמידים הסכמה עם 14 היגדים, מתוכם ארבעה הופכיים, על פי סולם מסוג ליקרט (Likert type scale) המורכב מ-4 נקודות: מ-1 (לא מסכים) ועד 4 (מסכים). לאחר המענה התבצע תהליך הגדרת הגורמים אשר כלל ניתוח גורמים (Factor analysis) ובדיקת מהימנות. קבוצות ההיגדים התקבצו במהלך הניתוח לשלושה גורמים כמתואר בטבלה 1.

**טבלה 1. דוגמאות להשקפות תלמידים על האתגר בלמידה באמצעות Jmol**

היגד לדוגמה	עקיבות פנימית (Cronbach's $\alpha$ )	מספר הפריטים	הגורם
"בחירת חלק ממבנה החלבון באמצעות לוח הבקרה, הצגתו וצביעתו, היא פעולה פשוטה עבורי כשאני מפעיל את Jmol"	0.8	7	ידע פרוצדורלי של התלמידים הקשור בהפעלת Jmol
"הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין את מאפייני המבנה השלישוני שלו"	0.68	3	ידע תוכן על מבנה חלבון משולב עם ידע פרוצדורלי של מאפייני המחשה
"הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין מדוע הייצור החי המבטא את החלבון מותאם לסביבתו הטבעית"	0.8	4	ידע תוכן על תפקוד ותפקיד חלבון משולב עם ידע פרוצדורלי של מאפייני המחשה

כדי לתת מענה על שאלת המחקר הרביעית, בוצעו ראיונות חצי מובנים מבוססי-תוצרים (Henderson, Yerushalmi, Kuo, Heller, & Heller, 2007) עם שני מורים. הריאיון עודד את המורים להציף את השקפותיהם על למידה בכיתה באמצעות שימוש ב-Jmol. המידע שנאסף בראיונות תומלל ונחתם על פי Chi (1997). מתוך תמלול הראיונות נבחרו מקטעים שאופיינו כיחידות ניתוח בעלות משמעות שתובהר להלן. בכל אחת מיחידות הניתוח זוהתה סכמת קידוד שבה שתי קטגוריות עיקריות (טבלה 2). הקטגוריה הראשונה היא מאפייני שימוש ב-Jmol. זו נחלקת לשתי תת-קטגוריות: הפעלת התוכנה והמחשה באמצעות המודל התלת-ממדי. הקטגוריה השנייה היא רכיב הידע הנרכש. זו נחלקת לשתי תת-קטגוריות: ידע תוכני וידע פרוצדורלי (Osborne, 2014). רכיב הידע התוכני מתפצל למושגים משלוש רמות: מבנה חלבון, תפקוד חלבון, ותפקיד חלבון (Hmelo-Silver & Pfeffer, 2004). סכמת הקידוד המוחצנת ביחידת הניתוח (טבלה 2) משלבת בין שתי הקטגוריות ובוחנת לאורך את השקפת המורה על מאפייני השימוש ב-Jmol (הפעלה או המחשה) בהקשר לידע נרכש (תוכן או פרוצדורלי).

**טבלה 2. סכמת הקידוד להשקפות המורים על רכישת ידע תוכן וידע פרוצדורלי העולות מתוך הקטגוריות ותתי הקטגוריות ביחידות הניתוח**

רכיב ידע נרכש	בהקשר לרכישת	מאפייני שימוש ב-Jmol	כלפי	השקפת המורה
ידע פרוצדורלי <sup>1</sup> או ידע תוכן <sup>2</sup>		הפעלת התוכנה או המחשה באמצעות המודל התלת-ממדי		חיובית או ניטרלית או שלילית

1 – ידע פרוצדורלי שזוהה בראיונות הוא ידע על הפעלת התוכנה ולא ידע על ייצוגים.

