



מכון ויצמן למדע
WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE

Thesis for the degree
Doctor of Philosophy

עבודת גמר (תזה) לתואר
דוקטור לפילוסופיה

Submitted to the Scientific Council of the
Weizmann Institute of Science
Rehovot, Israel

מוגשת למועצה המדעית של
מכון ויצמן למדע
רחובות, ישראל

By
Ohad Levkovich

מאת
אוהד לבקוביץ

שימוש במשימות Jmol ממוחשבות למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי
תיכון: פיתוח מסגרת מושגית, בחינת תהליכי למידה ותפיסות

Using Computer-Based Jmol Tasks for Molecular Modeling of
Proteins by High-School Students: Development of Conceptual
Framework, Examination of Learning Processes and Perceptions

Advisor:
Prof. Anat Yarden

מנחה:
פרופ' ענת ירדן

April 2019

ניסן תשע"ט

עבודת הדוקטורט הגיעה לסיומה, ולאחר מסע מאתגר ששכרו בצדו, זה המקום להכיר תודה:

לפרופ' ענת ירדן, תודתי שלוחה לך על הנחיה אישית שמגיעה מעומק הלב ומעומק קהילת המעשה של החינוך המדעי. אופן הנחייתך סייע לי לפלס את דרכי משולי קהילת המעשה אל מרכזה. תודה על האמון שנתת בי ועל הסבלנות והחיוך. תודה על תקשורת מיוחדת הנובעת גם ממומחיות שאינה ניתנת לשיעור בכתיבה מדעית, ובסיוע בעצות שלא יסולאו בפז. היית שם בשבילי ברגעי משבר וברגעי שיא, ופעלת בקדמת הבמה ומאחוריה לטובתי. על זאת ועוד תודה.

לחברות הוועדה המייעצת **פרופ' בילי עילם ופרופ' רון בלונדר**, תודה על האתגר המחקרי שהעמדתן בפניי, כל אחת בתחום מומחיותה. תודה על חוסר הפשרות והסטנדרטים הגבוהים שהצבתן לי ועל הזמן הרב שהקדשתן לבדיקת עבודתי בשלבים הגולמיים והבוסריים שלה.

תודה גם **למרצים ואנשי הסגל הבכיר במחלקה להוראת המדעים** על כך שזכיתי ללמוד מכם, במסגרת הקורסים השונים במחלקה ומחוץ להם.

לתלמידי/תלמידות ומורי/מורות מגמת הביוטכנולוגיה שהשתתפו במחקר, תודה. פתחתם את השער לשיח כנה ופתוח, וזאת מבלי לבקש תמורה. תודתי נתונה במיוחד **לענת לוי** היקרה, מדריכה ומורת ביוטכנולוגיה בעבר, על שותפות מעצימה ומכילה לכל אורך הדרך.

תודתי נתונה **לכל אנשי הסגל המנהלי במחלקה להוראת המדעים**. תודה מיוחדת **ליטי ורון** על ייעוץ סטטיסטי מקצועי וסבלני, **לזיו אריאלי** על גרפיקה ואישיות שסייעה לי להביט על העולם באופן חזותי להפליא, **למרינה ארמיאץ'** ול**נתנאל עותמי** על המחשוב "בדיוק בזמן".

תודה מקרב לב גם **לחבריי קבוצת הביולוגיה**, והם רבים. לכל אורך הדרך הרגשתי שאתם משפחה מקצועית חמה ומחבקת, שסייעה לי גם בעבודה מחקרית "שחורה" וגם בהקשבה ובתמיכה רגשית. תודה מיוחדת **לדד' יוסי מחלוף** על הצוהר שפתחת לי, על הדרכה ועבודה משותפת.

תודה גם למנהלותיי בעבר ובהווה **במקיף עירוני א' אשקלון, עדנה שחר-ולנשטיין ואורית בלאו-פנחס**. תמכתן בהתפתחותי כמורה, ובצמתים מקצועיים ראיתן את טובתי האישית מעל לטובת צרכי בית הספר, ואין זה מובן מאליו. תודתי נתונה גם **לתלמידי ותלמידות התיכון הרבים** שאותם לימדתי, אשר בינתיים צמחו וגידלו כנפיים: "מכל מלמדי השכלתי" (תהילים קי"ט). הלוואי ותזכו להתפתח וליצור בחברה ישראלית מתוקנת וערכית.

ולבסוף, תודה למשפחתי:

לאבי ולאמי, על כך שאתם מסייעים לי בדרכים שונות, **ולאחיותיי** על התמיכה הרגשית.

לילדי: **אביב, ניתאי, רתם ושי** על מי שאתם.

לרעייתי **עדי**, הדוקטורט הזה שייך לך בדיוק כמו שהוא שייך לי, ורק שנינו נוכל להבין זאת.

-תוכן עניינים-

8.....	רשימת איורים
9.....	רשימת טבלאות
10.....	רשימת מונחים וקיצורים
12.....	תקציר
14.....	Abstract
17.....	רציונל
20.....	רקע תיאורטי
20.....	1 למידת מדעים ורכישת ידע באמצעות פרקטיקות מדעיות אותנטיות
20.....	1.1 סקירה היסטורית של המושגים 'ידע' ו-'למידה' במסגרת החינוך המדעי
22.....	1.2 החתירה ללמידת מדעים באמצעות פרקטיקות מדעיות אותנטיות
24.....	1.3 מודל ללמידת-תחום
24.....	2 מודלים וייצוגים חזותיים בהוראה ולמידה
24.....	2.1 הגדרות מודל בפסיכולוגיה קוגניטיבית ובמדע
26.....	2.2 מה בין ייצוג למודל מדעי?
27.....	2.3 ייצוגים חזותיים בהוראה ולמידה
28.....	2.4 ידע אודות מודלים בהוראה ולמידה
29.....	3 סביבות טכנולוגיות מעצימות למידה בהוראת ולמידת מדעים
30.....	4 ידע מדעי בהוראה ולמידה אודות חלבונים
31.....	4.1 ידע תוכני אודות חלבונים
32.....	4.2 ידע פרוצדורלי אודות מידול מולקולרי של חלבונים
39.....	4.3 ידע אפיסטמי אודות מודלים מולקולריים
41.....	5 ניסוח מסגרת מושגית העולה מהסקירה הספרותית ומיועדת לניתוח ממצאים
44.....	שאלות מחקר
46.....	קונטקסט למחקר
46.....	1. הוראת ביואינפורמטיקה בבתי ספר תיכוניים בישראל
47.....	2. תוכנת Jmol והשימוש באפשרויות התוכנה

48	3. משימות Jmol ממוחשבות
51	מתודולוגיה
51	1. הגישה המתודולוגית
52	2. משתתפי המחקר
57	3. כלי המחקר, איסוף הנתונים ושיטות הניתוח
57	3.1 ניתוח תכני משימות Jmol ממוחשבות
60	3.2 שאלונים
70	3.3 תצפיות
72	3.4 ראיונות
75	תוצאות
75	1 מרכיבי הידע במשימות IPNS ו-AFP
79	2 למידה של משתמשי Jmol בתיווך המשימות הממוחשבות
79	2.1 ניתוח כמותי של הישגי לומדים משתמשי Jmol מקבוצות שונות
83	2.2 אפיון רכישת ידע מדעי של משתמשות Jmol מקבוצות שונות
118	3 תפיסות תלמידים ומורים את הלמידה אודות חלבונים באמצעות שימוש במשימות Jmol
127	דיון
128	1. אפיון משימות Jmol ממוחשבות על פי המסגרת המושגית
130	2. שימוש של תלמידים במשימות Jmol ממוחשבות
131	2.1 דיון בממצאים הכמותיים: השפעת השימוש של תלמידים במשימות Jmol על רכישת ידע מדעי
133	2.2 דיון בממצאים האיכותניים: אפיון רכישת ידע מדעי של תלמידים המשתמשים ב-Jmol
137	3. תפיסות של תלמידים ומורים את השימוש במשימות Jmol ממוחשבות
137	3.1 תפיסות תלמידים את השימוש במשימות Jmol
138	3.2 תפיסות מורים את השימוש במשימות Jmol
140	4. השלכות המחקר
140	4.1 פיתוח עתידי של משימות המערבות שימוש במידול מולקולרי
140	4.2 למידה עתידית באמצעות משימות Jmol
142	4.3 המלצות להוראה, למידה והערכה של תלמידים המשתמשים במשימות Jmol
144	5. מגבלות המחקר
144	5.1 המגבלות הקיימות במסגרת המושגית ובתכני המשימות המתבססות עליה

144	5.2 המגבלות בעריכת המחקר על תלמידים המשתמשים ב-Jmol בתיווך משימות
146	5.3 המגבלות בשאלוני התפיסות ובראיונות המורים
147	מקורות
156	נספחים
156	נספח 1: התכנים בתוכנית לימודים "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה".
162	נספח 2: רשימת המשימות בסביבת "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה".
163	נספח 3: תצלומי מסך של הפעילויות "מרוץ החימוש" ו-"חלבונים נוגדי קיפאון".
234	נספח 4: שאלוני ידע ותפיסות תלמידים
244	נספח 5: פרוטוקול ריאיון מורים תפיסות על למידה אודות חלבונים באמצעות השימוש ב-Jmol
	נספח 6: קישורים המציגים את שיח התלמידות בשמונת האפיזודות כפי שהוקלטו באמצעות תוכנת Screencast-O-Matic
246	
247	נספח 7: תמלילי אפיזודות השיח של שני זוגות בשני חקרי מקרה שונים
261	נספח 8: אישורי המדען הראשי

-רשימת איורים-

איור 1:	מסגרת מושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון.	41
איור 2:	דוגמאות לציורי תלמידים אשר התבקשו לצייר מולקולת חלבון.	62
איור 3:	אפשרויות שונות של סכמת קידוד ביחידת ניתוח המתארת את תפיסת מורה את המידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים.	73
איור 4:	מודל המתאר את היררכיית ארבעת מרכיבי הידע בקטעי המידע ובשאלות במשימות Jmol.	77
איור 5:	השוואה בין ציור של תלמיד מקבוצה B המייצג מולקולת חלבון דומה למבנה חלבון PON1 לבין תצוגת Cartoon המוצגת ב-JSmol באתר PDB.	82
איור 6:	אופי השיח החברתי של הזוגות כפי שהוא מתואר מתוך שכיחות האפיזודות המחצינות גורמים שונים בשיח החברתי.	84
איור 7:	התפלגות אפיזודות הקריאה של קטעי המידע על פי רמת ההתעמקות של הזוגות.	85
איור 8:	רצף אפיזודות השיח על ציר זמן במהלך התקדמות המענה של שני הזוגות במשימות.	87
איור 9:	מיקום השאלות העוסקות במרכיב ידע P1 במשימת IPNS ביחס לפעילות התלמידים בשימוש ב-Jmol.	93
איור 10:	מיקום השאלות העוסקות במרכיב ידע E במשימות IPNS ו-AFP ביחס לפעילות התלמידים בשימוש ב-Jmol.	100
איור 11:	מיקום השאלות העוסקות במרכיב ידע P2 במשימות IPNS ו-AFP ביחס לפעילות התלמידים בשימוש ב-Jmol.	110
איור 12:	העדפות תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות הניגשים לבחינת בגרות בביואינפורמטיקה לכלי ביואינפורמטי אחד או יותר, בהשוואה לכלים אחרים.	119
איור 13:	תפיסות מוקד א' את הלמידה אודות חלבונים באמצעות השימוש במשימות Jmol.	124
איור 14:	תפיסות מוקד ב' את הלמידה אודות חלבונים באמצעות השימוש במשימות Jmol.	125
איור 15:	השוואה בין ידע מדעי של מומחים בביוכימיה לבין המידע המופיע בתכנים הטקסטואליים הקיימים במשימות Jmol מסביבת הלמידה "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה".	130
איור 16:	השוואה בין שתי סוגי בעיות ברכישת ידע מדעי של תלמידים בתיכון תוך כדי שימוש במשימות Jmol.	135

-רשימת טבלאות-

53.....	טבלה 1: נתוני המדגם של התלמידים שמלאו שאלוני ידע אודות חלבונים מתוך אוכלוסיית המחקר
54.....	טבלה 2: התפלגות ושכיחות הבחירה של תלמידים במגמות נוספות בנוסף למערכות ביוטכנולוגיות
58.....	טבלה 3: סיכום מטרות המחקר, שאלות המחקר, כלי המחקר, האוכלוסייה והמדגם הנבחר
61.....	טבלה 4: מרכיבי הידע ותת-מרכיבי הידע בשאלות מתוך שאלוני ה-Pre וה-Post
63.....	טבלה 5: סיווג ייצוגים מתוך ציורי תלמידים על פי מאפיינים במולקולת החלבון וניקוד במחווה
65.....	טבלה 6: מחווה למענה התלמידים על שאלות הדורשות פענוח של ייצוגים מבניים
66.....	טבלה 7: מחווה וניקוד לשאלה העוסקת במבנה חלבון
66.....	טבלה 8: מחווה וניקוד לשאלה העוסקת בתפקוד חלבון
67.....	טבלה 9: מחווה וניקוד לשאלה העוסקת בקשר בין מבנה לתפקוד חלבון
75.....	טבלה 10: דוגמאות לקטעי מידע ולשאלות המסווגות על פי מרכיבי ידע בתכני משימות IPNS ו-AFP
78.....	טבלה 11: שכיחות קטעי מידע ושאלות על פי מרכיבי ידע שזוהו בשתי המשימות IPNS ו-AFP
80.....	טבלה 12: ערכים סטטיסטיים המשווים בין מבדקי תלמידים לפני ולאחר השימוש במשימות Jmol
82.....	טבלה 13: ערכים סטטיסטיים המשווים בין מבדקים שתי קבוצות לפני השימוש במשימות Jmol
88.....	טבלה 14: שאלות במשימות Jmol שעבורן נותח שיח שני הזוגות ובוצעו ראיונות עם התלמידות, וסיווגן על פי מרכיבי ידע
120.....	טבלה 15: התפלגות תפיסות תלמידים על פרוצדורות שימוש ב-Jmol התורמות להיבטים שונים במסגרת הלמידה
122.....	טבלה 16: תוצאות מתוך ניתוח גורמים להיגדים הבודקים תפיסות תלמידים על האתגר בלמידה אודות חלבונים במהלך שימוש ב-Jmol בתיווך משימות למידה
134.....	טבלה 17: דוגמאות להחצנת שני סוגי בעיות ברכישת ידע מדעי בשיח של שני זוגות תלמידות המשתמשות במשימות Jmol

-רשימת מונחים וקיצורים-

Visual literacy	אוריינות חזותית
Target	אלמנט המטרה
Source	אלמנט המקור
Deep-processing strategies	אסטרטגיות העמקה
Surface-Processing strategies	אסטרטגיות שטחיות
Inquiry-based teaching and learning	הוראה ולמידה בדרך החקר
Visualization	החזיה
Acclimation	התאקלמות
Epistemic knowledge	ידע אפיסטמי
Subject-matter knowledge	ידע בתחום דעת
Scientific knowledge	ידע מדעי
Topic knowledge	ידע נושאי
Procedural knowledge	ידע פרוצדורלי
Content knowledge	ידע תוכני
Domain knowledge	ידע תחומי
Visual representations	ייצוגים חזותיים
External representations	ייצוגים חיצוניים
Internal representations	ייצוגים פנימיים
Representational competence	יכולת לייצג
Competence	כשירות
Gamification	משחק
Structure-function of proteins	מבנה ותפקוד של חלבונים
Model of domain learning (MDL)	מודל ללמידת-תחום
Scientific models	מודלים מדעיים
Mental models	מודלים מנטליים
Conceptual models	מודלים קונספטואליים
Research-oriented	מוכוון מחקר
Task-oriented	מוכוון משימה
Proficiency	מומחיות

Modeling	מידול
Molecular modeling of proteins by high-school students	מידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון
Computer-based Jmol tasks	משימות Jmol ממוחשבות
Technology-enhanced learning environments	סביבות טכנולוגיות מעצימות למידה
Individual interest	עניין אישי בתחום
Situational interest	עניין תלוי סיטואציה
Molecular modeling software	תוכנה למידול מולקולרי
Scripting	תסרוט
Iso-Penicillin N Synthase	IPNS
Anti-Freezing Protein	AFP
Protein Data Bank	PDB
Content knowledge about structure-function of proteins	*C
Procedural knowledge about using of visual representations	*P1
Procedural knowledge about using molecular modeling software features	*P2
Epistemic knowledge about molecular models	*E

* בקיצורים אלו נעשה שימוש בעבודה זו בלבד. שאר הקיצורים המוזכרים בטבלה זו הם אוניברסליים.

-תקציר-

אחת הפרקטיקות הנפוצות בקרב ביוכימאים היא שימוש בתוכנות למידול מולקולרי של חלבונים, כמו למשל תוכנת Jmol. באמצעות Jmol תלמידי תיכון במגמת מערכות ביוטכנולוגיות בישראל חוזים במודלים מולקולריים של חלבונים בתיווך משימות ממוחשבות, כאחת מדרישות החובה של תוכנית הלימודים בביוטכנולוגיה. מסגרת מושגית המגדירה מידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון פותחה במסגרת מחקר זה ושימשה כלי תיאורטי ומתודולוגי לניתוח הממצאים שהתקבלו במחקר. במסגרת המושגית שולבו שתי מסגרות תיאורטיות: האחת עוסקת בידע מדעי והשנייה במיומנויות קוגניטיביות הקשורות לייצוגים חזותיים הנפוצים בשימוש על ידי ביוכימאים מומחים. המסגרת המושגית כוללת ארבעה מרכיבי ידע, שאופיינו במחקר זה ככאלו הנמצאים בשימוש על ידי תלמידים הלומדים באמצעות משימות Jmol ממוחשבות: C, P1, P2 ו-E. מרכיב הידע התוכני, C, עוסק בידע אודות מבנה ותפקוד חלבון; מרכיב הידע הפרוצדורלי, P1, כולל ידע אודות שימוש בייצוגים חזותיים הנמצאים במודל המולקולרי; מרכיב הידע הפרוצדורלי, P2, כולל ידע אודות שימוש באפשרויות התוכנה Jmol למידול מולקולרי של חלבונים; מרכיב הידע האפיסטמי, E, כולל ידע אודות מודל מולקולרי ככלי מדעי. מסגרת מושגית זו שימשה לניתוח הנתונים שהתקבלו במחקר.

המטרה הראשונה של מחקר זה היא אפיון משימות Jmol מסביבת הלמידה "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה". ראשית, נערך ניתוח של תכני שתי משימות Jmol, IPNS ו-AFP, שנדלו מסביבת הלמידה. נמצאה היררכיה בשימוש במרכיבי הידע. בכל קטע מידע או שאלה שזוהה בהם ידע פרוצדורלי P1, נמצא גם ידע תוכני C ובכל קטע מידע או שאלה שזוהה בהם ידע פרוצדורלי P2 או ידע אפיסטמי E. אותרו גם ידע תוכני C וידע פרוצדורלי P1. כמו כן נמצא שישנם הבדלים ניכרים בשכיחות הייצוג של מרכיבי הידע P1 ו-P2 בקטעי המידע, בהשוואה לשכיחות ייצוגם בשאלות המופיעות בשתי המשימות. בעוד שבקטעי המידע, הידע הפרוצדורלי P2 הוא הדומיננטי, יותר שאלות דווקא מכוונות לידע הפרוצדורלי P1.

מטרת המחקר השנייה היא בחינת הישגי לומדים ואפיון תהליכי למידה של תלמידים המשתמשים במשימות Jmol. הממצאים התקבלו תוך שילוב שיטות כמותיות ואיכותניות. בחלק הכמותי השתתפו 70 תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות והכלים בהם נעשה שימוש היו שאלוני ידע. לצורך אפיון הלמידה ורכישת הידע המדעי נעשה שימוש בכלים איכותניים, תצפיות וראיונות. בחלק זה של המחקר השתתפו ארבע תלמידות ששימשו כחקרי מקרה. הממצאים הכמותיים העידו על כך ששימוש במשימות וב-Jmol משפרים באופן מובהק את הבנתם של תלמידי תיכון בהקשר לחלבונים, כלומר התלמידים רוכשים ידע תוכני C וידע פרוצדורלי P1 בעקבות השימוש בתוכנת Jmol בליווי המשימות. עם זאת, לאור הישגי הלומדים השיפור בידע הוא עדיין יחסי בלבד ולא ניתן להסיק שרמת הידע שלהם אודות חלבונים גבוהה. בנוסף נמצא הבדל בין קבוצת תלמידים אשר החלה את הלמידה עם ידע מצומצם יחסית אודות חלבונים (קבוצה A) לבין קבוצת תלמידים שנייה אשר החלה את הלמידה עם ידע נרחב יותר כתוצאה מהשתתפות בפרויקט מחקר אודות החלבון PON1 (קבוצה B). בקבוצה A ניכר שיפור מובהק במהלך הלמידה באמצעות Jmol.

בהשוואה לשיפור בקבוצה B. בעוד שהישגי קבוצה B השתפרו באופן מובהק בשניים מתוך חמישה תתי-מרכיבי ידע בעקבות הלמידה עם Jmol, הישגי קבוצה A השתפרו באופן מובהק בכל תתי-המרכיבים: פענוח ובניית ייצוגים חזותיים וכן ידע תוכני אודות מבנה, תפקוד וקשר בין מבנה ותפקוד חלבון. הממצאים האיכותניים, נותחו על פי ציר המתאר מומחיות בלמידה של תחום-דעת וכולל שלושה שלבים: התאקלמות, כשירות, מומחיות ושילוב ביניים ביניהם. השלב שבו נמצא הלומד נקבע על פי שלושה קריטריונים המגדירים את רמת המומחיות שלו: ידע, אסטרטגיה ועניין. הממצאים הצביעו על כך שהתלמידות בשני הזוגות היו בשלב ההתאקלמות במהלך השימוש במשימות Jmol. על פי רוב, זוג התלמידות שהשתתפו בפרויקט חקר אודות מבנה ותפקוד של החלבון PON1 הראו ידע נרחב במרכיב הידע P1, והציגו שימוש יעיל יותר בידע P2. עם זאת, הניתוח חשף שני מצבים המציגים אתגר ברכישת ידע של שני הזוגות: האחד הוא רכישת ידע מדעי הכולל רק חלק ממרכיבי הידע הנדרשים על מנת לתת תשובה מלאה לשאלה; האתגר השני הוא שימוש בידע מדעי שגוי באחד ממרכיבי הידע המדעי במהלך מענה על שאלה. מכאן ניתן להסיק שאף שלמידה באמצעות משימות Jmol עשויה לספק הזדמנות לרכישת ידע מדעי-אותנטי אודות חלבונים, השיח חושף מורכבות בתהליכי הלמידה של התלמידים, ורכישה והתפתחות של ידע מושגי-מדעי של תלמידים אודות חלבונים לא מתרחשת בהכרח באופן מלא במהלך המענה על המשימות. המטרה השלישית היא בחינת תפיסות תלמידים ומורים אודות למידה באמצעות שימוש במשימות Jmol. כמענה על מטרת מחקר זו נותחו שאלונים שנאספו מ-163 תלמידים וראיונות נערכו עם שני מורים. נמצא שהתלמידים רואים בידע הפרוצדורלי P2 מקור עיקרי לעניין בלמידה על אף שהעיסוק באפשרויות התוכנה נחוות עבורם כמיומנות קוגניטיבית מורכבת. בנוסף התלמידים תופסים את הידע הפרוצדורלי P1 כמקור לרכישת ידע אודות חלבונים בעיקר בהקשר למבנה חלבון. תפיסת המורים לא נמצאה שונה מהותית מזו של התלמידים.

בחינת תהליכי הלמידה והתפיסות מלמדים על כך ששימוש תלמידים במשימות Jmol אשר פותחו בהתאם להנחה הרואה במידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון מטרה עיקרית בלמידה, אינה מקדמת בהכרח ובכל מצב את הרכישה וההתפתחות של ידע מושגי של תלמידים אודות חלבונים. המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון, אשר פותחה במסגרת מחקר זה, נועדה לניתוח נתונים במחקר. עם זאת, חוקרים, מפתחי חומרים ומורים המעוניינים בפיתוח, עיצוב ושימוש בחומרי למידה המשלבים תוכנות למידול מולקולרי של חלבונים עשויים למצוא בה עניין. שימוש עתידי במסגרת המושגית עשוי להפחית את האתגר ברכישת ידע מדעי אודות מבנה ותפקוד חלבונים בקרב תלמידים, וכן עשויה לסייע לגישור הפער שבין הפרקטיקה המדעית-אותנטית של חקר החלבונים לבין רכישת הידע המדעי אודות חלבונים בבית הספר התיכון.

-Abstract-

One of the central practices of biochemists is using various software, such as Jmol, for molecular modeling of proteins. Through Jmol, high-school biotechnology majors (11th and 12th grades) in Israel are visualizing molecular models of proteins through the mediation of computerized tasks, as one of the requirements of the biotechnology curriculum towards the matriculation examination. A conceptual framework that defines molecular modeling of proteins by high-school students was developed as part of this study and served as a theoretical and methodological tool for analyzing the findings obtained in the study. Two theoretical frameworks were incorporated into this conceptual framework: one dealing with specific components of scientific knowledge and the other with cognitive skills related to visual representations commonly used by expert biochemists. This conceptual framework includes four components of knowledge that were characterized in this study as those used by students who study through computerized Jmol tasks, which were designed in the course of this study: C, P1, P2 and E: i) The content knowledge component, C, includes knowledge about protein structure and function; ii) The procedural knowledge component, P1, includes knowledge about the use of visual representations in the molecular model; iii) The procedural knowledge component, P2, includes knowledge about using the Jmol software options for molecular modeling of proteins; iv) The epistemic knowledge component, E, includes knowledge about the molecular model as a scientific tool. This conceptual framework was used to analyze the data obtained in the course of this study. The first purpose of this study is to characterize Jmol tasks from the learning environment "Bioinformatics in the service of biotechnology". First, an analysis of the contents of two Jmol tasks, IPNS and AFP, which were retrieved from the learning environment, was conducted. A hierarchy was found in the use of the knowledge components. In each segment of information or a question in which procedural knowledge, P1, was identified, content knowledge C was also found. In addition, in each segment of information or a question in which procedural knowledge P2 or epistemic knowledge E were identified, content knowledge C and procedural knowledge P1 were also detected. Thus, the various knowledge components are tightly connected to content knowledge and cannot be separated from it. It was also found that there are significant differences in the frequency of representation of the procedural

knowledge components P1 and P2 in the information segments, compared with the frequency of their representation in the questions that appear in both tasks. While in the information segments, procedural knowledge P2 is dominant, more questions are specifically directed at procedural knowledge P1.

The second purpose of the study is to examine the students' learning performances and characterize the learning processes of students while learning through the Jmol tasks that are included in the learning environment. The findings were obtained by combining quantitative and qualitative methods. In the quantitative part, knowledge questionnaires were used (n=70 biotechnology majors). In order to characterize scientific knowledge acquisition by the students more deeply data were collected from observations and interviews and analyzed qualitatively. In this part of the study, four female students participated in two pairs and served as case studies. The quantitative findings indicate that the use of tasks and Jmol significantly improved the high-school students understanding of proteins, i.e. students acquire content knowledge C and procedural knowledge P1 while using the Jmol software and the accompanied tasks. However, in view of the students' performance, the improvement in knowledge is still only relative, and it cannot be concluded that their level of knowledge about proteins is high. In addition, there was a difference between a group of students who began learning with a relatively limited knowledge about proteins (group A) and the second group of students who began learning with a greater knowledge about proteins as a result of their participation in a research project on the protein PON1 (group B). Group A showed a significant improvement in learning through Jmol compared to the improvement found in group B. While group B performance improved significantly in two of the five sub-components of knowledge following Jmol learning, group A performance improved significantly in all sub-components: decoding and constructing visual representations, as well as content knowledge about structure, function, and the relationships between protein structure and function.

The qualitative findings were analyzed according to axis describing expertise in disciplinary subject matter and includes three stages: acclimation, competency, proficiency and the intermediate stages between them. The findings indicated that the students in both pairs were in the acclimation stage during learning through the Jmol tasks. For the most part, the pair of students who participated in the research project, which focused on the structure and function of the PON1 protein, showed an extensive knowledge of the procedural knowledge component P1 and presented a more efficient

use of the procedural knowledge P2. However, the analysis has revealed two situations that present a challenge in acquiring knowledge among students from both pairs: i) the acquisition of scientific knowledge that includes only some of the components of knowledge required to give a complete answer to a question; ii) the use of incorrect scientific knowledge in one of the components of scientific knowledge in response to a question. It follows from this that although learning through Jmol tasks can provide an opportunity to acquire authentic scientific knowledge about proteins, the discourse reveals complexity in students' learning processes, and the acquisition and development of students' conceptual-scientific knowledge about proteins does not necessarily occur fully during task response.

The third goal of this study is to examine the perceptions of students and teachers about learning through the use of Jmol tasks. Towards this end, questionnaires were collected and analyzed from 163 students and interviews were conducted with two teachers. It was found that students see the procedural knowledge P2 as a major source of interest in learning, although their experience in using the software options is felt as a complex cognitive skill. In addition, students perceive the procedural knowledge P1 as a source of knowledge about proteins, especially in relation to protein structure. The teachers' perception was not significantly different from that of the students.

An examination of the learning processes and perceptions shows that the use of students in Jmol tasks, developed according to the assumption that molecular modeling of proteins by high-school students is a primary goal of learning, does not necessarily promote the acquisition and development of students' conceptual knowledge about proteins. The conceptual framework for molecular modeling of proteins by high-school students, developed in this study, was designed with the aim to analyze data obtained in the study. However, researchers, materials developers, and teachers interested in developing, designing, and using learning materials that combine molecular modeling software may find it interesting and useful. Future use of the conceptual framework may reduce the challenge of acquiring scientific knowledge about protein structure and function among students, and may help bridge the gap between authentic scientific practices involved in protein research and the acquisition of scientific knowledge about proteins in high-school.

-רציונל-

המאה ה-21 טומנת בחובה אתגרים רבים ומורכבים העומדים בפני הפרט, בחברה עתירת טכנולוגיה ומידע. עיסוקים מסורתיים מפנים את מקומם לעיסוקים חדשים הדורשים מערך נרחב ושונה של מיומנויות וידע (Pellegrino & Hilton, 2012). ביטוי לכך ניתן באופן שבו לומדים משתמשים ומעבירים מידע ביניהם במגוון תחומים באמצעות טכנולוגיות מידע במרשתת (Siemens, 2005) וברשתות החברתיות. הגדרות למונח אוריינות משתנות תדיר בעקבות גילויים טכנולוגיים חדשים וכתוצאה מהתפתחות פרקטיקות, מיומנויות, אסטרטגיות ונטיות תרבותיות וחברתיות (Leu, Kinzer, Coiro, Castek, & Henry, 2017). על כן, במאה ה-21, האמצעים והדרכים לרכישת ידע ושימוש בו מתעצבים ומתחדשים תכופות.

התחום הצעיר יחסית של הביואינפורמטיקה הוא דוגמה מייצגת למהפכת הידע והשימוש בו. חוקרים בתחום הביולוגיה מאחסנים נתונים ביולוגיים, מנתחים וממחישים אותם באמצעות מאגרי מידע וכלים ממוחשבים. במקביל, ביואינפורמטיקאים מפתחים כלים חישוביים וגישות המרחיבות את השימוש בנתונים הביולוגיים (Huerta, Downing, Haseltine, Seto, & Liu, 2000). לדוגמה, שיטת ריצוף DNA על שם סגור הצטרפה לטכנולוגיות קיימות של ריצוף חלבונים ושל קביעת מבני-חלבונים, וזו הובילה להצטברות כמות עצומה אודות נתונים ביולוגיים של רצפי נוקלאוטידים. יחד עם ההתפתחות הטכנולוגית והצטברות הנתונים הביולוגיים, השתפרו הגישות החישוביות כלפי הנתונים וניתן מענה לאחסון, ניתוח והמחשה של הנתונים הביולוגיים. כל אלה קידמו במהירות את תחום הביואינפורמטיקה, ובזמן קצר הפך תחום יישומי זה לציר מרכזי בפרקטיקה של חוקרים בביולוגיה אשר החלו לעסוק באופן נרחב בטכנולוגיית מידע ובחישוביות כחלק בלתי נפרד מהמחקר שלהם (Luscombe, Greenbaum, & Gerstein, 2001; Hagen, 2000). חשיבותה של הביואינפורמטיקה נתמכת במקומם של הפרסומים המדעיים הנקשרים לתחום. שלושה מהמאמרים המדעיים המצוטטים ביותר בכל הזמנים מציגים את הכלים הביואינפורמטיים BLAST, ClustalW ו-MOLSCRIPT (Van Noorden, Maher, & Nuzzo, 2014). שני הכלים הראשונים מסייעים בניתוח ואפיון של רצפי חומצות גרעין ורצפי חלבונים, והשלישי הוא תוכנה למידול מולקולרי (Molecular modeling software) המסייעת בניתוח ואפיון של מבני חלבונים¹. הדירוג הגבוה של שלושת המאמרים ברשימת המצוטטים ביותר בכל הזמנים מספק הוכחה למרכזיות הביואינפורמטיקה בפרקטיקה המדעית-ביולוגית.

כפועל יוצא של מהפכת המידע והתפתחות הביואינפורמטיקה במחקר העכשווי בביולוגיה, נכתבו והוטמעו תכנים ביואינפורמטיים בתוכניות לימודים של כיתות מדעים בבתי ספר בחינוך העל-יסודי במדינות שונות (Gallagher, Coon, Donley, Scott, & Goldberg, 2011; Lewitter & Bourne, 2011; Marques et al., 2014; Machluf & Yarden, 2013). במערכת החינוך בישראל, קיימת התייחסות

¹ המונח תוכנה למידול מולקולרי (Molecular modeling software) נבחר מתוך מספר מונחים שלהם משמעות דומה ובהם משתמשים בספרות הדיסציפלינרית הביוכימית. לדוגמה: Molecular viewer, Molecular visualization software, Molecular graphic software, ועוד. ההצדקה לשימוש במונח בעבודה הנוכחית היא השימוש הנרחב במונח מידול (Modeling) בספרות החינוך המדעי.

לביואינפורמטיקה במסגרת תוכנית הלימודים במערכות ביוטכנולוגיות. בתוכנית לימודים זו ישנו פרק חובה שעוסק בביואינפורמטיקה (Israeli Ministry of Education, 2017). במסגרת הלימודים של פרק זה תלמידי המגמה לומדים להשתמש בכלים ביואינפורמטיים ובמאגרי מידע, כדרך לפתרון בעיות מחקר אותנטיות. במקביל, פותחה סביבת למידה בשם "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה" (Machluf & Yarden, 2013). אחד מהכלים הביואינפורמטיים שבהם משתמשים תלמידים הלומדים באמצעות סביבה זו הוא Jmol (<http://www.jmol.org/>), תוכנת קוד-פתוח מבוססת Java. תוכנת Jmol היא תוכנה למידול מולקולרי של מבני חלבונים. ניתן לחזות באמצעות התוכנה במודלים מולקולריים של מבני חלבונים ובתצוגות שונות. המודלים המולקולריים מוצגים כתיאור חזותי של נתונים ניסיוניים הנשמרים בקבצים מבניים של מבני חלבונים במאגר המידע PDB (Protein Data Bank) המתחזק על ידי מספר מוסדות בינלאומיים (PDB, 2019). תלמידים במגמת מערכות ביוטכנולוגיות לומדים אודות מבנה ותפקוד של חלבונים באמצעות המודלים המולקולריים אשר מוצגים בתוכנת Jmol.

אף שפותחו מגוון סביבות המיועדות ללמידת ביואינפורמטיקה, ובהן גם סביבות ייעודיות לתלמידי תיכון (Magana et al., 2014), הספרות המחקרית העוסקת באפיון למידת ביואינפורמטיקה בתיכון מועטה יחסית. על כן, בחרתי לחקור למידת ביואינפורמטיקה בקרב תלמידי תיכון. מכיוון שרוחב היריעה המוגבל של עבודת הדוקטורט לא מאפשר לחקור תהליכי למידה של תלמידים המשתמשים במספר כלים ביואינפורמטיים שונים במטרותיהם ובדרך השימוש בהם, בחרתי להתמקד בלמידת תלמידים המשתמשים ב-Jmol למידול מולקולרי של מבני חלבונים. מסגרת מושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון פותחה ככלי תיאורטי ומתודולוגי לתיאור משימות Jmol² ממוחשבות שבאמצעותן לומדים תלמידי תיכון כדרך לרכישת ידע מדעי (Scientific knowledge) אודות חלבונים. למחקר זה שלוש מטרות: (א) אפיון משימות Jmol מסביבת הלימוד "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה"; (ב) בחינת הישגי לומדים ואפיון תהליכי למידה של תלמידים המשתמשים במשימות Jmol; (ג) בחינת תפיסות תלמידים ומורים אודות למידה באמצעות שימוש במשימות Jmol כדרך לרכישת ידע מדעי.

מטרות המחקר נוסחו ועוצבו לאור שלושה מניעים עיקריים שהכתיבו את הרציונל המחקרי: המניע הראשון הוא הגדרה של הידע המדעי הנדרש להבנה של נושא החלבונים, בהקשר של שימוש של תלמידים ב-Jmol, בכיתות מדעיות בתיכון (Osborne, 2014a; Schönborn & Anderson, 2010). באמצעות ניסוח מסגרת מושגית המתארת מידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון. מפתחי משימות למידה ומורים פועלים להפחתת מורכבות הלימוד ורכישת הידע המדעי אודות חלבונים בקרב תלמידים. המניע השני הוא הבנת הטענה כי מבנה ותפקוד של חלבונים הוא נושא מורכב ללמידה בחטיבת ביניים ובתיכון (Duncan, Rogat & Yarden, 2009; van Mil, Boerwinkel, & Waarlo, 2013), וייתכן שאף מורכב ללמידה במסגרות על-תיכוניות המתמקדות בתחום דעת ביוכימיה (Richardson & Richardson, 2002; Bivall, Ainsworth & Tibell, 2011).

² המשימות שבתיכון נערך השימוש של תלמידים בתוכנת Jmol ינוסח בעבודה זו כך: "משימות Jmol".

המניע השלישי הוא גישור הפער הקיים בין השימוש בכלים ביואינפורמטיים בכיתת המדעים בבית הספר התיכון, כדוגמת Jmol, לבין הפרקטיקה המדעית-אותנטית (Chinn & Malhotra, 2002; NRC, 2012). שלושת המניעים שתוארו לעיל משמשים כהצדקות לביצוע המחקר ולחיפוש אחר ראיות מחקריות המעידות על השפעתה של תוכנה מדעית-אותנטית, כדוגמת Jmol, וכן על השפעתם של משימות שעוצבו עבור למידה אודות חלבונים באמצעות Jmol, על תהליכי למידה ועל הישגי לומדים. על כן, נבחנה לעומקה השפעת השימוש במשימות Jmol ממוחשבות, כדי לאפיין את הלמידה של תלמידי תיכון, הישגיהם ותפיסתם את השימוש בתוכנת Jmol והבנתם את נושא החלבונים. לאור הממצאים שיוצגו יערך דיון אודות הלמידה בהקשר זה בתיכון ויוצגו המלצות להוראה המקדמת רכישת ידע מדעי באמצעות שימוש בכלי מדעי-אותנטי: התוכנה למידול מולקולרי Jmol.