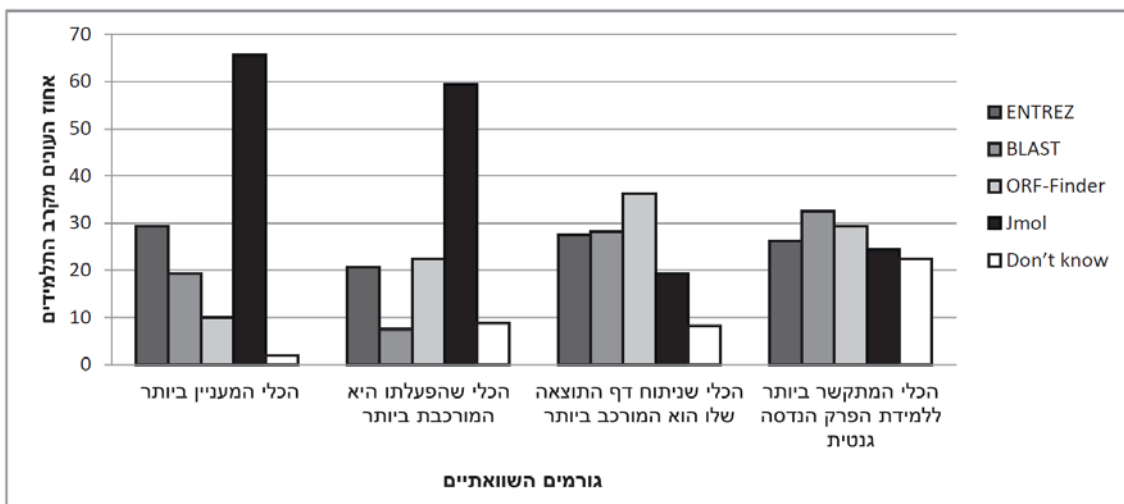
2 – ידע התוכן נבחן בנפרד בכל יחידת ניתוח כידע תוכן על מבנה, ידע תוכן על תפקוד וידע תוכן על תפקיד חלבון. במידה ולא זוהתה אחת מהרמות, ידע התוכן אופיין ככללי.

קביעת יחידות הניתוח, קידוד הקטגוריות ותיקוף המומחים לקטגוריות, ולסכמות הקידוד נעשו בעזרת תוכנת ATLAS. קידוד הקטגוריות ותתי הקטגוריות במסגרת יחידות הניתוח בוצע על ידי החוקר הראשון, ותוקף על ידי החוקרת השנייה בהתאמה של יותר מ-95%.

**ממצאים**

**השקפות התלמידים על Jmol בהשוואה לכלים ביואינפורמטיים אחרים**

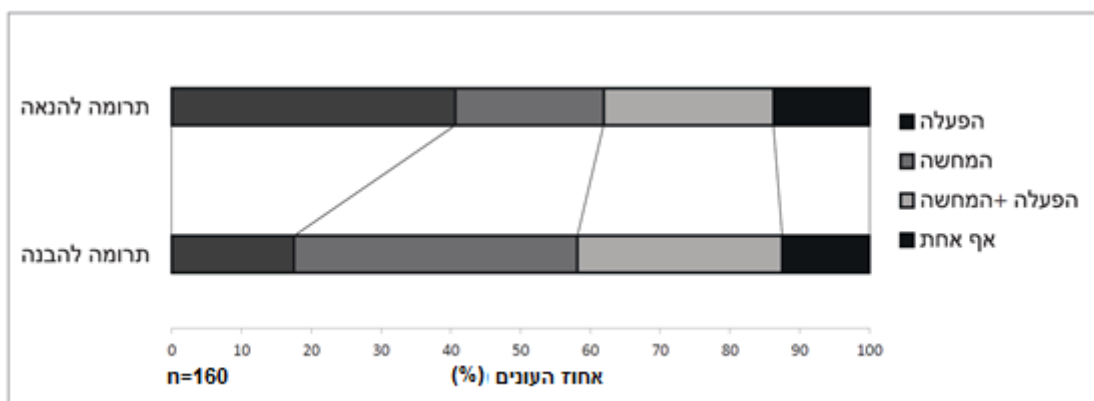
מניתוח התפלגות תשובות התלמידים עולה כי מרבית התלמידים זיהו את Jmol ככלי הביואינפורמטי המעניין ביותר לשימוש בד בבד עם היותו המורכב ביותר לשימוש בהשוואה לשלושת הכלים האחרים בהם התנסו התלמידים במסגרת לימודי הביואינפורמטיקה (איור 1).