-רקע תיאורטי-

בפרק זה מוצגת סקירת ספרות הנקשרת לשאלות המחקר שיובאו בהמשך, ומטרתו לספק בסיס תיאורטי עשיר למחקר. הסקירה הספרותית כוללת חמישה תתי-פרקים: תת-פרק 1 מתמקד בלמידת מדע באמצעות פרקטיקות מדעיות-אותנטיות, ובו נסקרות ההשקפות החינוכיות שהובילו לפיתוח תוכנית לימודים וחומרי הוראה ולמידה בביואינפורמטיקה; בתת-פרק 2 נערכת סקירה ספרותית רחבה אודות מודלים וייצוגים חזותיים; בהמשך הרקע התיאורטי, בתת-פרק 3, נערכת סקירה המתמקדת בטכנולוגיות מעצימות למידה; הרחבת הדעת בנושאים אלו פותחת את השער, בתת-פרק 4, לתיאור ידע מדעי על פי שלושת מרכיבי הידע: ידע תוכני, ידע פרוצדורלי וידע אפסטימי (OECD, 2016) וזאת בהקשר לפרקטיקת מידול מולקולרי של חלבונים; הסקירה מספקת בסיס תיאורטי למסגרת מושגית שעוצבה ופותחה במחקר זה לצורך מענה על שאלות המחקר העוסקות במידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים. על כן, תת-פרק 5 מיוחד לתיאור מסגרת מושגית הנצרכת עבור אפיון משימות Jmol ממוחשבות, חקר השימוש של תלמידים במשימות Jmol ובחינת תפיסות התלמידים והמורים את השימוש ב-Jmol.

1 למידת מדעים ורכישת ידע באמצעות פרקטיקות מדעיות אותנטיות

1.1 סקירה היסטורית של המושגים 'ידע' ו-'למידה' במסגרת החינוך המדעי

המונחים 'ידע' ו-'למידה' נטועים בליבת המחקר התיאורטי והמעשי של השדה החינוכי. המחקר בשדה החינוכי מתבסס על השקפות בעיקר מתוך תחומי-דעת כגון פילוסופיה כללית, פילוסופיה של המדע וכן מפסיכולוגיה קוגניטיבית וחברתית. בהתבסס על תחומי-דעת אלה, הגדרת שני המונחים 'ידע' ו-'למידה' נגזרת מתוך שלוש השקפות עולם: השקפה ביהיוריסטית, השקפה קוגניטיבית והשקפה של ידע תלוי הקשר (Situational) (Greeno, Collins, & Resnick, 1996)³. סקירה זו מציגה את ה-'ידע' ואת ה-'למידה' על פי שלושת ההשקפות: ההשקפה ביהיוריסטית מגדירה ידע כמצבור של רעיונות הנקשרים זה לזה ומובילים להתפתחות כישורים. למידה ביהיוריסטית היא תהליך שבו נוצרים קשרים בין רעיונות וכישורים אשר נרכשים מתוך ניסיון. למידה ביהיוריסטית מתוארת במונחים של גירוי ותגובה המקדמים יצירה של קשרים בין רעיונות או החלשתם. ההשקפה השנייה היא השקפה קוגניטיבית אשר מגדירה את הידע כמבנים מנטליים וכן כתהליכים שבאמצעותם ניתן לפתח או לזהות תבניות וסמלים. על פי ההשקפה הקוגניטיבית, למידה היא תהליך של התפתחות מושגית, המשלבת ארגון מחדש של מבני ידע ומקדמת את התפתחותם של תהליכים קוגניטיביים כלליים, כגון התפתחות מיומנות פתרון בעיות או התפתחות של חשיבה לוגית ומנומקת (Reasoning). ההשקפה השלישית היא השקפה של ידע תלוי הקשר הרואה ידע כתוצר פעילות של יחיד בקבוצה ו/או תוצר משותף של פרטים המשתתפים בקהילות חברתיות-טכנולוגיות. למידת יחיד והתפתחות של ידע תלוי הקשר המתרחשת במסגרת קבוצה מוגדרת כהשתתפות לגיטימית בקהילת-מעשה.

³ על פי Greeno et al, ביהיוריסטית מתבסס על הזרם הפילוסופי של האמפיריציזם, קוגניטיביזם מתבסס על רציונליזם והשקפה של ידע תלוי-הקשר מתבססת על פרגמטיזם של דייואי ועל ההשקפה הסוציו-היסטורית של ויגוצקי. לא ארחיב בחיבור זה על זרמים היסטוריים-פילוסופיים אלו.

התפתחותן של שלושת ההשקפות החלה במחצית הראשונה של המאה ה-20, אז תאוריות למידה שונות התאפיינו בהשקפה ביהביוריסטית. עם זאת, המחזיקים בהשקפה זו ספגו ביקורת על כך שהם אינם לוקחים בחשבון היבטים קוגניטיביים של חשיבה, אמונות ורגשות. על כן בתחילת המחצית השנייה של המאה ה-20, פורסמו מספר תאוריות קוגניטיביות אודות למידה (Schunk, 2012). לדוגמה, הפסיכולוג החינוכי Piaget גרס כי יש להתאים את אופי הלמידה לשלב ההתפתחותי בו נמצא הלומד, וכן שההתפתחות מערבת רכישת סכמות מנטליות שהן מבנים קוגניטיביים המאפיינים חשיבה ופעולה (Piaget, 1964). על פי Bruner (1986) סכמות מנטליות הן תפיסות (Conceptions) שהן אוסף של אובייקטים משותפים המתכנסים לכדי רעיון אחד (Bruner, 1986). בהקשר זה, Ausubel טען שמבנים קוגניטיביים הנמצאים בתודעתו של הלומד טרם רכישתו של ידע חדש, מהווים גורם מכריע ברכישת ידע המאפיין למידה משמעותית (Ausubel, 1969). תאוריות פסיכולוגיות-קוגניטיביות הובילו חוקרים רבים לבחון את הלמידה לאור ההשקפה הקוגניטיבית, וממצאי מחקרים כמו גם התפתחויות בשטח החינוכי-מדעי תוארו על פי השקפה זו. כך תוארו תפיסות תלמידים כתפיסות מוטעות (לדוגמה: נוסבוים ויחיאלי, 1995; McCloskey, 1983) או כתפיסות חלופיות המתבססות על ידע מוקדם ופרימיטיבי (P-prims) המוצגות כתפיסות שבהן קיימת מידה מסוימת של תועלת ושניתן לזהות בהן נקודות עיגון לידע מקובל (לדוגמה: Smith III, Disessa, 1993 & Roschelle).

עוד לפני כן, ג'ון דיואי, המבשר של החינוך הפרוגרסיבי, החזיק בתפיסה פרגמטית של עשייה (Doing) במסגרת הלמידה וכדרך חיים שיש לדגול בה, ובהקשר זה טבע את המונח חקר (Inquiry). באמצעות מונח זה תיאר את הלמידה (Dewey, 1938). כך דיואי קידם השקפת מבט פרוגרסיבית הרואה את התלמיד במרכז, וזאת חרף הגישה הביהביוריסטית אשר שלטה בתקופתו. יתרונם של הסובייטים על האמריקאים במרוץ לחלל לאחר שילוח הלוויין ספוטניק ב-1957, הוביל את האמריקאים לרפורמה מעשית באופי למידת והוראת מדע, מתוך הבנה כי העברת מידע פסיבית עלולה להוביל את הדורות הבאים לסטגינציה ועיכוב ברכישת ידע מדעי רב ערך. בעקבות התפתחות זו, נכתבו תוכניות לימוד המקדמות למידה בדרך החקר בתחומי דעת מדעיים שונים כדרך לקרב תלמידים לידע מדעי ולמדענים. אחת מהתוכניות הייתה תוכנית BSCS (Biological Science Curriculum) שיובאה לישראל על ידי פנחס תמיר בתחילת שנות השבעים ויצרה שינוי מערכתי שעיקרה הוראה ולמידה של ביולוגיה בדרך החקר (תמיר, 2006). תוכניות אלה קיבלו תוקף במהלך שנות התשעים, אז נכתבו מסמכי סטנדרטים משפיעים בארצות הברית הממליצים על הוראה ולמידה בדרך החקר (NRC, 1996, 2000).

ההשקפה של ידע תלוי-הקשר צמחה במהלך שנות השמונים מתוך מחקריהם של האנתרופולוגית Lave וחוקר החינוך Wenger (Lave & Wenger, 1991), וכן מעבודתם של Brown et al. (1989) אשר תיארו את הלמידה המתרחשת מחוץ לכתלי בית הספר כשילוב של שימוש בכלים קונספטואליים עם פעילות אותנטית בהקשרים של התרבות שבה נעשית הפעילות. שינוי השקפה נחוץ לדעתם מכיוון שלמידה בית ספרית חייבת להיות תלוית-הקשר, ועל כן ישנה הצדקה לקידום טכניקות חדשות להוראה ולמידה. שוליינות קוגניטיבית (Cognitive apprenticeship) הוצעה על ידם כפתרון יעיל ללמידה בית ספרית תלוית-הקשר. ההשקפה התחדדה באמצעות Lave ו-Wenger (1991) אשר תיארו את הלמידה כהשתתפות

פריפריאלית לגיטימית (Legitimate peripheral participation) של הלומד בקהילת מעשה (Community of practice).

התפתחויות אלה היוו כר פורה לאימוץ השקפה של ידע תלוי-הקשר כדרך ללמידה בכיתת המדעים בבתי הספר (Lemke, 1990; Driver, Asoko, Leach, Scott, & Mortimer, 1994), ולכינון מאוחר יותר של מסמכים בינלאומיים הרואים את הלמידה בדרך החקר כפעילות חברתית משותפת לקבוצת לומדים (NRC, 2000), וכהשתתפות בפרקטיקות מדעיות אותנטיות (OECD, 2016; NRC, 2012; NGSS,) (2013).

1.2 החתירה ללמידת מדעים באמצעות פרקטיקות מדעיות אותנטיות

בהתבסס על שתי ההשקפות המובילות, קוגניטיביזם וידע תלוי הקשר, בשנות התשעים חוקרי חינוך מדעי ראו בלמידה שיח מדעי-קונסטרוקטיביסטי המתעורר כתוצאה מדיאלוג בין מורה לתלמידים ומקדם תהליכים קוגניטיביים אינדיבידואליים יחד עם תהליכים חברתיים-תרבותיים (Driver, Asoko, Leach, Scott, & Mortimer, 1994). לטענתם, שיח מדעי מועיל עשוי ליצור שינוי בקרב תלמידים העוברים מחשיבה שאינה פורמלית אודות תופעות מוכרות להם, לעבר חשיבה מדעית מקובלת שבה הידע המדעי נמסר כפי שנהוג בקהילה המדעית.

לאור השאיפה לעודד שיח מדעי בבתי הספר, בשנת 1996 ובהמשך בשנת 2000 פורסמו בארצות הברית מסמכי סטנדרטים אשר העמידו את הלמידה וההוראה בדרך החקר (Inquiry-based teaching and learning) במרכז לימודי המדעים בבית הספר. מחברי הסטנדרטים הציבו שתי מטרות על: האחת היא שתלמידים יפתחו יכולות הנחוצות לעשיית חקר מדעי שהוא הכלי העיקרי של המדענים בעבודתם (Abilities of inquiry), ואילו המטרה השנייה היא שתלמידים יפתחו הבנה אודות חקר מדעי (Understandings of inquiry) באמצעות עידוד התלמיד לחשיבה על הרעיונות שעליהם מתבסס החקר המדעי (NRC, 2000). עם זאת, הפער בין העשייה בשדה החינוכי לעשייה בשדה המדעי גדול למדי. התנגשות בין הערך המדעי של החקר בפרקטיקה האותנטית, לבין החקר בכיתות מדעים, הובילה את Chinn & Malhotra (2002) לנסות לגשר על הפער באמצעות בניית מסגרת תיאורטית לתיאור שני סוגי החקר. תפקידה של המסגרת שהכינו היא לאפשר לנתח כל משימה הניתנת לתלמידים דרך מבחר קטגוריות המציגות את מידת הקרבה של משימת החקר למדע האותנטי על פי התהליכים הקוגניטיביים הנדרשים מהתלמידים (לדוגמה: מי מנסח את שאלות המחקר?) או על פי היבטים אפיסטמולוגיים (לדוגמה: מהי מטרת המשימה?). באמצעות ניתוח שבצעו למשימות שניתנו לתלמידים על פי המסגרת שפותחה זוהו הבדלים מהותיים בין חקר מדעי-אותנטי לבין ניסויים, תצפיות והדגמות פשוטות הנמצאות בספרי לימוד או בסביבות ממוחשבות בהם עושים שימוש בבתי הספר.

על אף שהסטנדרטים עודדו למידת מדע בדרך החקר, במהלך הזמן הופנתה ביקורת כלפי גישה זו: ראשית, עקב ריבוי הגדרות ומשמעויות שונות לחקר, נוצרה חוסר בהירות בקרב מורים בנוגע לאופי הלמידה בדרך החקר בלמידת מדע בבתי הספר. שנית, למידה בדרך החקר זוהתה במקרים רבים על ידי מורים ותלמידים כהליך שמטרתו לעגן ידע תוכני קיים המבוסס על מידע בספרי לימוד וכן על תכניות לימוד, וזאת במקום

לראות בתהליך החקר כלי להבניית ידע חדש (Barrow, 2006). על פי Osborne (2014a) ההנחה המוקדמת בקרב הציבור ומקבלי ההחלטות היא שמדע הוא פעולת חקר אודות העולם ועל כן מטרתו היא לספק ידע אונטולוגי חדש אודות תופעות טבעיות ויצורים חיים. על בסיס הנחה זו החינוך המדעי מעודד תלמידים להשתמש בידע קיים ומבוסס. השאיפה לקדם רכישת ידע אונטולוגי אודות העולם, הובילה לכך שהלמידה בדרך החקר התרחשה לרב בדרך לא-אותנטית, ובמקום לייצר ידע חדש, הוראה בדרך החקר מוכוונת לתיאור של אובייקטים או תופעות ידועות המתוארות על ידי תאוריות מבוססות (Osborne, 2014a).

הביקורת אודות השימוש בחקר בכיתות המדעים בבתי הספר הגיעה לשיאה כאשר נטען כי הוראה מבוססת-חקר בהדרכה מינימלית אינה אפקטיבית (Kirschner, Sweller, & Clark, 2006). טענה זו עוררה הדים נרחבים של ביקורת, ובעיקרה נטען כי למידת חקר אינה למידת גילוי אלא למידה אשר נתמכת על ידי פיגומים שניתנים במהלך הלמידה, ובודאי שקיימים בה אלמנטים של הוראה ישירה (Hmelo-Silver, Duncan, & Chinn, 2007). בנוסף, נטען כי הוראה מבוססת חקר מגיעה בהקשר, כך שלפעילות שאותה מבצעים התלמידים ובה הם בוחרים, יש חשיבות לתרומתם ללמידה. מכיוון ש (Kirschner et al., 2006) התעלמו מההקשר הם אינם יכולים לטעון כי למידת חקר אינה יעילה (Kuhn, 2007). ההתפלמסות בנוגע לבחירת המונח 'חקר' כתיאור אופי למידת מדע במאה ה-21 המשיכה וזו הובילה לשינוי כיוון בטרמינולוגיה של המונח, וזאת על אף שמחקרים הראו שישנו יתרון בהוראה מבוססת חקר על פני הוראה ישירה (Furtak, Seidel, Iverson, & Briggs, 2012). בסופו של דבר, השתנתה הטרמינולוגיה, והודגשה הפרקטיקה האותנטית של המדע, אשר כוללת בתוכה גם ממדים חברתיים ואפיסטמולוגיים, המקושרים לפרוצדורות מדעיות (Duschl, 2008; Osborne, 2014a, 2014b). יסודות הטרמינולוגיה, הונחו על ידי Kuhn (1962) שגרס כי בפרקטיקה המדעית תאוריות מדעיות מנוסחות מחדש ומותאמות לידע המשתנה תדיר. לדידו, ידע מדעי עכשווי אינו חף מהקשרים חברתיים ועל כן מהפכות מדעיות אינן מתקדמות באופן לינארי כי אם נובעות משינוי פרדיגמטי בקרב הקהילה המדעית אשר ניזונה מהקשרים חברתיים. על פי Osborne (2014a) ידע תיאורטי הוא אחד מעמודי התווך של המדע, אך קיימת פעילות מדעית מעבר לידע תיאורטי. על כן הפעילות המדעית צריכה להיות מנוסחת כמערכת מיומנויות שבהן מתמחים מדענים.

השינוי הטרמינולוגי לא אחר לבוא, ובמסמך הסטנדרטים האמריקאי (NRC, 2012) גובשו המלצות חדשות ללמידת מדע בדגש על שילוב שמונה פרקטיקות מדעיות עם רעיונות דיסציפלינריים מרכזיים, ומושגים חוצי-תחומים. שמונת הפרקטיקות שנוסחו הם: (א) שאילת שאלות; (ב) פיתוח ושימוש במודלים; (ג) תכנון וביצוע מחקרים; (ד) שימוש בחשיבה מתמטית מבוססת מחשב; (ה) ניתוח ופירוש נתונים; (ו) הבניית הסברים ועיצוב פתרונות; (ז) העלאת טיעונים המתבססים על הוכחות; (ח) רכישת, הערכה והעברת מידע מדעי. גם תכנית הערכת התלמידים הבינלאומית (PISA) אשר פורסמה עבור מדינות ה-OECD (OECD, 2016), גיבשה עמדה הסוברת כי על תלמידים לרכוש ידע בנושאים הקשורים למדע, כך שיוכלו לקבל החלטות מושכלות וביקורתיות אשר נסמכות על ידע מדעי. רכישת ידע מדעי (Scientific knowledge) מתבטאת ביכולת להסביר תופעה, להעריך או לעצב מחקר וכן ביכולת לפרש נתונים והוכחות

באופן מדעי (OECD, 2016), והיא מסווגת לידע תוכני (Content knowledge), ידע פרוצדורלי (Procedural knowledge) וידע אפיסטמי (Epistemic knowledge), ונרחיב על כך בתת-פרק 4.

1.3 מודל ללמידת-תחום

המודל ללמידת-תחום (Model of Domain Learning, MDL) הוצע על ידי Patricia Alexander (2004), ומתאר למידה לאורך זמן והתפתחות של ידע תחום מדעי. Alexander (2004) מבחינה בין שלושה שלבים על ציר של מומחיות בלמידה של כל תחום דעת. שלושת השלבים המאפיינים לומדים לאורך חייהם הם: התאקלמות (Acclimation), כשירות (Competence) ומומחיות (Proficiency) וכן שלבי ביניים ביניהם (Early/Late Competence). כל שלב מובחן באמצעות שלושה קריטריונים המגדירים את רמת המומחיות של הלומד: ידע, אסטרטגיה ועניין. להלן הרחבה הנוגעת לכל אחד מהקריטריונים: הקריטריון הראשון, הוא ידע בתחום דעת (Subject-matter knowledge). שני סוגי ידע תוכני הם ידע נושאי (Topic Knowledge) וידע תחומי (Domain Knowledge). ידע נושאי מתמקד בנושאים או מושגים ספציפיים בתחום ואילו ידע תחומי מייצג ידע נרחב הקיים בתחום-הידע. ככל שהלומד מתקדם לכיוון מומחיות אקדמית, שני סוגי הידע מתפתחים. עבור הטירון הנמצא בשלב ההתאקלמות בלמידה הידע בתחום דעת הוא ידע נושאי ולא ידע תחומי. מומחיות מתאפיינת במעבר מידע נושאי לידע תוכני, אף שהידע הנושאי מתרחב.

הקריטריון השני הוא שימוש באסטרטגיות. בשלב ההתאקלמות האסטרטגיה מתאפיינת בפעולות שטחיות (Surface-processing strategies), כדוגמת חזרה, הרחבה, ארגון, שאלות-עצמיות וניסוח וויסות רגשי (Weinstein & Mayer, 1986, as cited in Schunk, 2012). עם ההתקדמות לשלבי הכשירות והמומחיות האסטרטגיות הללו פוחות ומשתלבות איתן אסטרטגיות העמקה (Deep-processing strategies) כדוגמת הכנת מפות מושגים אשר דורשות משאבים קוגניטיביים ניכרים בהשוואה לאסטרטגיות השטחיות.

הקריטריון השלישי של Alexander (2004) הוא העניין של הלומד. בשלב ההתאקלמות העניין הוא תלוי-סיטואציה (Situational interest), וככל שהוא מתקדם לעבר הכשירות והמומחיות כך עניין זה פוחת ומחליף אותו עניין אישי בתחום (Individual interest).

2 מודלים וייצוגים חזותיים בהוראה ולמידה

2.1 הגדרות מודל בפסיכולוגיה קוגניטיבית ובמדע

למונח 'מודל' (Model) מגוון רחב של משמעויות שחלקם מקבל משמעות בחיי היום-יום. מודלים נוצרים על ידי תהליך המידול (Modeling) שהוא תהליך דינמי של פיתוח, שימוש, שינוי ואף נטישת מודל קודם (Gilbert & Justi, 2016a). המודלים משמשים ככלים מרכזיים עבור מדענים וכן משמשים ללמידה והוראה של תחומי דעת מדעיים שונים (Erduran & Duschl, 2004). כאמור לעיל (עמוד 20) פיתוח ושימוש במודלים הוא פרקטיקה מדעית אותנטית המיושמת בחינוך המדעי (NRC, 2012).

מודל הוא מושג מרכזי בפסיכולוגיה קוגניטיבית ובפילוסופיה של המדע, ובכל אחד מתחומי הדעת הגדרת המודל שונה במעט:

בפסיכולוגיה הקוגניטיבית מקובל לתאר מודל באמצעות שני אלמנטים: מטרה (Target) ומקור (Source). אלמנט המטרה הוא אובייקט או תופעה שאינם ידועים ואילו אלמנט המקור הוא אובייקט או תופעה מוכרים, אשר יכולים לעזור להבין את המטרה. במקרים רבים, המודל הוא המקור, אך לעיתים המודל הוא מתווך המקיים קשר אנאלוגי (Analogical relation) בין מקור לתופעה (Duit & Glynn, 1995).

פילוסופים של המדע רואים במודל כלי לייצוג ידע של מדענים אודות אספקטים שונים של העולם. המדענים אשר מציגים מודלים מנצלים את הגורמים הדומים (Similarities) במודל ובדבר שאותו הם מעוניינים לייצג. על כן המודל לא בהכרח דומה לאובייקט או תופעת המטרה עבור המדענים אך המדענים הופכים אותו לדומה באופן שממלא את הציפייה שלהם (Giere, 2004).

בנוסף להגדרות השונות של מודל נערכו גם סיווגים רבים של מודלים בהתאם לצורות (modes) שבהן הם מוצגים. הסיווג הבסיסי ביותר של מודלים מדעיים על פי צורת הצגתם, ואחד הראשונים, הגיע מתוך תחום הדעת של הפיזיקה ותאר שני סוגי מודלים. ראשית, מודלים חומריים המספקים משמעות סמנטית וקונקרטית לאובייקט או לתופעה, כדוגמת דגם. שנית, מודלים פורמליים ותחביריים הנותנים ביטוי לאובייקט או לתופעה באופן פורמלי, כדוגמת נוסחה מתמטית (Hesse, 1966). בד בבד עם הצורך לתת מענה לחשיבותם של מודלים במתן הסברים מדעיים, גדל מספר סוגי המודלים המסווגים. לדוגמה Gilbert, Boulter, & Rutherford (1998) סיווגו מודלים לארבעה סוגים: חומריים, חזותיים, ורביים וסימבוליים. ארבעת הסוגים מיועדים להסביר⁴ מדענים, מעצבי תכניות לימודים, מורים ותלמידי מדע.

טרם רכישת ההבנה כיצד מתרחשת למידה בכיתה באמצעות מודלים, יש להכיר שני מושגים שצמחו מתוך הפסיכולוגיה הקוגניטיבית ובהם משתמשים כדי להבחין בין ייצוגי הידע של לומדים: מודלים מנטליים ומודלים קונספטואליים. מודל מנטלי מתאר היבט קוגניטיבי של ייצוג ידע של הלומד אודות מערכת או מערכות. ידע זה מתפתח באמצעות אינטראקציה עם המערכות או עם הייצוג שלהן במציאות. המודלים המנטליים, אף שלרוב אינם מדויקים, הם פונקציונליים, והם המקור לבנייתם של המודלים הקונספטואליים. מודלים קונספטואליים הם כלים מחשבתיים חיצוניים אשר נוצרים על ידי חוקרים, מורים, מהנדסים ועוד. המודלים הקונספטואליים מייצגים ידע משותף של קהילה, והם קוהרנטיים עם הידע המדעי של אותה קהילה (Greca & Moreira, 2000; Norman, 1983).

היישום של השימוש במודלים בכיתות מדעים, הוביל את Gilbert et al. (1998) להבחין בארבע צורות שונות של מודלים שבהם ניתן להשתמש בכיתה ואותן הם מציגים כטיפולוגיה היררכית: הצורה הראשונה היא המודל המנטלי שבו מחזיקים תלמידים; השנייה היא המודל המתבטא (Expressed model) המציג את המודל המנטלי של התלמיד הבודד באמצעות פעולה, דיבור או קריאה; השלישית כוללת מודל קונצנזואלי (Consensual model) שהייצוגים בו מוסכמים על קבוצה או על קהילה, בדומה למודל

⁴ הסברים אינם במובן הצר של משמעות המילה. ההסברים מסווגים לחמישה סוגים: הצדקת פעולה, הבהרת משמעות, תיאור תאורטי, נסיבתיות, וחזיון דוקטיבי של אירוע עתידי (Gilbert, Boulter, & Rutherford, 1998).

הקונספטואלי; הצורה הרביעית היא מודל הוראתי, שבו מופעלת צורה ייחודית של מודל מתבטא של מורה השואף לעזור בהבנת המודל הקונצנזואלי. הטיפולוגיה אותה הציגו Gilbert et al. (1998) וכן פיתוח מאוחר יותר של מסגרת תיאורטית שמסייעת להגדיר וליישם את תהליך המידול (Model of modelling) ברמות שונות של מסוגלות, מהמדען ועד התלמיד (Justi & Gilbert, 2002) סייעה לקדם הוראה-מבוססת-מודלים בשנים שלאחר מכן (Gilbert & Justi, 2016).

2.2 מה בין ייצוג למודל מדעי?

בשונה מהשימוש במונח 'מודל', מקורו של המונח 'ייצוג' (Representation) הוא במדע הסמיוטיקה, שאותו ייסד de Saussure בראשית המאה שעברה, ואשר טבע את המונח 'מסומן' (signified) כדי לציין רעיון בעל משמעות. 'מסומן' נקשר למונח 'מסמן' (Signifier) שהיא מילה שרירותית בלתי נפרדת מה 'מסומן' (de Saussure, 2011). באותה התקופה, Sanders Peirce (1906) תיאר 'סימן' (Sign) כשלושה סוגים של ייצוג: אייקון (Icon), אינדקס (Index) וסימבול (Symbol): (א) ייצוג אייקוני דומה חזותית למסומן; (ב) ייצוג אינדקסי מעיד על המסומן על אף שאינו דומה לו חזותית; ו-(ג) ייצוג סימבולי הוא סימן שרירותי שקיימת מוסכמה אודות ייצוג מסומן אותו הוא מסמן. הטיפולוגיה של Sanders Peirce לסימנים כייצוגים סמנטיים (Semantic representations), היא המקור לספרות ענפה העוסקת בייצוגים בפסיכולוגיה חברתית וקוגניטיבית המיושמת בחינוך מדעי.

דוגמה אחת לחשיבותם של ייצוגים בתהליכי למידת מדע שייכת לעיסוק בשינוי מושגי. החוקרים diSessa ו-Sherin (1998) התייחסו למושג מדעי או מתמטי כייצוג פנימי (Internal representation) הקיים אצל הלומד. הם התבססו על תאוריית האב-טיפוס (Prototype theory) של Eleanor Rosch, כדי להסביר הבדלים בין לומדים בגילאים שונים ובשלבי התפתחות שונים. לדוגמה, המושגים 'צמח' ו-'בעל-חיים' עשויים להיתפס כפריטים שאינם משתייכים לאותו אב-טיפוס ואין להם ייצוג מנטלי משותף במוחם של תלמידים צעירים. בשונה מתלמידים צעירים ייתכן שתלמידים בוגרים יותר מצליחים ליצור ייצוג מנטלי משותף לשני הפריטים ועל כן ביכולתם לעבור שינוי מושגי דרך איחוד של פריטים בתודעתם. על כן שימוש בייצוגים פנימיים הוא חלק מתהליך שינוי והתפתחות בהבנת המושגים.

דוגמה אחת לחשיבותם של ייצוגים בתהליכי למידת מדע מגיעה בהקשר לפתרון בעיות. ייצוג חיצוני (External representation) הוא תצורה פיזית במציאות הממשית, לדוגמה חפץ, תמונה, או שיח שמתקיים בין לומדים, וממצאי מחקרים הראו כי ייצוגים חיצוניים משפיעים על הייצוג הפנימי של הלומד במהלך פתרון בעיות (Zhang, 1997; Zhang & Norman, 1994) או על הבנת תופעות מדעיות (McElhaney, Chang, Chiu, & Linn, 2015).

לרב, בספרות משתמשים במושג 'ייצוג' ולא נעשה שימוש במונח 'מודל', זאת על אף שלעיתים נדמה כי המשמעות של המונח ייצוג פנימי חופפת במידת מה את הגדרת המודל המנטלי, והגדרת ייצוג חיצוני חופפת במידת מה את הגדרת המודל הקונספטואלי. ההבחנה בין המושגים מודל וייצוג נובעת בעיקר מכך שהשימוש במונח 'ייצוג' מקורו בעיקר במדע הסמיוטיקה (de Saussure, 2011; Sanders Peirce, 1906) ששורשיו בפסיכולוגיה קוגניטיבית ואילו השימוש במונח 'מודל' מקורו בעיקר בפילוסופיה של המדע (Erduran &)

(Duschl, 2004; Giere, 2004). מתוך ההבדלים הדקים בשימוש בשני המונחים ניכר שלמונה 'מודל' ישנה משמעות מורכבת המגיעה מתוך טבעו של המדע וניתן לטעון באמצעות מונח זה כיצד באים לידי ביטוי היבטים פרוצדורליים ואפיסטמיים בעשייה המדעית בהקשר למודלים קונספטואליים ומנטליים. לעומת זאת, כאשר מעוניינים בניתוח קוגניטיבי של למידה שבה על הלומד לעבד פריטי מידע, ולייצר סכמות של ידע, ולהראות הבנה מושגית והעברה, אז נוטים להשתמש במונח ייצוג. אף על פי כן, בהגדרת מודל מדעי על פי Schwarz & White (2005) ישנו חיבור בין שני המונחים: 'ייצוג' ו-'מודל'. כך על פי הגדרתן:

"מודל מדעי הוא מערך של ייצוגים, כללים ומבנים מחשבתיים אשר מאפשרים למשתמש בהם להכין ניבויים והסברים. מודלים מדעיים יכולים להיות שונים בצורתם, ממודלים של מערכת השמש דרך סימולציות מחשב של התנגשויות גלקסיות, ועד חוקים כמותיים כגון $F=ma$ וכן עקרונות איכותניים כגון 'כאשר כוחות אינם פועלים, מהירות גוף נשארת זהה, מכיוון שאין מה שיגרום לה לשינוי'. מודלים, על פי מובנו של המונח, הם כלים לבטא תאוריות מדעיות באופן שיכול לשמש למטרות כגון ניבוי או הסבר" (p. 166).

המודלים המדעיים שבהם מתמקדת עבודה זו הם מודלים מולקולריים, אשר תלמידים חוזים בהם, ועל כן ניתן להגדירם גם כייצוגים חזותיים. על כן, אף ש Schwarz & White (2005) מגדירות את המודלים גם ככללים ומבנים מחשבתיים, אנו נתמקד במונח 'ייצוג חזותי' ועל כך בתת הפרק הבא.

2.3 ייצוגים חזותיים בהוראה ולמידה

ייצוגים חזותיים (Visual representations) הם מקרים פרטיים של ייצוגים חיצוניים (External representations) אשר תופסים מקום חשוב בלמידה בבתי ספר. ייצוגים אלו נפוצים כחומרי הוראה חזותיים לצד טקסטים מילוליים, והם מספקים מידע חזותי בעוד שטקסטים מספקים מידע ורבלי. המטרה העיקרית של הייצוגים החזותיים לשמש כעוזרים חזותיים בחומרי לימוד, ובלמידה של מדע חשיבותם רבה ביותר, בהשוואה לתחומים נלמדים אחרים שאינם מדעיים (Eilam & Gilbert, 2014). המונח *הַחֲזוּנָה* (visualization) עשוי להתפרש בשפה האנגלית כייצוג חזותי אך יש לו משמעות נוספת מקובלת יותר והיא קבלה ועיבוד של מידע חזותי על ידי המוח. בנוסף, החזיה הוא תהליך שכלי היוצר תְּדִמִית (image) אודות ייצוג חזותי (Gilbert, 2005).

לאור התאוריה של Sweller (1994) אודות עומס קוגניטיבי בלמידה (Cognitive Load Theory, CLT), על מעצבי חומרי למידה והוראה לקחת בחשבון את יכולת העיבוד המוגבלת של זיכרון העבודה ולמנוע עומס חיצוני שיכול להוביל לעומס קוגניטיבי ובאופן ספציפי לעומס שיכול למנוע מסכמות ידע חדשות להיווצר. המוטיבציה של מפתחי חומרי הוראה ולמידה לעצב ייצוגים חזותיים המפחיתים עומס קוגניטיבי על התפוסה המוגבלת של זיכרון העבודה, הובילה לפיתוח הנחיות מבוססות ידע מחקרי אשר מומלצות במסגרת פיתוח חומרי מולטימדיה בסביבות למידה מבוססות מחשב (Mayer & Moreno, 2002). בנוסף, הוצגה טקסונומיה המגדירה את התפקידים של ייצוגים חיצוניים מרובים (Multiple External Representations, MER) שאותם יש לקחת בחשבון לצורך תכנון יעיל של חומרי למידה המשופעים בהם (Ainsworth, 2006). שילוב ההמלצות של חוקרים בתחום כוללות הנחיות הניתנות עבור

מפתחי חומרי הוראה ולמידה וכוללות הפחתה בשימוש בייצוגים המובילים לפיצול תשומת לב, שימוש יעיל בשתי מערכות עיבוד שונות למידע שמיעתי וחזותי, הפחתת תפירות (redundancy) של מידע בייצוגים החזותיים ועוד. המלצות אלה מתבססות על הבנת החשיבות של הידע המוקדם והעומס הקוגניטיבי שאתם מתמודדים הלומדים (Cook, 2006).

2.4 ידע אודות מודלים בהוראה ולמידה

אחת מהטענות הבולטות של הספרות המחקרית העוסקת בשימוש במודלים ובמידול בהוראה ולמידה היא שלמידה באמצעות מודלים היא מטרה חשובה אך זו אינה עומדת בפני עצמה ויש להשלימה באמצעות הבנת הרעיונות אודות טבעם של מודלים (Evagorou, Erduran, & Mäntylä, 2015; Gilbert & Justi, 2016b; Gouvea & Passmore, 2017; Grosslight, Unger, Jay, & Smith, 1991; Schwarz & White, 2005; Treagust, Chittleborough, & Mamiala, 2002). במסגרת המאמץ המחקרי להבין כיצד תלמידים תופסים את טבע המדע, בוצע מחקר שבו Grosslight et al. (1991) בדקו כיצד תלמידים מבינים את טיבם של המודלים המדעיים. הם בחנו את תפיסות התלמידים בהקשר לרעיונות הבאים: סוגי מודלים, מטרות המודלים, שיקולים בעיצוב מודל, שינוי מודל ושימוש במודלים מרובים. המתודולוגיה בה בחרו לקטלג את תפיסות התלמידים היא באמצעות קידוד של ראיונות קליניים שקיימו עם תלמידי חטיבת ביניים, תלמידי תיכון, והשוואתם לתפיסות מומחים אודות מודלים. במחקר זהו שלוש רמות של הבנה אודות מודלים: הרמה הראשונה מציגה אפיסטמולוגיה ריאליסטית-נאיבית הרואה במודלים העתקים פשוטים של המציאות. הרמה השנייה מציגה אפיסטמולוגיה רלטיבית הרואה במודלים אמצעי בעל מטרה ומגבלות, אך ללא ביטוי למקומו של מתכנן המודל. הרמה השלישית מגדירה את המודל מנקודת מבטו של המתכנן. מחקר מאוחר יותר בדק גם הוא כיצד תלמידים תופסים מודלים מדעיים, אך הפעם באמצעות העברת שאלון ידע SUMS (Students' Understanding of Models in Science). מתוך הממצאים עלה כי תלמידים תופסים בטעות כי מודל הוא העתק של המציאות וכן שתלמידים אינם יודעים מדוע מדענים מייצרים מודלים ומהם המטרות של המודלים המדעיים (Harrison & Treagust, 2002). המחקרים הללו הראו כי יכולתם של תלמידים להבין את טבע המודלים המדעיים היא מוגבלת. בסוף שנות ה-90 מסמכי הסטנדרטים המליצו לפתח בקרב התלמידים הבנה עמוקה וידיעה של טבע המדע (NRC, 1996), ועל כן התעורר הצורך לפתח תכנים המקדמים את ידע התלמידים אודות מודלים. את הכפפה הרימו Schwarz & White (2005) שפיתחו תכנית לימודים מבוססת חקר שבה התלמידים הלומדים על כוחות ותנועה פיזיקליים ממדלים תופעות ובנוסף לומדים באופן מפורש אודות טבעם של מודלים. היבטים המקדמים למידה אודות מודלים ומידול נקראו בפייה Metamodeling knowledge. ידע זה כולל את: (1) ידיעת טבעם של המודלים; (2) ידיעת טבעו של המידול; (3) הערכת מודלים; ו- (4) ידע אודות חשיבות המודל ו/או מודלים רבים. Schwarz & White (2005) טענו כי הוראה ישירה אודות מודלים מקדמת מעורבות של תלמידים במידול של תופעות ותורמת לרכישת ידע מושגי בתחום הדעת. מחקר נוסף הראה שלומדי פיזיקה, ביולוגיה ובעיקר כימיה שקיבלו הזדמנויות לעסוק במידול ולהשתמש במודלים, הראו שיפור בידע שלהם אודות מודלים מדעיים (Gobert et al., 2011).