**איור 1. העדפות תלמידי מגמת ביוטכנולוגיה הניגשים לבחינת בטרות בביואינפורמטיקה לכלי ביואינפורמטי (n=160)**

**תרומת מאפייני שימוש בכלי Jmol להנאה ולהבנה של תלמידים**

כאמור, השימוש ב-Jmol כולל שני מאפיינים: הפעלת התוכנה (Software Using) והמחשה (Visualization) של מודלים תלת-ממדיים של חלבונים. בשתי שאלות שנשאלו התלמידים, נבדקו השקפותיהם על תרומת כל אחד מהמאפיינים הללו להנאה ולהבנה (איור 2).

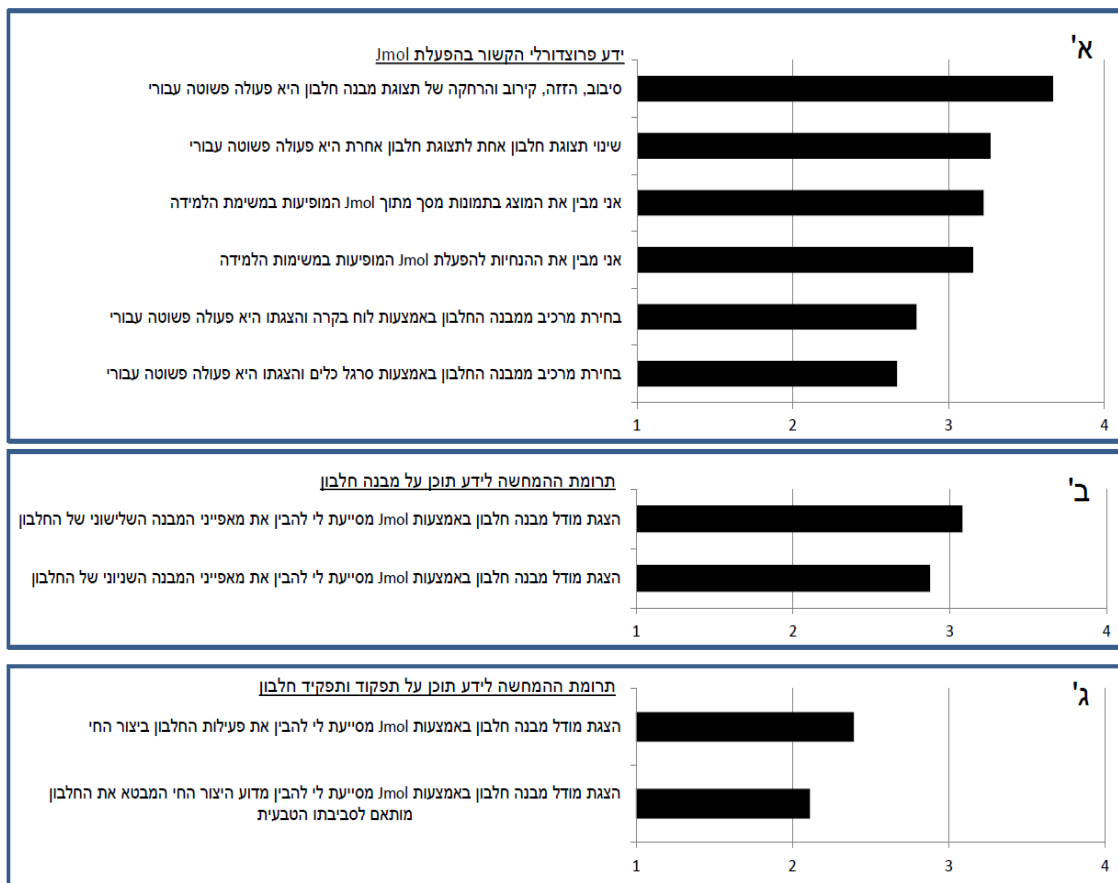


**איור 2. התפלגות השקפות תלמידים (n=160) על תרומת הפעלת Jmol והמחשת מודל החלבון באמצעות הכלי, על העניין בלמידה ועל ההבנה**