גם כיום אין סיווג מוסכם לקריטריונים שעל פי הם יש לזהות את הידע של התלמידים אודות מודלים מדעיים. מחקרים שנערכו לאחרונה בגרמניה בחנו את הידע באמצעות חמישה קריטריונים מובחנים, ובכל אחד מהם שלוש רמות הבנה (Gogolin & Krüger, 2018; Grünkorn, zu Belzen, & Krüger, 2014). לעומת זאת, במחקר שנערך בטיוואן, פותח שאלון ידע אחר הנקרא USM (Understanding of Scientific Models and Modeling). בשאלון USM שישה קריטריונים שבכל אחד מהם תתי סיווגים המסודרים על פי רמות הקושי שלהם על פי תשובות תלמידים (Lee, 2018). למרות שעדיין אין הסכמה על הגדרת הידע אודות מודלים מדעיים בקרב תלמידים, עדיין ניתן לזהות כי ישנם שני משתנים הקובעים ידע של תלמידים: הראשון הוא השלב שבו נמצאים התלמידים בלמידה שלהם. ככל שהתלמידים מתקדמים בלימודיהם כך הישגיהם משתפרים (Grosslight et al., 1991; Lee, 2018). משתנה שני הוא ההקשר שדרכו נעשית הלמידה. שתי דוגמאות הן תחום הדעת המדעי הנלמד (Gobert et al., 2011) או המודלים שבהם משתמשים תלמידים (Gogolin & Krüger, 2018). בשתי הדוגמאות הללו ידע אודות מודלים של תלמידים משתפר ככל שהנושאים הנלמדים או המודלים בהם תלמידים משתמשים מספקים להם הזדמנויות לחשוב עליהם.

3 סביבות טכנולוגיות מעצימות למידה בהוראת ולמידת מדעים

העולם שבו אנו חיים הוא מורכב, גלובלי, ועשיר במידע יותר מאי פעם. טכנולוגיות דיגיטליות אשר מספקות באופן זמין משאבי ידע כדוגמת סרטונים ברשת, גישה חופשית לקורסים מקוונים וסביבות למידה מגוונות, שינו את אופי הלמידה בהשוואה לזמנים עברו. בשנות השמונים הועלתה הטענה כי ניתן לעצב סביבות טכנולוגיות מעצימות למידה (Technology-Enhanced Learning Environments, TELE) ככלים קוגניטיביים המארגנים מחדש את תודעת הלומד (Pea, 1985), וכן לספק ללומד דרך משחקית להבנות ידע חדש (Papert, 1980). טכנולוגיות דיגיטליות עשויים לפתח חשיבה מטה-קוגניטיבית ולקדם מכוונות עצמית בלמידה (Azevedo, 2005). על פי Mishra et al. (2013) על שימוש בטכנולוגיות דיגיטליות לקדם התפתחות של מיומנויות המאה ה-21, כדוגמת פתרון בעיות או מתן הזדמנות להפגין חשיבה יצירתית. למרות כל זאת, ועל אף שכיום ישנה גישה בלתי מוגבלת של תלמידים למשאבי ידע ולסביבות למידה מתוחכמות ברשת, עדיין אין שיפור מהותי בלמידה בהשוואה לעבר. בנוסף, עיצוב של סביבות למידה דורשת חשיבה מחודשת, מכיוון שעל גישות חינוכיות בנות זמנינו לעודד שינוי המותאם למציאות שבה תלמידים הופכים מצרכני ידע למפתחי ידע.

המציאות מוכיחה כי בשני העשורים האחרונים תלמידים מקבלים הזדמנויות רבות ומגוונות ללמידה פעילה באמצעות טכנולוגיות מעצימות למידה. כך לדוגמה, כדי לקדם למידת חקר במדעים וכן כדי לקדם למידה המשלבת פתרון בעיות, פותחו סביבות טכנולוגיות מעצימות למידה (e.g., Linn & Eylon, 2011) אשר מתבססות על עקרונות עיצוב (Design Principles) המתעצבים בכל סבב של שימוש תלמידים בהן אשר מאפשרים למפתחים לשפר אותן. בניסיון להגדיר עיצוב יעיל של טכנולוגיות למידה, בעקבות מחקרן של Kali & Linn (2008) נוסחו ארבעה עקרונות-על המנחים פיתוח של סביבות למידה התומכות בלמידת מדע בגישה חוקרת: הנגשה של מדע לתלמיד, החצנת תהליכי חשיבה, סיוע וקידום של למידה שיתופית וכן

קידום למידה עצמאית ארוכת-טווח. בשונה מהן, Ainsworth (2006) בחרה להדגיש את החשיבות של ריבוי הייצוגים החזותיים בסביבות למידה ממוחשבות כדרך לתכנן סביבות מרובות ייצוגים. לדידה, ייצוגים חזותיים הם גורמי מפתח בעיצוב סביבה ושילובם נגזר משיקולים פדגוגיים הקשורים לייצוגים ולרמת השליטה של הלומד בהם. השיקולים כוללים את מספר הייצוגים, המידע המוצג בהם, סוגי הייצוגים, הרצף שבו הם מופיעים וכן את מערכת הקשרים ביניהן. לאורך שנים רבות תוכנו טכנולוגיות רבות בתחומי דעת שונים, אשר מעודדים למידה שבה מעורב התלמיד אשר יושב מול מחשב אישי ולומד באמצעות תוכנה או לומדה. מעבר לטקסטים ואיורים, הנפוצים גם בספרי לימוד, טכנולוגיות הלמידה עשויות לכלול אנימציות (e.g., Yarden & Yarden, 2010), סימולציות (e.g., Rutten, van Joolingen, & van der Veen, 2012) או הקניית דינמיות (e.g., Linn & Eylon, 2011). על אף שהושקע מאמץ רב בפיתוח של סביבות למידה המעודדות חקר ופתרון בעיות, נטען כי שימוש של תלמידים בטכנולוגיות למידה אלה ואחרות אינן בהכרח מעודדות משחק (Gamification). מצדדי המשחק טוענים כי מוטיבציה פנימית והירתמות ללמידה מצד התלמידים באמצעות טכנולוגיה תלויה בעקרונות עיצוב שמקורן בעולם המשחקנות (Gaming) אשר יוצרים בלומד הנעה פנימית להמשיך ולשחק (Dicheva, Dichev, Agre, & Angelova, 2015). במחקר שנערך לאחרונה נבדקה פעילות של תלמידים באמצעות משחק חינוכי המשמש כאובייקט-לחשוב-באמצעותו (Holbert & Wilensky, 2018) המעודד תלמידים לחקור תופעות מופשטות כגון טבעו החלקיקי של החומר. כמו כן, פותחה סימולציה מולקולרית שבה התלמידים משחקים תפקיד של חלקיק בתמיסה נוזלית. התלמידים שהשתתפו במשחק התפקידים הראו הבנה מושגית גבוהה יותר בהשוואה לקבוצת הביקורת שהשתמשו בסימולציה מולקולרית ללא אלמנט המשחק (Langbeheim & Levy, 2018). במחקר אחר נטען כי ניתן להשיג רכישת ידע תוכני מדעי באמצעות מעורבות חישובית של תלמידים (Wagh, Cook-Whitt & Wilensky, 2017). החוקרים צפו בתלמידים ה-'משחקים' באפשרויות תוכנת NetLogo, מתסרטים (Scripting) באופן ספונטני בהפסקות בית הספר את המאפיינים של הייצוגים החזותיים המוצגים בתוכנה אף ללא בקשה מוקדמת מצד המורה המלווה. כפי שנראה בהמשך בתת פרק 4.2.3 ברקע התיאורטי, שימוש בתוכנות למידול מולקולרי של חלבונים, עשוי גם הוא לקדם עניין ומעורבות של תלמידים בלמידה.

4 ידע מדעי בהוראה ולמידה אודות חלבונים

השקפה מקובלת במאה ה-21 רואה בפרקטיקה המדעית האוטנטית מודל ללמידת מדע בית ספרית וקובעי מדיניות בארצות הברית (NRC, 2012) ומדינות ה-OECD (OECD, 2016) ממליצים על הוראה ולמידת מדעים על פי הפרקטיקות האוטנטיות של המדע (Edelson & Reiser, 2006; Chinn & Malhotra, 2002). כמו כן, חוקרי חינוך מדעי מעודדים למידה המלווה בתהליכי הנמקה והצדקה מדעית (Scientific Reasoning) שבבסיסם עומד השימוש בידע מדעי (Osborne, Rafanelli, & Kind, 2018) ועל הבנה מעמיקה של עדויות מדעיות ושימוש מועיל בהן (Duncan, Chinn, & Barzilai, 2018).

במחקר הנוכחי נבדק השימוש שעושים תלמידי תיכון בתוכנה למידול מולקולרי שבאמצעותה הם חוזים במבנים של חלבונים. מכיוון שמידול מולקולרי של חלבונים עשוי להוביל לרכישת ידע מדעי אודות

חלבונים, נדרשת הגדרה קוהרנטית לידע מדעי בהקשר זה. על כן מוצגת מסגרת תיאורית המגדירה ידע מדעי באמצעות פיצול הידע למרכיבים המובחנים זה מזה (OECD, 2016; Osborne, 2014b): (1) ידע תוכני (*Content knowledge*) כולל מושגים מתוך תחום הדעת, שבהם המדע משתמש כדי לנמק או להצדיק תאוריה. לדוגמה גן, אטום או מחזור הפחמן בטבע. במחקר הנוכחי הידע התוכני מוגבל למבנה ותפקוד של חלבונים; (2) ידע פרוצדורלי (*Procedural knowledge*) מוגדר כאוסף פרוצדורות שבהם המדען משתמש לבסס טיעונים. לדוגמה ביצוע חזרות בניסוי או שימוש במערך מיומנויות של כתיבה מדעית. במחקר הנוכחי הידע הפרוצדורלי מוגבל לפרוצדורות הקשורות למידול מולקולרי של חלבונים; ו-(3) ידע אפיסטמי (*Epistemic knowledge*) הכולל מבנים אפיסטמולוגיים המקובלים במדע. לדוגמה ידע אודות חשיבותן של תאוריות, עדויות וטיעונים. במחקר הנוכחי הידע האפיסטמי מוגבל למידול מולקולרי של חלבונים, כידיע המייצג את אופי החשיבה המדעית (OECD, 2016; Osborne, 2014). בשלושת תתי-הפרקים הבאים (4.1, 4.2, 4.3) יסקרו שלושת מרכיבי הידע המדעי בהקשר למידול מולקולרי של חלבונים.

4.1 ידע תוכני אודות חלבונים

על פי מסמך PISA להערכת תלמידי מדעים ידע תוכני (*Content knowledge*) מוגדר כידיע הכולל עובדות, מושגים, רעיונות או תאוריות אודות ישויות אונטולוגיות בעולם הטבעי (לדוגמה מבנים או תופעות) אשר התפתחו כתוצאה מהפעילות המדעית (OECD, 2016, p. 19). חשוב להבהיר כי בשונה מהגדרה זו ידע תוכני המוצג בספרות קנונית של הוראת המדעים (e.g., Shulman, 1986) מקבל משמעות שונה ומזוהה כידיע בתחום דעת (*Subject-matter knowledge*) הכולל מיומנויות ייחודיות לאותו תחום. ניתן לערוך הבחנה בין שני סוגי ידע: הראשון הוא ידע מוצהר (*Declarative knowledge*) אשר נקרא גם ידע עובדתי (*Factual knowledge*) ואילו סוג הידע השני הוא ידע מושגי (*Conceptual knowledge*) (Alexander, Schallert, & Hare, 1991). ידע מוצהר הוא ידע אודות רעיון מסוים אשר לגביו ניתן לשאול אך ורק "מה?". הידע המושגי הוא ידע מעמיק בנוגע לאותו רעיון, וניתן לשאול לגביו שאלות נוספות כגון "כיצד?" ו-"מדוע?". מומחים בתחום-דעת העוסקים בעשייה מדעית מחזיקים בידע מושגי. לעומת זאת, תלמידים טירונים הלומדים מספר לימוד ואינם מבנים בעצמם את הידע מחזיקים לרב בידע מוצהר.

כאמור, בעבודה הנוכחית ידע תוכני יתואר על פי ההגדרה המופיעה במסמך PISA (OECD, 2016), ולא על פי הגדרתן של Alexander et al. (1991). כאשר בוחנים את רכישת הידע התוכני אודות מולקולות בכימיה, ניתן לזהות כי תלמידים מתקשים לרכוש ידע תוכני אודות מולקולות, תרכובות או אטומים מכיוון שתלמידים אינם יכולים לצפות בהן, ומכיוון שדורשים מהם ללמוד על המודל החלקיקי של החומר בגיל צעיר למדי. כדי להקל על האתגר, Johnstone (1991) הציע לסדר את מושגי הכימיה לשלש רמות: רמת הסימול, רמת המאקרו ורמת התת-מיקרו. מספר רב של מחקרים שהתמקדו בלמידה של התאוריה החלקיקית של החומר הראו שתלמידים מחזיקים במגוון של תפיסות חלופיות והוצעו פתרונות ליצירת שינוי מושגי בקרב תלמידים (e.g., Harrison & Treagust, 2002). פתרון מוצע הוא רכישת מיומנות של שימוש

בייצוגים על ידי תלמידים. היכולת לייצג היא משאב העומד לרשות כימאים מומחים ופיתוח ותרגול של מערך מיומנויות הקשור בהן עשוי לסייע לתלמידי כימיה לרכוש ידע מושגי (Kozma & Russell, 2005). בשונה מהגישה הקוגניטיבית-חברתית אשר אפיינה את חוקרי הלמידה בתחום הכימיה, במסגרת הניסיון לתאר רכישת ידע ברמות מיקרוסקופיות בתחום הביולוגיה, הזווית התיאורטית לתיאור תופעות נבע מתוך השקפה פילוסופית-היסטורית מתחומי הביולוגיה המולקולרית והנוירו-ביולוגיה. את התופעות ניתן להסביר על ידי חשיבה מנגנונית (Mechanistic reasoning) המשלבת תיאור של ישויות עם פעילויות (Machamer, Darden, & Craver, 2000). הקשר שבין מבנה מולקולות ביולוגיות (הישויות) לבין פעילות הוא מנגנון המתאר תופעה. לדוגמה, המבנה הלינארי או התלת-ממדי של מקרומולקולה כולל רמזים על הפעילות שבה היא מעורבת (Darden, 2008). על פי Duncan (2007) אחת הווריאנטים המרכזיים בגנטיקה המולקולרית היא שחלבונים הם ישויות מרכזיות בתופעות המתוארות כתופעות גנטיות. סטודנטים לאחר תיכון מספקים הסברים, שמסווגים על ידי Duncan לתשע סכמות, שאחת מהן היא סכמת מבנה-תפקוד, המחברת בין מבנה החלבון לתפקוד שלו. עם זאת, תלמידי תיכון וחטיבת ביניים מתקשים מאוד בחשיבה מנגנונית אודות חלבונים, ולא מן הנמנע כי ההיכרות השטחית של תלמידי ביולוגיה עם הישויות הבלתי נראות הללו משפיעה על תפיסתם את תפקידם של החלבונים בקביעת תכונות (Duncan & Reiser, 2007). הנושא 'קשר בין מבנה ותפקוד של חלבונים' (Structure-function relationship of proteins), הוא ידע תוכני מרכזי בביוכימיה. הוא מוזכר בספרות ראשונית בביוכימיה (Kendrew et al., 1960; Kendrew, 1962), ומהווה נושא חשוב בהוראתה (e.g., Kessel & Ben-Tal, 2010).

4.2 ידע פרוצדורלי אודות מידול מולקולרי של חלבונים

על פי מסמך PISA להערכת תלמידי מדעים ידע פרוצדורלי (Procedural knowledge) מוגדר כאוסף פרוצדורות שבהם המדען משתמש לבסס טיעונים (OECD, 2016, p. 19). חשוב להבהיר כי הגדרה זו לידע מתכתבת עם ההמשגה של Ryle, אשר הבחין ב-1949 בין שני סוגי ידע: "לדעת כיצד" ("Knowing how"); וכן "לדעת ש" ("Knowing that"). לדוגמה, נגינה על כלי מוזיקלי היא "לדעת כיצד" ואילו רכישת פרט ידע אודות מקום מושבו של צבא רומאי הוא "לדעת ש" (Ryle, 2009). על פי הגדרה זו ידע פרוצדורלי הוא "לדעת כיצד" בעוד שידע מוצהר הוא "לדעת ש". הגדרתו של Ryle היא הגדרה רחבה בפסיכולוגיה שניתן להכליל בתוכה כל פעולה פרוצדורלית הקשורה לעשייה. בהצטמצם לפעילות המדעית בלבד, Osborne (2014a) רואה בידע פרוצדורלי חלק חשוב בגוף הידע של המדענים. בהתבסס על רשימה נרחבת של פרוצדורות המייצגות פעילות מדעית (Gott, Duggan, & Roberts, 2008), Osborne (2014a) טוען כי כל פעילות המזוהה כפרקטיקה מדעית ודורשת מהלומד או המדען "לדעת כיצד" מזוהה כידע פרוצדורלי. תתי הפרקים 4.2.1-4.2.3 עוסקים בפרוצדורות של שימוש במודלים מולקולריים ושימוש בתוכנות למידול מולקולרי כידע פרוצדורלי המקיים הלכה למעשה את משנתו של Ryle המבחינה

⁵ אף שלעיתים מקורות שונים משתמשים במונחים אחרים כגון פעילות חלבון או מנגנון הפעילות של חלבון, ידע תוכן אודות חלבונים בהקשר למחקר זה מצוין באמצעות המונח 'מבנה ותפקוד של חלבונים'. החיבור בין המונח מבנה למונח תפקוד מצוין את הקשר הקיים ביניהם (relationship).

בין "לדעת כיצד" ל-"לדעת ש" בהקשר לשימוש במודלים מולקולריים ובתוכנות למידול מולקולרי ("לדעת כיצד"), ובהשוואה לכך לרכישת ידע אודות מבנה ותפקוד חלבונים ("לדעת ש").

4.2.1 שימוש בייצוגים חזותיים בלמידת כימיה וביולוגיה

כאמור בתת-פרק 2.3, ייצוגים חזותיים הם כלים רבי עוצמה בלמידה, והצורך הגובר לחקור את התנאים המתאימים ביותר לעיצוב ושימוש יעיל בהם, הובילה חוקרי למידת כימיה וביולוגיה לבחון למידה בתיווך ייצוגים חזותיים. השימוש בייצוגים חזותיים בלמידת כימיה וביולוגיה מוצג בעבודה הנוכחית כשימוש בידע פרוצדורלי. להלן סקירה של מחקרים מרכזיים שנערכו בכימיה וביולוגיה בהקשר ללמידה באמצעות ייצוגים חזותיים.

כימיה: על פי Gilbert & Treagust (2009) ייצוגים חזותיים שבהם משתמשים בלימודי כימיה מסווגים לשלושה סוגים ברמות שונות: הראשון הוא ייצוגים המציגים תופעות שניתן לקרוא להן תופעות אֶקְזֵמְפְּלָר (Exemplar phenomena), אשר באמצעותן נלמדות תופעות שאפשר לתאר אותן ברמה המְקְרוֹסְקוֹפִית. לדוגמה מדידות של מסה, צפיפות או ריכוז. הסוג השני הוא ייצוגים סימבוליים הכוללים מערך מוסכם של סמלים. לדוגמה, אותיות המייצגות יסודות או מטען יוני. הסוג השלישי הוא ייצוג מסוג מודל⁶. זהו ייצוג שבאמצעותו מועבר ידע אודות אובייקטים אשר קטנים מדי בשביל לראותם במיקרוסקופ אור. דוגמאות לייצוגים מסוג זה הם לדוגמה תיאור חזותי של התפלגות צפיפות אלקטרונים או מודלים מולקולריים המציגים אטומים וקשרים ביניהם. הסיווג לשלושת הרמות, מותאם לשלושת הרמות שתיאר Johnstone (1991) כדרך לתאר מושגים בתחום הדעת של הכימיה: רמה אחת המתארת תופעות שניתן לצפות בהן ולמדוד אותן (מאקרו), רמה שנייה המתארת דרך לתאר מערכת סמלים מוסכמת (סימול), ורמה שלישית המתארת דרך לתאר אובייקטים שלא ניתן לחזות בהן (תת-מיקרו). כפי שצוין לעיל, מודלים מולקולריים שייכים לקבוצת הייצוגים האחרונה ועל כן שייכים לרמת התת-מיקרו. בעבודה הנוכחית נחקרת למידה באמצעות מודלים מולקולריים חזותיים. על כן, אף שימוש של תלמידים במודלים פיזיים או קונקרטיים באמצעות שימוש בחוש המישוש נמצא כיעיל ללמידה (Bivall, Ainsworth, & Tibell, 2011; Dori & Barak, 2001), אתמקד בסקירת הספרות במחקרים העוסקים בלמידה באמצעות מודלים מולקולריים המוצגים באמצעות תוכנות מחשב.

Wu & Shah (2004) הגדירו חשיבה באמצעות מודלים מולקולריים, המשלבת יכולת מרחבית, כחשיבה חזותית-מרחבית (Visuospatial thinking), וזיהו אותה ככלי לניבוי הישגי למידה בכימיה. המלצתם הייתה להשתמש בתוכנות מחשב שבהן מוצגים ייצוגים חזותיים מרובים, כך שהעומס הקוגניטיבי יופחת. Wu & Shah (2004) הציגו מספר מחקרים שבהם זוהתה קורלציה בין יכולות מרחביות של הלומד לבין היכולת שלו להציג ידע כימי ולפתור בעיות, ובעיקר כאלה הדורשות שימוש בייצוגים חזותיים. בנוסף נמצא כי כמות השגיאות המושגיות שתלמידים עושים בכימיה יורדת ככל שנעשה שימוש נרחב יותר לייצוגים כמותיים. עם זאת, דווח שיש צורך בתכנון חומרי הוראה ולמידה מבוססי טכנולוגיה אשר יקדמו התפתחות

⁶ הגדרת מודל כאן היא מצומצמת לתיאור מולקולרי של אובייקטים ותהליכים מולקולריים, בשונה מהגדרות המודל המופיעות בתת-פרק 2.1 (עמוד 21).

של חשיבה חזותית-מרחבית בהקשר של מספר משתנים, כגון סגנון למידה וורבלי או חזותי, הבדלי מגדר (בנים מציגים חשיבה חזותית מרחבית ברמה גבוהה יותר) והתפתחות קוגניטיבית של לומדים (Newcombe & Stieff, 2012).

מודלים מולקולריים, סימולציות ואנימציות נמצאים בשימוש כייצוגים חזותיים בכימיה. מכיוון שרכישת ידע כימי מצריכה שימוש יעיל בייצוגים חזותיים, על הלומד לפתח את היכולת לייצג (Representational Competence) באופן שבו פועלים כימאים בקהילות המקצועיות שלהם (Kozma & Russell, 2005). התפתחותה של היכולת להציג ידע כימי ולפתור בעיות נבחנה בקרב תלמידים משני המינים, בגילאים שונים, במגוון נושאים, ובשילוב ייצוגים חזותיים או בהיעדרם. במרבית המקרים, נמצא כי ייצוגים חזותיים תרמו משמעותית להתפתחות היכולת לייצג מושגים בכימיה בקרב תלמידי תיכון וסטודנטים בהשכלה הגבוהה (Cooper, Grove, Underwood, & Klymkowsky, 2010; Dori & Kaberman, 2012; Stieff,) (Hegarty, & Deslongchamps, 2011; Stull, Gainer, Padalkar, & Hegarty, 2016).

ביולוגיה: בהשוואה לכימיה, בתחום הביולוגיה ישנם פחות מחקרים שניסו לזהות את תרומתם של ייצוגים חזותיים נייחים ודינמיים ללמידה (Halverson, Abell, Friedrichsen, & Pires, 2009; Kindfield,) (1994; Ryoo & Linn, 2012; Yarden & Yarden, 2010). אף שייצוגים חזותיים מסייעים לרכישת ידע ביולוגי, לחשיבה ולפתרון בעיות בתחום הדעת, לא פותחו עדיין מסגרות תיאורטיות ספציפיות לביולוגיה עד לאחרונה.

עם זאת, חשיבותה של התפתחות היכולת לייצג בקרב תלמידי תיכון וכן השימוש שלהם בייצוגים חזותיים מרובים הופך לאחרונה לגורם מרכזי בהוראה והערכה בביולוגיה. כך לדוגמה, מסגרת תיאורטית אחת, הנקראת מודל הקובייה (Tsui & Treagust, 2013), חותרת לבסס למידה דרך שימוש בייצוגים חזותיים מרובים, ומדגישה שלושה ממדים: הראשון הוא שימוש במנעד של ייצוגים חזותיים (מרובים) ברמות שונות של אבסטרקציה, מהאובייקטים עצמם ועד ייצוגים ורבליים, במטרה לפתח רכישת ידע ביולוגי. השני הוא החצנת ארבע רמות של ייצוג: מאקרו, תאית, תת-תאית, ומולקולרית. הממד השלישי הוא הידע התחומי שתלמיד אמור לפתח או לחזק: ידע אבולוציוני, הומאוסטזיס, ארגון (Organization), חומר ואנרגיה ביצורים חיים, רבייה ותורשה, התפתחות ואקולוגיה. בסיוע הטקסונומיה הפונקציונלית של Ainsworth (2006), מומלץ לפתח חומרי למידה שבהם תלמידים משתמשים בייצוגים חזותיים מרובים בשלושת הממדים שתוארו על פי המסגרת התיאורטית. על חומרים אלו להיות ברורים ופשוטים כדי שתלמידים יכול לייצר חיבורים בין הייצוגים החזותיים השונים בשלושת הממדים.

מסגרת תיאורטית אחרת, של Quillin & Thomas (2015), מדגישה את החשיבות של ציורי תלמידים ללמידה כך שההחזיה, החשיבה המבוססת-מודל, וההיבטים הרגשיים יבואו לידי ביטוי ומכאן תבוא לידי ביטוי יכולתם לפתח חשיבה מנגנונית, והבנה מושגית מעמיקה יותר בתחומי דעת ביולוגיים. מפני שבעבודה זו אתמקד בלימוד ביוכימיה, המהווה את הממשק שבין תחומי הדעת ביולוגיה וכימיה, ומכיוון שהייצוגים החזותיים שבאמצעותם לומדים תלמידים אודות חלבונים הם מודלים מולקולריים, בתת הפרק הבא יתואר השימוש בהם בביוכימיה.

4.2.2 מודלים מולקולריים ככלי מרכזי ללמידה אודות חלבונים

בתת-פרק זה ידע פרוצדורלי אודות שימוש בייצוגים חזותיים מצומצם למודלים מולקולריים של חלבונים. המודלים המולקולריים הם כלים רבי עוצמה שמדענים מייצגים באמצעותם ידע מולקולרי שהצטבר אודות מבנה ותפקוד של חלבונים. סר John C. Kendrew זכה בפרס הנובל יחד עם עמיתו Max Perutz על הפענוח של מבני חלבונים בטכניקה של יצירת גבישים של מולקולות החלבון, צילומם וניתוחם באמצעות פיזור קרני איקס (X-ray Crystallography). הוא ניסח את חשיבות התגליות שלו באופן הבא:

"קצב ההתקדמות בכל החזיתות הללו הוא עכשיו גדול, כך שאנחנו ללא ספק ניצבים לפני התקדמות רבה בהבנתנו את אחת הבעיות המרכזיות בביוכימיה - היחס בין מבנה המולקולות המרכיבות תאים חיים ותפקודן הביולוגי"

(Kendrew, 1962, p. 251)

היכולת לתאר קשרים בין מבנים של חלבונים לבין התפקוד שלהן, נבעה משילוב תוצאות ניסוייות עם מידול פיזיקלי וחזותי שנערך והוצג על ידי Kendrew et al. (1960). הידע המבני אודות החלבונים הוביל את Kendrew להציג מודלים מולקולריים שפיתח כדי ללמד על רמות המבנה של החלבונים ולהסביר באמצעותן את תפקודם הביולוגי לציבור הרחב בסדרת הטלוויזיה "The Thread of Life" בהפקת ה-BBC מ-1964. בכך השפיע על Michael Levitt, זוכה פרס נובל בכימיה לשנת 2013, להתחיל בקריירה של חוקר חלבונים (Levitt, 2001). היכולת לנצל ידע חישובי הובילה מאמצע המאה הקודמת לפיתוח של מגוון כלים למידול מולקולרי (Molecular modeling) של חלבונים. כלים אלו מספקים למדענים החזיה תלת-ממדית של מבני חלבונים, מסייעים לאיתור אתרים פעילים ומתחמים, מאפשרים ניבוי מבנים מתוך רצפים, מאפשרים השוואת מבני חלבונים, אנוטציה של מבני חלבונים, אפיון פוטנציאלים אלקטרוסטטיים על שטח הפנים של חלבונים, אפיון מבני חלבונים מורכבים (Assemblies) ועוד (O'Donoghue et al., 2010). במקביל, הלך וגדל מספרם הכולל של המבנים שפוענחו, ואלה הופקדו במאגר מידע למבני חלבונים (Protein Data Bank, PDB). מספרם של הקבצים המבניים, נכון לינואר 2019, הוא כ-148 אלף מבנים (PDB, 2019) וניתן להציגם בקלות על ידי תוכנות למידול מולקולרי. בד בבד עם התפתחות הטכנולוגיות לקביעת מבני חלבונים והשימוש המסיבי בתוכנות להחזייתם, החל פיתוח של קורסים וחומרי הוראה במוסדות להשכלה גבוהה ואף בתיכון, אשר כלל שימוש במודלים מולקולריים שמטרתם לקדם הבנה והתפתחות ידע מושגי אודות מבנה ותפקוד של חלבונים בקרב הלומדים.

בדומה לתחומי הדעת ביולוגיה וכימיה, חוקרי חינוך מדעי בתחום הביוכימיה יצרו מסגרות תיאורטיות כדי להצדיק את חשיבות של למידה באמצעות שימוש בייצוגים חזותיים בתחום, וכדי לקדם את השימוש היעיל בהם. בביוכימיה מקובל להשתמש במונח אוריינות חזותית (Visual Literacy) לתיאור המשמעות של שימוש יעיל בייצוגים חזותיים (Schönborn, & Anderson 2006; 2010). המונח אוריינות חזותית הוטבע על ידי קבוצת משתתפים בכנס הראשון לאוריינות חזותית שהתקיים ב-1969:

"אוריינות חזותית מתייחסת לקבוצת יכולות הקשורות להתבוננות שאדם יכול לפתח על ידי חוש הראיה המשתלב בו זמנית עם התנסויות חושיות אחרות. התפתחות יכולות אלו היא תהליך בסיסי בלמידה של בני אדם. כאשר יכולות אלה מתפתחות הן מאפשרות לאדם בעל אוריינות חזותית להבחין ולפרש פעולות, אובייקטים וסמלים נראים, שבהם הוא נתקל בסביבתו"

(Fransecky & Debes, 1972, p.7)

מכיוון שבספרות, המסגרת המושגית המקובלת לשימוש יעיל בייצוגים חזותיים מוגדרת כיכולת לייצג (Kozma & Russell, 2005) או כחזוק החשיבה המרחבית-חזותית (Wu & Shah, 2004), והמונחים מודלים חזותיים (Gilbert et al., 1998) וייצוגים חזותיים (Cook, 2006) הפכו למונחים נפוצים בתיאור הוראה ולמידה מבוססת-מודלים בחינוך המדעי, המונח אוריינות חזותית לא השתרש בספרות התיאורטית והניסויית בתחום. עם זאת בהוראת ביוכימיה משתמשים במונח אוריינות חזותית כדי לתאר את יכולתם של סטודנטים בהשכלה הגבוהה להשתמש בשפע הייצוגים החזותיים שהלומדים נתקלים בהם (Dries et al., 2017; Herráez & Costa, 2013; Linenberger & Holme, 2014; Mnguni, Schönborn, & Schönborn and Anderson, 2016). הראשונים להשתמש במונח אוריינות חזותית הם (Anderson, 2006) שצינו שהקוֹזְיָה היא חיונית בהוראת ביוכימיה, ועל כן יש לפתח תכניות לימודים שבהן נלמדת אוריינות חזותית כחלק אינטגרלי מהוראתה. לטענתם, למידה המבוססת על תכניות לימודים שמהם נעדרת הוראה הממוקדת בייצוגים חזותיים אינה מיטיבה עם הלומדים משלש סיבות: (1) מספרם הגדול של ייצוגים חזותיים שונים גורמים לתלמידים לבלבול ולהצפה קוגניטיבית; (2) הייצוגים החזותיים המקובלים בביוכימיה הם מסובכים בהרבה מהייצוגים שתלמידים משתמשים בהם ביום יום; ו-(3) תלמידים בעלי אוריינות חזותית חלשה עלולים למצוא עצמם חסרי אונים מול שפע הייצוגים החזותיים ולהימנע מלמידה כתוצאה ממורכבותם.

כחלק מהמסגרת התיאורטית לתיאור האוריינות החזותית של מומחי ביוכימיה, Schönborn & Anderson (2010) הגדירו שמונה מיומנויות קוגניטיביות המקיפות את אופי החשיבה הנדרשת לשימוש יעיל בייצוגים חזותיים: (1) פענוח (Decode) - פענוח מערכת הסמלים המופיעה בייצוג החזותי; (2) הערכה (Evaluate) - הערכת נקודות החוזק, המגבלות והאיכות של הייצוג החזותי; (3) פירוש (Interpret) - שימוש בייצוג חזותי כדי לפרש מידע או לפתור בעיה; (4) מניפולציה (Manipulate) - שימוש בחשיבה מרחבית כדי לפרש או להסביר היבטים הקשורים לייצוג חזותי⁷; (5) בנייה (Construct) - שינוי של מודל מולקולרי כדי לפרש או להסביר היבטים הקשורים לייצוג חזותי⁸; (6) תרגום אופקי (Translate horizontally) -

⁷ מניפולציה על פי Schönborn & Anderson (2010) מתייחסת לבניית מודל מנטלי בקרב לומדים, ובעיקר מתאר פעילות מחשבתית מרחבית מסוג Mental rotation.

⁸ בשונה מתהליך מידול אשר מתחיל בהחלטה על מטרה (source) כשלב ראשון בתהליך (Justi & gilbert, 2002), בניית מודל המתוארת כאן היא מניפולציה של מודלים מולקולריים קונספטואליים של משתמשים בייצוגים חזותיים קיימים, במטרה להציג תכונה או מאפיין של תופעה, מנגנון או אובייקט בביוכימיה. תהליך המידול שאותו מתארים Justi & gilbert (2002) מאפיין את קביעת המבנה של החלבון כפעילות מדעית אותנטית המבוצעת בשלמותה.

זיהוי ייצוגים חזותיים שונים המתארים את אותו מושג; (7) תרגום אנכי (Translate vertically) - זיהוי ייצוגים חזותיים שונים המתארים מושגים מרמות ארגון שונות שיש בניהם קשר; וכן (8) החזיית גדלים יחסיים (Visualize relative size) - תפיסת הבדלים בין סדרי גודל, גדלים יחסיים וקנה מידה בייצוג חזותי. המלצתם של Schönborn & Anderson (2010) לחוקרים, מרצים ומורי מדע היא לקדם למידת ביוכימיה באמצעות שימוש רחב של התלמידים בייצוגים חזותיים, וכן פיתוח, אימון והערכת התלמידים בשמירת המיומנויות הקוגניטיביות, וזאת כדי לקדם את רמת המומחיות שלהם בשימוש בייצוגים חזותיים בהקשר של תחום הדעת ביוכימיה.

מסגרת תיאורטית זו הורחבה בהמשך לכדי תיאור טקסונומי של ייצוגים חיצוניים בביוכימיה (Taxonomy of Biochemistry External Representation, TOBER), אשר הכילה מערכת סיווגים לייצוגים חזותיים המוסכמים בתחום הדעת של הביוכימיה, בעיקר ברמת החלקיקים, ברמה סימבולית, ברמה מיקרוסקופית ובשילובים ביניהם (Townes, Raker, Becker, Harle, & Sutcliffe, 2012).

השימוש באוריינות חזותית בביוכימיה במוסדות להשכלה גבוהה בארצות הברית קיבל דחיפה בשנים האחרונות בעקבות פעילותם של גופים כגון PDB ו-MSOE Center for Bimolecular Modeling המעודדים את קהל המרצים לביוכימיה וביוכימיה מולקולרית ללמד אוריינות חזותית בביוכימיה (Bateman & Craig, 2010; Dries et al., 2017). באחד מהפרויקטים פותחה מסגרת רחבה ומקיפה ככל הניתן לאוריינות חזותית. נכון לשנת 2017, המסגרת שהוכנה הקיפה 12 תמות-על, 27 מטרות למידה ויותר מ-200 מטרות משנה שמטרתן המשותפת היא ללמד ביוכימיה באמצעות ייצוגים חזותיים, כך שהם יהפכו למועילים בקורסי הביוכימיה בהשכלה הגבוהה. מטרות אלו עשויות להיות מקור לפיתוח של פריטי הערכה המותאמים לסטודנטים ברמות מומחיות שונות (Dries et al., 2017). לסיכום, בדומה לתחומי הדעת של הביוכימיה והכימיה, בתחום הדעת של הביוכימיה, הייצוגים החזותיים והאופן שהם נתפסים בעיני תלמידים הם בעלי ערך עבור חוקרי למידה ומרצים לביוכימיה בהשכלה הגבוהה. הפיכת הלומדים לבעלי אוריינות חזותית ובעלי יכולת להבין, להשתמש ולייצר ייצוגים חזותיים הופכת להיות מטרה מרכזית בהוראת ביוכימיה.

4.2.3 שימוש בתוכנות למידול מולקולרי

כפי שתואר במבוא לתת-הפרק 4.2 ידע פרוצדורלי (Procedural knowledge) מוגדר כאוסף פרוצדורות שבהם המדען משתמש לבסס טיעונים (OECD, 2016). בהקשר לעבודה זו, השימוש של המדען בתוכנות למידול מולקולרי עשוי להיחשב כידע פרוצדורלי, ועל כן נערכת בתת-פרק זה סקירת ספרות המתמקדת בשימוש בתוכנות למידול מולקולרי בלמידה והוראה.