בהשוואה של השכיחות הקיימת מול השכיחות האקראית של תשובות התלמידים בכל שאלה בנפרד נמצאו הבדלים מובהקים בין הפעלה להמחשה. נמצא כי תלמידים רואים באופן מובהק את הפעלת Jmol כגורם העיקרי בהגברת העניין שלהם בלמידה  $\chi^2=11.67$   $p<.01$  וכן שהם רואים את ההמחשה באמצעות מודלים תלת-ממדיים של חלבונים כגורם העיקרי התורם להבנת נושא החלבונים  $\chi^2=15.29$   $p<.005$ .

### השקפות תלמידים על האתגר בהפעלת Jmol וברכישת ידע תוכן דיסציפלינרי

מדיווחי התלמידים על אתגרים בהתמודדות עם מאפיינים פרוצדורליים הנוגעים להפעלת Jmol ניכרים קשיים בביצוע פעולות של בחירת מרכיבים בתצוגה המבנית של החלבון והצגתם, וזאת בהשוואה לפעולות אחרות שלהם כדוגמת שליטה על הזזת המודל או שינוי התצוגה (איור 3א).



איור 3. השקפות תלמידים על האתגר בשימוש ב-Jmol בתיווך משימות הלמידה וברכישת ידע תוכן על חלבונים (n=160). מתוך 14 ההיגדים, רק 10 היגדים חיוביים מופיעים באיור

יודגש כי מעצבי משימות הלמידה שיערו כי קיים קושי לבצע בחירה והצגה של חלקים במודל ועל כן הדגישו את דרך הפעולה במשימות הלמידה וכן בסרטון הדרכה מלווה. אף על פי כן, תלמידים דיווחו על קושי יחסי בביצוע פעולות של בחירת מרכיב במבנה והצגתו במודל (איור 3א). בנוסף, מתוך השקפות תלמידים בדבר ידע תוכן ניכר כי תרומת ההמחשה לרכישת ידע תוכן על מבנה חלבון (איור 3ב), גדולה מתרומת ההמחשה לרכישת ידע תוכן על תפקוד ותפקיד החלבון (איור 3ג). ממצא זה התקבל על אף שהמודלים שהתלמידים הציגו, הראו מאפיינים מבניים אשר תורמים לתפקוד החלבון ועל אף שבמשימות הלמידה הושם דגש על תפקוד ותפקיד החלבון שהמודל שלו הוצג.

### השקפות מורים על שימוש ב-Jmol בקרב תלמידים כמקור לרכישת ידע מדעי

כמענה לשאלת המחקר השלישית נותחו ראיונות שבוצעו עם שני מורים ונספרו יחידות הניתוח המייצגות סכמות קידוד שונות (טבלה 3).