מהן תוכנות למידול מולקולרי ומה מאפיין אותם? התוכנות המשמשות להצגת מבני חלבונים מותקנות במחשבים אישיים ודורשות לעיתים תוספי גרפיקה כגון Java. יתרונם הוא בשימוש אפשרי לא-מקוון וכן בתצוגה (Rendering) של מודלים מולקולריים באיכות גבוהה. ניתן גם להשתמש ביישומי רשת

(Applets) אשר מציגים מידע חזותי אודות מבנים מולקולרי באופן מקוון וניתן לשבצם בשרתי מחשב. ישנן עשרות תוכנות שונות שמטרתן היא מידול מולקולרי של חלבונים (O'Donoghue et al., 2010), ובנוסף לחשיבותן הרבה בפרקטיקה האותנטית של המדע, הן הפכו להיות בעשורים האחרונים גורם מרכזי ומדרבן ללמידת ביוכימיה במוסדות להשכלה הגבוהה. מרצים החלו לעודד את הסטודנטים לחקור את מבנה ותפקוד החלבונים (Dries et al., 2017; Jaswal, O'Hara, Williamson, & Springer, 2013). אחד מהקורסים הראשונים שבהם השתמשו סטודנטים בתוכנות למידול מולקולרי הועבר על ידי Richardson & Richardson (2002). הם בחנו את האופן שבו סטודנטים השתמשו בתוכנת Kinemage, כדי להציג מודלים מולקולריים של חלבונים. בשלב הראשון הם פיתחו מערך תרגולים עם שאלות הבדקות באופן ישיר את הידע המולקולרי של הסטודנטים. בהמשך בדקו השימוש של הסטודנטים בתוכנת Kinemage. הסטודנטים רכשו את הידע הנדרש אודות חלבונים ודיווחו על מידה רבה של הנאה בעבודה עם התוכנה (Richardson & Richardson, 2002). בסקר שנערך בקרב תשעים וארבעה מרצים לביוכימיה, העידו כמעט כולם על שימוש שהם עורכים לפחות באחת מתוכנות המידול המולקולרי כדי להציג את המודלים המולקולריים של חלבונים בפני סטודנטים. עם זאת, רק חצי מהם העידו על שימוש פעיל של סטודנטים בתוכנות בקורסים שלהם. בראיונות שנערכו עם המרצים, רבים מהם ציינו כי השימוש בתוכנות למידול מולקולרי מספק עבורם עניין מיוחד בהוראת הביוכימיה (Craig & Bateman, 2013). לעומת דיווחי המרצים בהשכלה הגבוהה, בספרות תוארו מעט מאוד מקרים של שימוש בתוכנות למידול מולקולרי של מבני חלבונים בקרב תלמידי תיכון. אחת מהן היא עבודתם של Burgin, Oramous, Kaminski, Stocker, & Moradi (2018) אשר בדקו את תפיסות תלמידי כיתה י' אודות השימוש בתוכנת Visual Molecular Dynamics (VMD). התלמידים קיבלו פרויקט שבו חקרו תסמונת או מחלה גנטית באמצעות חקר מבנה חלבון הקשור למחלה. בהקשר זה התלמידים השתמשו בתוכנת VMD כדי לצפות ולערוך מניפולציות על מודל מולקולרי של חלבון שנשלף ממאגר המידע PDB. התלמידים והמורים העידו על עניין הנוצר בעקבות השימוש בתוכנה, ותלמידים הראו שיפור בידע אודות טבעם של מודלים. עם זאת החוקרים לא דיווחו על שינוי בידע המושגי של התלמידים אודות חלבונים. הוראה ולמידה אודות חלבונים במסגרת שעורי כימיה או ביולוגיה בתיכון מלווה באופן תדיר בשימוש במשאבים לימודיים המתבססים על צפייה של תלמידים במודלים מולקולריים כדרך לקדם רכישת ידע ביוכימי, בעיקר אודות מבנה ותפקוד של חלבונים. להלן שלוש דוגמאות למשאבים לימודיים: (א) פרוטאופדיה היא סביבה שבה התלמידים יכולים לצפות במגוון מבנים של חלבונים. המודלים המולקולריים מוטמעים בערכים מילוניים. הקלקה על קישור טקסטואלי משנה את תצוגת המודל המולקולרי על פי המאפיינים המבניים המתוארים בטקסט המקושר (Hodis et al., 2008); (ב) מולקולת החודש היא מיזם של מאגר המידע PDB. בכל חודש מתווסף ערך חדש העוסק במבנה ותפקוד של חלבון אחד (Goodsell et al., 2015). כל ערך מלווה בתצוגות של מודלים מולקולריים אשר מבהירות את עקרונות המבנה והתפקוד של כל חלבון; (ג) Molecular Workbench (Xie et al., 2011) הוא מיזם הכולל מספר רב של פעילויות ללמידה והוראה, ביניהם פעילויות שבהם ניתן להשתמש ביישום למידול מולקולרי. בפעילויות אלה התלמיד לוחץ על קישורים המשנים את תצוגת המולקולרי המוצג ביישום למידול מולקולרי המוטמע

בדף. במהלך הפעילות התלמיד עונה על שאלות המלוות את השימוש ביישום. שלושת המשאבים מקדמים צפייה במודל מולקולרי אך אינם מקדמים שימוש באפשרויות תוכנה למידול מולקולרי. בעבודה זו נטען כי השימוש באפשרויות התוכנה הוא הידע הפרוצדורלי המאפיין את הפעילות המדעית, ובהקשר זה נבחנת פעילות התלמידים בהמשך.

4.3 ידע אפיסטמי אודות מודלים מולקולריים

כאמור, ידע מדעי (Scientific knowledge) מסווג לשלושה מרכיבים: ידע תוכני (Content knowledge), ידע פרוצדורלי (Procedural knowledge) וידע אפיסטמי (Epistemic knowledge). בתת פרק זה יוצג הידע האפיסטמי בהקשר למודלים מולקולריים של חלבונים.

תיאור המבנה של חומצות הגרעין או של חלבון מסוים עשוי לשמש כ'מודל' של מודלים מדעיים. כך לדגמה, אחד הסמנים המרכזיים למהפכה המדעית אשר הניחה את היסודות לביולוגיה המולקולרית באמצע המאה שעברה, היה גילוי מבנה ה-DNA אשר יחד אתו נבנה והוצג מודל קונקרטי של מולקולת DNA, על ידי Crick ו-Watson. המודל המולקולרי שהוצג על ידם נתפס כהוכחה לגילוי מבנה ה-DNA, וזאת על אף שהגישה הניסויית שננקטה, והתצלומים שהופקו כממצאים, הגיעו מתוך שימוש בטכניקת הקריסטלוגרפיה בקרני X כמקור להוכחה. מכאן, חשיבות המודל להצגת ההוכחה מלמדת על מרכזיותו של המודל המדעי בפעילות המדעית (Evagorou et al., 2015). עדיין, מסגרות תאורטיות המציגות קריטריונים להיבטים אפיסטמולוגיים של מודלים מדעיים, אינם מבחינות בין מודלים מדעיים שונים, אלא מפתחות רשימות גנריות של קריטריונים למודל מדעי (e.g., Schwarz & White, 2005). למרות זאת, מודל מולקולרי של חומצות גרעין או של חלבון מסוים הוא מקרה פרטי של מודל מדעי. ניתן להחיל את ארבעת העקרונות העומדים מאחורי החשיבה המדעית אודות מודלים ומידול מדעי שתוארו על ידי Schwarz & White (2005) על המקרה הפרטי של המודלים המולקולריים המוצגים בתוכנות למידול מולקולרי. כל אחד מהקריטריונים כולל מענה לשאלות שיוצגו במסגרת הקריטריונים, כמתואר למטה:

1. ידיעת טבעם של המודלים – כמענה לשאלות כגון "מהו מודל?" ו-"מה מודל מייצג?" על לומדים להבין כי בפניהם מוצג מודל. מקורו של המודל המולקולרי המוצג בפניהם הוא במידע ניסויי ויש להבין כשלב מחשבתי ראשון, שהמודל המולקולרי הוא תוצר של מידע ניסויי שהתקבל עבור צבר של מולקולות חלבון. כלומר, שהמודל המולקולרי הוא אלמנט המקור (Source) לרכישת ידע אודות אלמנט המטרה (Target) שהוא החלבון במציאות (Duit & Glynn, 1995). התצוגות המולקולריות אינן נראות כפי שמולקולות חלבון נראות במציאות, מכיוון שהפרדה בין מולקולות בודדות בתחום אורכי הגל הנראה אינה אפשרית (Cohlberg, 2017). על כן המידע הניסויי מתאר היכן במרחב נמצא כל אטום במבנה המולקולרי ותצוגות מולקולריות כגון מבנה שניוני, ממלא-מרחב או כדורים ומקלות אינן באות לשקף את המראה של אלמנט המטרה (Target) אלא רק מאפיינים מבניים המבהירים את תכונותיו של החלבון.
2. ידיעת טבעו של תהליך המידול – כדי לענות על שאלות כגון "מה מתרחש בתהליך המידול?" או "איך מודלים נבנים?" תהליך המידול נערך מהשלב שבו התקבלה החלטה על ידי קבוצת מדענים לקבוע מבנה של מולקולה מסוימת ועד השלב שבו הם מוסרים קובץ מבני למאגר מידע למבני חלבונים PDB. תהליך

המידול נסתר מעיניהם של לומדים אשר משתמשים בקובץ נתונים המוצג חזותית בתוכנה למידול מולקולרי. לדוגמה, מבני ידע הקשורים לאתגרים שעומדים בפני חוקרים המעוניינים לגבש התארגנויות מולקולריות כגון ריבוזומים כדי לקבוע את המבנה שלהם (Yonath, 2012) או השפעת המגבלות שמקורם בשיטת הקריסטלוגרפיה או בהתפזרות של קרינת X על נוכחותם של אטומים בודדים או קבוצות של אטומים במבנה שנקבע (Cohlberg, 2017) אינם חלק מההתנסות של לומדי ביוכימיה שאינם מתנסים בפרקטיקה המדעית האתנטית של קביעת מבני חלבונים. אף על פי כן הלומדים שולפים את הנתונים הניסיוניים מדפי מידע במאגר המידע ומציגים את המידע בתוכנה למידול מולקולרי וכך יכולים לרכוש ידע אפיסטמי חלקי על תהליך המידול על פי ההקשר שניתן להם.

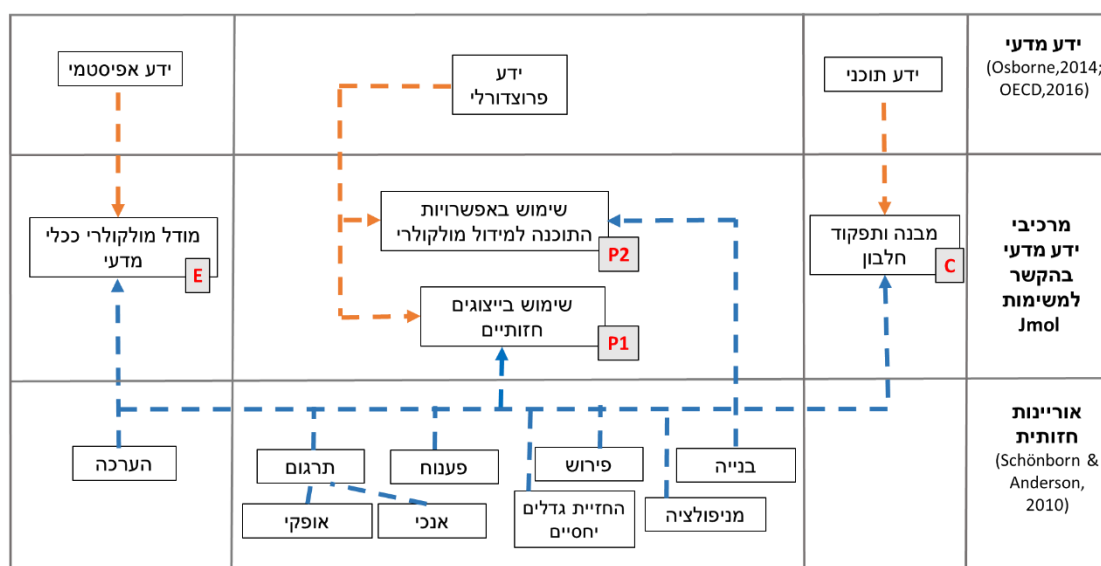
3. הערכת מודלים – במסגרת הניסיון לתאר את טבעה של האוריינות החזותית שעל לומד לרכוש בכימיה, Schönborn & Anderson (2010), מציפים את השאלות שהעלו Schwarz & White (2005) כגון "האם יש דרך להחליט האם מודל אחד עדיף על פני אחר, וכיצד?" וכן "באילו קריטריונים משתמשים כדי להעריך מודל?". ספרי הדרכה לשימוש בתוכנות למידול מולקולרי (e.g., Cohlberg, 2017) מייצרים הזדמנויות לתרגול הלומדים בשימוש בתוכנה וכך מספקים להם הזדמנויות להעריך את תצוגת המודל המולקולרי בהשוואה לתצוגה אחרת.

4. ידע אודות חשיבות המודל ו/או מודלים רבים – כמענה לשאלות כגון "כיצד מודלים עשויים להיות מועילים למדענים או ללומדים?" או "מהי המטרה של שימוש במודלים מרובים של אותו אובייקט?" ניתן להעלות על נס את תרומת המודלים המולקולריים למדענים, כגון הכנת והצגת המודל המולקולרי של ה-DNA על ידי Crick ו-Watson או התרומה להבנה המנגנונית שסיפקו המודלים המולקולריים להבנת תפקודם של ריבוזומים בתהליך התרגום. תהליך המידול שסופו שימוש במודלים מולקולריים מספק למדענים את המטרה שלשמה ביצעו את התהליך המחקרי: הסברים וניבוי של מבנים, מנגנונים או תופעות הקשורים לחלבונים הנחקרים (Evagorou et al., 2015).

לא נמצאה ספרות נוספת הייחודית להיבטים אפיסטמולוגיים של מודלים מולקולריים בביוכימיה, ועל כן נסקר השימוש בתוכנות למידול מולקולרי של מבני חלבונים מתוך השקפה אפיסטמולוגית-גנרית אודות מודלים מדעיים (Schwarz & White, 2005). הגדרת מבנים אפיסטמיים של שימוש במודלים מולקולריים המודגשים בתכני משימות Jmol תוצג בתת הפרק הבא כחלק מהמסגרת המושגית.

5 ניסוח מסגרת מושגית העולה מהסקירה הספרותית ומיועדת לניתוח ממצאים

לצורך המחקר נוסחה מסגרת מושגית שבה משולבות שתי מסגרות תיאורטיות (OECD, 2016; Osborne, 2014a; Schönborn & Anderson, 2010) שתוארו בתת פרק 4 לכדי מסגרת מושגית אחת המתאימה לאפיון משימות Jmol ולתיאור למידה ותפיסות תלמידים ומורים בהקשר לרכישת ידע מדעי אודות חלבונים (איור 1). המסגרת המושגית עברה בחלוף הזמן שינויים והתחדדה לאור ממצאי המחקר. המסגרת המושגית המופיעה כאן מיועדת לאפיון מידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון מותאמת גם למידול מולקולרי של חלבונים על ידי מומחים בביוכימיה, וזאת מכיוון שמטרת ניסוח המסגרת היא לקדם למידה של תלמידי תיכון. ניתן להחיל את המסגרת המושגית על שימוש בתוכנות למידול מולקולרי כ-Jmol, PyMOL, UCSF-Chimera ועוד. המסגרת המושגית מבחינה בין ארבעה מרכיבי ידע, המאפיינים שימוש של תלמידים ב-Jmol.



איור 1: מסגרת מושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון. באמצעות המסגרת המושגית ניתן לאפיין משימות Jmol ממוחשבות ואת השימוש בהן כדרך לרכישת ידע מדעי אודות חלבונים. ארבעת מרכיבי הידע המוחזנים במשימות Jmol מופיעים בחלקו האמצעי של התרשים, ונוסחו לאור שתי המסגרות התיאורטיות שנבחרו למחקר: (Osborne, 2014; OECD, 2016; Schönborn & Anderson, 2010). ארבעת מרכיבי הידע מסומלים באותיות אדומות באנגלית: P1, P2, C ו-E. חצים בצבעים שונים מסמנים קשרים בין המסגרת התיאורטית למרכיבי הידע

מרכיב הידע הראשון הוא ידע תוכני אודות מבנה ותפקוד חלבון (C). הוא כולל ידע אודות מבנים שונים בחלבון כדוגמת מבנה ראשוני או שניוני, ידע אודות מרכיבים במולקולה כדוגמת אטומים שונים או אטומי יונים בליבת המולקולה, ידע אודות קשרים כימיים כדוגמת קשרים פפטידיים או קשרי מימן וידע אודות תפקוד המרכיבים או הקשרים כגון חשיבותן של חומצות אמינו החיוניות לאתר פעיל או חשיבותם של הקו-פקטורים המזרזים תגובה כימית או מייצבים את מבנה החלבון.

מרכיב הידע השני הוא ידע פרוצדורלי המאפשר שימוש בייצוגים חזותיים (P1) שבמודל המולקולרי. מערכת הסמלים המופיעה בייצוגים החזותיים כוללת לדוגמה כדורים, מקלות, סלילים, גדילים ומשטחים,

צבעים מוסכמים המתארים את האובייקטים המוצגים ועוד. השימוש בייצוגים החזותיים כולל את רוב המיומנויות הקוגניטיביות החיוניות לשימוש יעיל בייצוגים החזותיים במודל המולקולרי, להוציא את מיומנות הערכת המודל ומיומנות בניית המודל המולקולרי, הדורשים גם שני מרכיבי ידע נוספים שיתוארו להלן.

מרכיב הידע השלישי הוא ידע פרוצדורלי המאפשר שימוש באפשרויות התוכנה (P2) והוא כולל בין שאר את היכולת לערוך שינויים בתצוגת המודל המולקולרי בהתאם לצורכי המשתמש. המיומנות הקוגניטיבית המתארת מרכיב ידע זה היא 'בנייה'. כפי שצוין בפרק הקונטקסט למחקר, התלמידים השתמשו רק באפשרויות בסיסיות על פי תכנון מוקדם של המשימות, אלה מתוארות בפרק הקונטקסט למחקר.

המסגרת המושגית חושפת הבחנה תיאורטית בין שתי הפרוצדורות: P1 ו-P2. הבחנה זו מבהירה באופן קוהרנטי מטרות מובחנות בהוראת הנושא, היבטים בלמידה וכן תפיסות תלמידים ומורים.

מרכיב הידע הרביעי הוא ידע אפיסטמי אודות מודלים מולקולריים ככלי מדעי (E). מרכיב ידע זה כולל מבנים אפיסטמיים שמנחים את המדענים המשתמשים במודלים מולקולריים. המיומנות הקוגניטיבית המתארת מרכיב ידע זה היא 'הערכה'. במחקר זה זוהו ארבעה מבנים אפיסטמיים שהודגשו בתכני משימות Jmol והם: (1) ההבנה שהמודל המולקולרי הוא רק מודל ואינו 'הדבר עצמו'; (2) עצם ההבנה שמקורם של המודלים המולקולריים במידע ניסויי; (3) ההבנה שתצוגות שונות מציגות תכונות שונות של מולקולות חלבון; (4) ההבנה שתצוגות המודל המולקולרי אינן נראות בהכרח כפי שמולקולות חלבון נראות במציאות אלא רק מתארות תכונות שלהם. רכישת ידע אפיסטמי אודות מודלים מוגבלת במחקר הנוכחי לארבעת המבנים האלו.

כדי להדגים את נוכחותם של ארבעת מרכיבי הידע E, P1, P2 ו-E במידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים, אציג דוגמה אחת מתוך ספר המדריך סטודנטים בהשכלה הגבוהה להשתמש ב-Jmol. להלן תרגום פסקה אחת מתוך המדריך:

"כדי לראות קשרי מימן (H-bonds) הקלידו **hbonds calculate**⁹. פקודה זו מכוונת את התוכנה לזהות כל זוג מימני NH וחמצני CO של שלד השרשרת (השייכים לאטומים שנבחרו נכון לעכשיו) אשר קרובים מספיק כדי להרשות יצירת קשרי מימן. קשרי המימן אשר מערבים שייכים מחומצות אמינו ממעטפת הקפלים (בטא) יופיעו כקווים מרוסקים. אך מכיוון שקשרי מימן המחברים בין חנקני אמיד לחמצני קרבוניל אינם בפני עצמם חלק משלד השרשרת, הם נראים כאילו הם צפים בחלל. כדי לתקן את זה, הקלידו **set hbonds backbone**. אתם יכולים לגרום לקשרי המימן להיות עבים יותר על ידי הקלדת **hbonds 20**. אם אתם רוצים לשנות את צבעם, הקלידו **color hbonds green**. קשה מעט להבחין בהם כנגד הרקע השחור, על כן הקלידו **background white**. שימו לב כיצד קשרי מימן רצים אנכית לגדילים של מעטפת קפלי בטא ושוכבים על פני המישור של מעטפת הקפלים, כאשר קשרי המימן בסליל הם במקביל לציר הסליל"

(Cohlberg, 2017, p. 21)

⁹ הפקודות הנכתבות בלוח הבקרה בתוכנת Jmol מודגשות במקור.