**טבלה 3. השקפות המורים על רכישת ידע תוכן ממוין על פי מודל SBF וכן ידע פרוצדורלי**

התפלגות יחידות הניתוח על פי מודל SBF של ידע תוכן מורכב		מוֹרָה ב' (n=10)	מוֹרָה א' (n=21)	סכמת הקידוד	
מוֹרָה ב'	מוֹרָה א'				
י"נ אחת מתארת תפקיד	3 י"נ מתארות מבנה	3	5	כלפי ההמחשה באמצעות המודל התלת-ממדי על רכישת ידע תוכן על חלבונים.	
2 י"נ מתארות ידע תוכן כללי	י"נ אחת מתארת תפקוד י"נ אחת מתארת ידע תוכן כללי				
י"נ אחת מתארת תפקוד	י"נ אחת מתארת מבנה 2 י"נ מתארות תפקוד י"נ מתארות ידע תוכן כללי	1	5	כלפי הפעלת התוכנה על רכישת ידע התוכן על חלבונים	השקפה חיובית
-	-	0	1	כלפי הפעלת התוכנה על רכישת ידע פרוצדורלי הנוגע להפעלת התוכנה	
-	-	3	7	כלפי הפעלת התוכנה על רכישת ידע פרוצדורלי הנוגע להפעלת התוכנה	השקפה שלילית
י"נ אחת מתארת מבנה	י"נ אחת מתארת ידע תוכן כללי	2	1	כלפי ההמחשה באמצעות המודל התלת-ממדי על רכישת ידע התוכן על חלבונים	השקפה ניטרלית
י"נ אחת מתארת תפקוד					
י"נ אחת מתארת ידע תוכן כללי		1	0	כלפי הפעלת התוכנה על רכישת ידע התוכן על חלבונים	
-	-	0	2	כלפי הפעלת התוכנה על של רכישת ידע פרוצדורלי הנוגע להפעלת התוכנה	

י"נ הוא קיצור של יחידת/ות ניתוח.

ניתוח יחידות הניתוח של מוֹרָה א' (n=21) על פי סכמות הקידוד הראה כי המורה מחצין השקפה שלילית כלפי רכישת ידע פרוצדורלי של הפעלת Jmol (7 מתוך 21 יחידות הניתוח, טבלה 3). עם זאת, המוֹרָה החצין את ההשפעה החיובית של הפעלת Jmol על רכישת ידע תוכן על חלבונים (5 מתוך 21 מיחידות הניתוח, טבלה 3). בנוסף החצין המוֹרָה את ההשפעה החיובית של ההמחשה באמצעות המודל התלת-ממדי של החלבון על רכישת ידע תוכן על חלבונים (5 מתוך 21 יחידות הניתוח, טבלה 3). אף שמספר יחידות הניתוח שנספרו עבור מוֹרָה ב' היה נמוך יחסית (n=10) ניתן היה לזהות שגם לה השקפה חיובית כלפי ההמחשה על רכישת ידע תוכן על חלבונים (3 מתוך 10 מיחידות הניתוח). בנוסף המוֹרָה החצינה את ההשקפה השלילית על הפעלת Jmol בהקשר לרכישת ידע פרוצדורלי (3 מתוך 10 מיחידות הניתוח, טבלה 3). שני המורים בטאו ידע תוכן של חלבונים בעיקר ברמות המבנה והתפקוד, כאשר מספר יחידות הניתוח שעסקו בידע תוכן ברמת תפקוד חלבון היה שווה למספר יחידות הניתוח שעסקו בידע תוכן ברמת המבנה (n=5 בשתי הרמות).

## דיון

ממצאי המחקר תומכים בכך שתלמידים סוברים שהפעלת Jmol מהווה עבורם אתגר בלמידה, בעיקר בנוגע לבחירה של מרכיבים בתצוגה, וכן בנוגע להבנה של תפקוד ותפקיד חלבון. עם זאת, התלמידים ואחד מהמורים שרואיינו (מוֹרָה א') דווחו שהפעלת Jmol הינה גורם מדרבן ללמידה אודות חלבוניים. התנסות מעשית בעבודה מעבדתית רותמת תלמידים ללמידת מדעים, אך לא תמיד תורמת לרכישת ידע בהשוואה ללמידה ללא התנסות מעשית (Millar, 2010). הפעלה פרוצדורלית של Jmol הינה פרקטיקה של מדע אותנטי, ועלולה להתברר כהתנסות מעשית שאינה תמיד מתאימה ללמידת מדעים בבית הספר (Chinn & Malhotra, 2002; Osborne, 2014). ממצאי המחקר, המציגים השקפות תלמידים ומורים, עשויים לתמוך במחקרים שנסקרו על ידי Millar (2010) גם כאשר ההתנסות המעשית היא בהפעלת תוכנת מחשב, ומצביעים על כך שתוכנה מדעית-אותנטית הנמצאת בשימוש של תלמידי תיכון לא בהכרח תקדם הבנה של תחום תוכן מורכב. אנו ממליצים לבחון למידה של תלמידים באמצעות כלים שבהם קיימת מורכבות בהפעלה, כדוגמת Jmol, ולזהות את גורמי המפתח ללמידה אפקטיבית באמצעות השימוש בכלי. בנוסף, אנו ממליצים למורים אשר תלמידיהם מפעילים כלים ממוחשבים ובמקביל מבנים את הידע המדעי, לזהות את ההפעלה של התוכנה כמאפיין שיש לקחת בחשבון. על אף שהתלמידים נדרשים להפעיל תוכנות מחשב אשר רותמות אותם ללמידה, ייתכן שאלה עלולות להוות גורם מעכב ברכישת ידע תוכן מדעי מורכב. עם זאת, יש לסייג, ולבדוק השערה זאת בעתיד דרך אפיון למידה של תלמידים באמצעות Jmol וכן בשימוש בתוכנות מחשב אחרות בעלות דרישות הפעלה מורכבות.

## מקורות

- הפיקוח על הביוטכנולוגיה (2014). תוכנית לימודים במערכות ביוטכנולוגיות. המינהל למדע וטכנולוגיה, משרד החינוך, ישראל.
- Alberts, B. (1998). The cell as a collection of protein machines: preparing the next generation of molecular biologists. *Cell*, 92(3), 291-294.
- Bivall, P., Ainsworth, S., & Tibell, L. A. (2011). Do haptic representations help complex molecular learning? *Science Education*, 95(4), 700-719.
- Chi, M. T. (1997). Quantifying qualitative analyses of verbal data: A practical guide. *The journal of the learning sciences*, 6(3), 271-315.
- Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, 86(2), 175-218.
- Dori, Y. J., & Kaberman, Z. (2012). Assessing high school chemistry students' modeling sub-skills in a computerized molecular modeling learning environment. *Instructional Science*, 40(1), 69-91.
- Goodsell, D. S., Dutta, S., Zardecki, C., Voigt, M., Berman, H. M., & Burley, S. K. (2015). The RCSB PDB "Molecule of the month": Inspiring a molecular view of biology. *PLoS Biol*, 13(5), e1002140.
- Henderson, C., Yerushalmi, E., Kuo, V. H., Heller, K., & Heller, P. (2007). Physics faculty beliefs and values about the teaching and learning of problem solving. II. Procedures for measurement and analysis. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 3(2), 1-12.
- Hmelo-Silver, C. E., & Pfeffer, M. G. (2004). Comparing expert and novice understanding of a complex system from the perspective of structures, behaviors, and functions. *Cognitive Science*, 28(1), 127-138.
- Machluf, Y., Gelbart, H., Ben-Dor, S., & Yarden, A. (2016). Making authentic science accessible—the benefits and challenges of integrating bioinformatics into a high-school science curriculum. *Briefings in Bioinformatics*, bbv113.
- Machluf, Y., & Yarden, A. (2013). Integrating bioinformatics into senior high school: design principles and implications. *Briefings in Bioinformatics*, 14(5), 648-660.
- Millar, R. (2010). 6 *Practical work Good Practice In Science Teaching: What Research Has To Say* (pp. 108).



- NIH. (2001). NIH Working Definition of Bioinformatics and Computational Biology. <https://www.bisti.nih.gov/>
- O'Donoghue, S. I., Goodsell, D. S., Frangakis, A. S., Jossinet, F., Laskowski, R. A., Nilges, M., . . . Westhof, E. (2010). Visualization of macromolecular structures. *Nature methods*, 7, S42-S55.
- OECD. (2016). PISA 2015 Science Framework. In PISA 2015 Assessment and Analytical Framework: Science, Reading, Mathematic and Financial Literacy, OECD Publishing, Paris.
- Osborne, J. (2014). Scientific practices and inquiry in the science classroom *Handbook of Research in Science Teaching* (Vol. 2, pp. 579-599).
- Wu, H. K., Krajcik, J. S., & Soloway, E. (2001). Promoting understanding of chemical representations: Students' use of a visualization tool in the classroom. *Journal of Research on Science Education*, 38(7), 821-842.