פסקה זו לקוחה מתוך הפרק הראשון של אחד מהמדריכים הכתובים ללמידת Jmol (Cohlberg, 2017). המדריך מקפיד ללוות את הסטודנט עקב לצד אגודל בהתמחות שלו בשימוש ב-Jmol והוא כולל גם שאלות מלוות (שאינן מוצגות כאן). הפסקה המופיעה לעיל מייצגת את מטרת המדריך והיא לקדם סטודנטים להשתמש באופן מיטבי בתוכנה. הפסקה מדגימה כיצד ארבעת מרכיבי הידע מופיעים בה במפורש או באופן מרומוז והם מתכנסים יחדיו בפסקה אחת. על פניו, נראה כי הפסקה מיועדת ללמד את הסטודנט לתסרט (script) ב-Jmol באמצעות שימוש בפקודות אותם על הסטודנט להקליד בלוח הבקרה של התוכנה, וטקסטים מודגשים במדריך מוכיחים את מטרתו העיקרית (ידע פרוצדורלי P2). עם זאת, לא ניתן להתעלם מנוכחותם של מרכיבי ידע נוספים בדוגמה. בפסקה המובאת כאן, Cohlberg מנחה את הסטודנטים לפענח ייצוגים חזותיים ומעודד אותם להשתמש במניפולציה מנטלית תוך כדי צפייה במודל. על כן, מניסוח הפסקה עולה כי ישנו שילוב של מידע אודות ידע פרוצדורלי של שימוש באפשרויות התוכנה (P2) עם מידע אודות ידע פרוצדורלי של שימוש בייצוגים חזותיים (P1). בנוסף, Cohlberg מבקש מהסטודנט להעריך את המודל המולקולרי מתוך הבנה שישנה חוסר הלימה בין ידע תוכני בו מחזיק הסטודנט אודות קשרי מימן, לבין הייצוג של קשרי מימן במודל המולקולרי אשר "צף בחלל". כך הסטודנט נדרש לידע אפיסטמי אודות התצוגה ומגבלות המודל (E). בפסקה שצוטטה, שני סוגי הידע הפרוצדורלי משתלבים עם הידע האפיסטמי E, ומתבססים על הבנה תכנית של קשרי מימן ומבנה כימי של שרשרת פוליפפטידית (C). בפסקה המצוטטת מרכיבי הידע משתלבים יחדיו ומדגימים כיצד באה לידי ביטוי המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים (איור 1).

לסיכום, ארבעה מרכיבי ידע זוהו בהקשר של משימות Jmol ממוחשבות ושימוש בהן כדרך לרכישת ידע מדעי אודות חלבונים: C, P1, P2 ו-E. ארבעת המרכיבים בונים את המסגרת המושגית, אשר מסייעת בניתוח נתונים במחקר זה.

-שאלות מחקר-

מטרת העל היא חקר הלמידה של תלמידי תיכון המשתמשים בתוכנה למידול מולקולרי באמצעות משימות מסביבת הלמידה "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה". התוכנה למידול מולקולרי שבה משתמשים תלמידים היא Jmol. המחקר מתמקד באפיון משימות Jmol ממוחשבות מתוך הסביבה, בהישגי הלומדים, בחקר הלמידה ובבחינת תפיסות התלמידים והמורים את השימוש ב-Jmol.

מטרה 1:

שימוש במסגרת מושגית למידול מולקולרי של תלמידי תיכון לצורך אפיון משימות Jmol ממוחשבות מסביבת הלמידה "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה".

שאלת המחקר:

1) כיצד מיוצגים מרכיבי הידע שאותם מצופה מהתלמיד לרכוש או להשתמש, בשאלות ובקטעי המידע המופיעים בתכני שתי משימות Jmol ובאיזו מידה הם מיוצגים?

מטרה 2:

בחינת שימוש של תלמידים בתוכנת Jmol למידול מולקולרי של חלבונים בתיווך משימות ממוחשבות. **תת מטרה א':** בחינת הישגי לומדים ואפיון תהליכי למידה של משתמשי המשימות הממוחשבות של Jmol בסביבת הלמידה.

תת מטרה ב': בחינת ההבדלים בהישגי לומדים משתי קבוצות הנבדלות ביניהן בפרויקט-החקר ובחינת ההבדלים בתהליכי הלמידה שלהם בהקשר לשימוש במשימות הממוחשבות של Jmol בסביבת הלמידה.

שאלות המחקר:

2) האם בעקבות השימוש במשימות הממוחשבות של Jmol חל שינוי בידע הלומדים אודות חלבונים? (תת מטרה א')

3) האם ישנם הבדלים בהישגי שתי קבוצות לומדים, הנבדלים בניהם בפרויקט החקר, לאור השימוש במשימות הממוחשבות של Jmol? (תת מטרה ב')

4) האם שני זוגות תלמידות המשתמשות ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות, רוכשות ידע מדעי אודות חלבונים במהלך השיח שהן מקיימות? כיצד ומדוע? (תת-מטרות א' ו- ב')

מטרה 3:

בחינת תפיסות תלמידים ומורים על למידה אודות חלבונים באמצעות השימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות.

שאלות המחקר:

5) כיצד תופסים תלמידים את Jmol בהשוואה לכלים ביואינפורמטיים אחרים שבהם התנסו, במסגרת הלימודים במגמת מערכות ביוטכנולוגיות?

6) מהן תפיסות תלמידים על תרומתם היחסית של מרכיבי הידע הפרוצדורלי הנדרשים ללמידה אודות חלבונים במהלך השימוש ב-Jmol?

7) מהן תפיסות תלמידים על האתגר בלמידה אודות חלבונים לאור השימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות?

8) מהן תפיסות מורים על למידה אודות חלבונים באמצעות השימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות?

-קונטקסט למחקר-

1. הוראת ביואינפורמטיקה בבתי ספר תיכוניים בישראל

ביואינפורמטיקה משלבת מחקר, פיתוח ויישום של כלים חישוביים וגישות המרחיבות את השימוש בנתונים ביולוגיים ובין השאר עוסקת בפעילות של אחסון, ניתוח והמחשה של נתונים ביולוגיים באמצעות מאגרי מידע וכלים ביואינפורמטיים (Huerta et al., 2000). בסוף העשור הקודם, החל שיתוף פעולה פורה בין הפיקוח על הוראת ביוטכנולוגיה במשרד החינוך לבין המחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע, שבעקבותיו נכתבו חומרי למידה בביואינפורמטיקה עבור תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות בתיכון. חומרי הלמידה קובצו לסביבת הלמידה "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה" המשמשת כאמצעי להוראה ולמידה של ביואינפורמטיקה עבור תלמידי המגמה. בנוסף, נקבעו סטנדרטים ומטרות מוגדרות להוראת הנושא, פותחו חומרי הוראה התומכים בהוראה מגוונת של הנושא וכן הופעלה תוכנית הכשרה מעמיקה למורים, שרובם ככולם היו חסרי ניסיון בהוראת ביואינפורמטיקה (מחלוף, אברהם וירדן, 2013).

בשנת 2014 הפכה תכנית הלימודים למחייבת עבור כל תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות (Israeli Ministry of Education, 2017). תוכנית הלימודים בביואינפורמטיקה מפורטת בנספח 1. הכלים הביואינפורמטיים ששימוש בהם מתחייב מתוך תכנית הלימודים, ועבורן פותחו משימות למידה שהוטמעו בסביבת הלמידה הם: ENTREZ, Clustal Omega, Nucleotide BLAST, Protein BLAST, Jmol, ORF-Finder ו-Primer 3+. כל הכלים נמצאים בשימוש נרחב במחקר הביולוגי. בתחילת כל שנת לימודים, צוות הממונה מטעם הפיקוח על הוראת הביוטכנולוגיה בוחר מתוך הרשימה חמישה כלים ביואינפורמטיים המיועדים להילמד באותה השנה. במהלך כיתה י"א וי"ב, התלמידים לומדים להשתמש בכלים באמצעות משימות מבוססות-חקר, שהן המרכיב במרכזי בסביבת הלמידה. בתיווך המשימות, תלמידים שולפים ממאגרי נתונים רצפי חומצות גרעין ורצפי ומבני חלבונים ומשתמשים בכלים הביואינפורמטיים כדי לפענח, לפרש ולהמחיש מידע המתקבל מהנתונים הביולוגיים הנמצאים במאגרים. עם סיום שנת הלימודים מוערכים כל תלמידי המגמה באמצעות מבחן ממוחשב כחלק מבחינת הבגרות במערכות ביוטכנולוגיות. נושא הביואינפורמטיקה משתלב בבחינה יחד עם פרקים בנושאי התוכן: הנדסה גנטית, תרביות תאים ואימונו-דיאגנוסטיקה. משימת ההערכה הביואינפורמטית שאותה מקבלים התלמידים במהלך בחינת הבגרות מתבססת על התכנים שמופיעים במשימות הנמצאות בסביבת הלמידה, ודורשת מהתלמידים להשתמש באופן יעיל בכלים הביואינפורמטיים ובמאגרי המידע ולקדם פתרון לסוגיה אותנטית באמצעותם.

בנוסף למשימות, סביבת הלמידה מספקת למשתמשים מבוא ביולוגי, ביואינפורמטי, ביוטכנולוגי ואבולוציוני, וכן סרטוני הדרכה לשימוש מועיל במגוון הכלים, מילון מונחים המקושר למשימות, מדריך למורה ועוד. מבנה סביבת הלמידה תואר בהרחבה במקום אחר (Machluf, Gelbart, Ben-Dor, & Yarden, 2017; Yarden, 2017; Machluf & Yarden, 2013).

המשימות מבוססות-חקר וכוללות שאלות פתוחות וסגורות, קטעי מידע, איורים ותצלומי מסך. המשימות מפגישות את התלמידים עם הכלים הביזיאנפורמטיים ועם מאגרי מידע. ומספקות להם אפשרות להתנסות

בגישה ביואינפורמטית כדי לקדם פתרון בעיות אותנטיות. המשימות בליבת סביבת הלמידה פותחו על פי עקרונות העיצוב הבאים: (1) אותנטיות: עידוד התלמידים לשימוש בכלים ביואינפורמטיים ומאגרי מידע כדי להכיר פעילות מדעית אותנטית; (2) אינטגרציה: התאמת התכנים במשימות לתכנים אחרים המופיעים בפרקים שונים בתוכנית הלימודים במערכות ביוטכנולוגיות, כדוגמת שיטות בהנדסה גנטית וכן עקרונות בביולוגיה מולקולרית וביוכימיה; (3) הקשר: חשיפת התלמידים לנושאי מחקר חדשניים ולסיפורי מסגרת אטרקטיביים המשלבים יישומים ביוטכנולוגיים כדי לחשוף את התלמידים לגישה חוקרת ולפתרון בעיות. בתחילת כל משימה מוצג סיפור המסגרת ומתוארת בהבלטה האסטרטגיה המחקרית הכוללת שימוש בכלי או במספר כלים ביואינפורמטיים (מחלוף וחובריו, 2013; Machluf & Yarden, 2013).

ניתן למיין משימות מבוססות-חקר אשר מצויות בסביבת הלמידה לשני סוגים על פי מספר הכלים הביואינפורמטיים שבהם יש להשתמש כדי לפתור את הבעיה המחקרית המוצגת בהן: (1) משימות רב-שלביות אשר מחולקות למספר תתי-משימות. כל תת-משימה מקדמת את המחקר ומתווכת שימוש בכלי ביואינפורמטי אחד. במשימות אלו משתמשים התלמידים בשניים עד ארבעה כלים ביואינפורמטיים; (2) משימות חד-שלביות שבהן נעשה שימוש בכלי ביואינפורמטי אחד עבור פתרון הבעיה המחקרית (רשימת המשימות הנמצאות בסביבה 'ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה' מפורטת בנספח 2).

סביבת הלמידה פותחה ותוחזקה על ידי המחלקה להוראת המדעים עד שנת 2015. מרבית התכנים ובכללם משימות 1 עד 5 המופיעות בנספח 2, הועברו מאז על ידי משרד החינוך לפלטפורמת Moodle (Modular object-oriented dynamic learning environment) אשר מתוחזקת ומנוהלת על ידי משרד החינוך. פלטפורמה זו זמינה לתלמידים ולמורים ממגמת מערכות ביוטכנולוגיות אך סגורה עבור כל משתמש אחר. משימות 6 עד 10 המופיעות בנספח 2 שובצו בסביבת למידה ייעודית אחרת אשר הוטמעה בקורס בפלטפורמת Moodle של המחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע. בשתיים ממשימות מבוססות-חקר אלו, אשר כוללות שימוש בתוכנת Jmol נעשה שימוש במחקר זה. המשימות נקראות בקצרה "משימות Jmol ממוחשבות", ועל כך בשתי תת-הפרקים הבאים.

2. תוכנת Jmol והשימוש באפשרויות התוכנה

תוכנת Jmol למידול מולקולרי של מבני חלבונים היא תוכנת קוד-פתוח מבוססת Java (<http://www.jmol.org/>) המאפשרת צפייה במבנים מולקולריים בתלת-ממד. קיימת גרסת רשת לתוכנה הנקראת JSmol, המבוססת על HTML5 ומאפשרת למפתחים להטמיע אותה בדפי רשת. התוכנה מתעדכנת מעת לעת וקיימים מספר מדריכים לשימוש בה. מפתחים ומשתמשים מובילים אחראים לפיתוח ותחזוק התוכנה, וניתן לקבל מידע נוסף על תוכנת Jmol ועל JSmol בדף הבית של קהילת Jmol השיתופית (http://wiki.jmol.org/index.php/Main_Page). בדף הבית של הקהילה ישנם קישורים למדריכים המלמדים כיצד להשתמש בתוכנת Jmol. דוגמה למדריך מקיף וידידותי הוא המדריך של Cholberg (2017) המיועד לסטודנטים בהשכלה הגבוהה. המידע המופיע במדריך מסווג לפרקים הנוגעים לשימוש רחב בתוכנה בהקשרים של מבנה ותפקוד של חלבונים שונים. עבור תלמידים המשתמשים בתוכנה כחלק מלימודי הביואינפורמטיקה בישראל, נדרש ידע מצומצם באופן ניכר מהידע הניתן במדריך של Cholberg.

התלמידים נדרשים להראות שליטה באפשרויות בסיסיות של תוכנת Jmol. דרישות השימוש באפשרויות התוכנה עבור תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות בישראל מפורטות להלן:

(א) **הצגת מודל תלת ממדי:** כדי להציג מודל תלת-ממדי, התלמידים שולפים קובץ מבני שמקורו במאגר המידע למבני החלבונים Protein Data Bank, באמצעות הזנת קוד מזהה (PDB ID) המכיל ארבעה תווים, בחלונית החיפוש "Get PDB" ב-Jmol. לחילופין ישנו הסבר במשימות כיצד ניתן להוריד למחשב המשתמש קובץ בפורמט PDB ממאגר המידע, ולהזין אותו בתוכנה. בפועל, תלמידים בוחרים באפשרות הראשונה הפשוטה יותר ואינם מורידים את הקבצים המבניים למחשב.

(ב) **בחירת המודל מנקודות מבט שונות:** התלמידים מסובבים את המודל, מזיזים, מקטינים ומגדילים את התצוגה המבנית של מודל החלבון. ניתן לבצע את הפעולות השונות באמצעות שימוש בעכבר, חוץ מסיבוב על ציר יחיד או הסעת המודל שעבורן התלמידים נדרשים גם לשימוש במקלדת.

(ג) **בחירת המודל בתצוגות מרחביות שונות באמצעות סרגל תפריטים:** התלמידים יכולים לשנות את תצוגת המודל של מבנה החלבון באמצעות ניווט בסרגל התפריטים שאליו מגיעים מתוך לחיצה על המקש הימני בעכבר. מגוון התצוגות כולל כדורים ומקלות, מודל ממלא מרחב (CPK-Space fill), מבנה שניוני (Cartoon) ותצוגות נוספות.

(ד) **בחירת מרכיבים ספציפיים במודל באמצעות סרגל תפריטים או באמצעות כתיבת תסריט (Scripting) בלוח בקרה:** בתהליך דו-שלבי, התלמידים בוחרים מרכיבים מסוימים בתצוגה, כגון אטומים של יסודות שונים, חומצות אמיניות או תת-יחידות. לאחר מכן, הם מציגים את המרכיב הנבחר באמצעות תצוגות שונות כגון תצוגת קשרים או אטומים. בחירת המרכיבים מתבצעת בשני דרכים: הראשונה היא באמצעות שימוש בסרגל התפריטים. החיסרון בדרך זו היא שאפשרויות הבחירה בסרגל התפריטים הן מוגבלות מאוד ומאוד בסיסיות. הדרך השנייה היא שימוש בלוח הבקרה (Console) כדי לכתוב תסריט בחלון הנפתח. למעשה, מומחי Jmol משתמשים במגוון רחב של פקודות לכתיבת תסריטים, כדי לגרום למניפולציה של המודל המולקולרי (מגוון הפקודות בקישור: <https://chemapps.stolaf.edu/jmol/docs/>). במשימות Jmol התלמידים מתבקשים לנסח אך ורק פקודות Select.

(ה) **קבלת מידע ספציפי אודות מרכיבי המודל:** התלמידים מזהים מרכיבים במודל, כגון שם של חומצה אמינית או אטום באמצעות השהיית ציין העכבר על אטום אחד במודל וקבלת מידע עליו מתוך חלונית מידע קופצת המופיעה בסמוך לתצוגת האטום.

לצפייה בסרטון הדרכה, המתאר את עקרונות השימוש בתוכנת Jmol הנדרשות מתלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות בישראל, ניתן לצפות במדריך מצולם המוצג בסרטון בקישור הבא:

<https://www.youtube.com/watch?v=I62XdiYTjzU>

3. משימות Jmol ממוחשבות

במסגרת המענה על משימות מבוססות-חקר (נספח 2) התומכות בשימוש ב-Jmol התלמידים אינם נדרשים לחקור באופן עצמאי מולקולות חלבון, אלא מקבלים הנחיות מפורטות כיצד להשתמש באפשרויות התוכנה של Jmol. טרמינולוגיה של 'חקר' עשויה להיות מבלבלת בהקשר של משימות Jmol. המונח מוצג לתלמידים

בתחילת המשימה, אך משמעות החקר בהקשר זה היא למידה אודות מבנה ותפקוד החלבון במשימה באמצעות מודל מולקולרי של החלבון ושימוש בתוכנת Jmol.

חשוב לציין כי במהלך ביצוע המשימות ישנם מספר נקודות צומת (המלוות בשאלות מנחות) שבהם התלמידים נדרשים להחליט כיצד להשתמש באפשרויות התוכנה. במידה והם משתמשים באפשרויות Jmol באופן המוביל אותם לתצוגה לא רצויה, או שאינם מצליחים לבצע שינוי בתצוגה, הם מגלים את הטעות דרך משוב חזותי המופיע במשימה. המשוב הוא תצלום מסך של תצוגת מבנה חלבון המוטמע במשימה. השוואת התצוגה הסטטית עם התצוגה שאותה התבקשו להציג ב-Jmol מבהירה האם השתמשו באפשרויות Jmol באופן נכון. במידה והתלמידים מחליטים להציג את החלבון בתצוגות שאינן נמצאות בהלימה למתווה הפעילות, הם לא יוכלו להמשיך את המענה על המשימה, אלא יהיו חייבים להשתמש באפשרויות התוכנה כך שיקבלו תצוגה ב-Jmol אשר זהה לתצוגה הסטטית במשימה. כלומר, העיקרון שעומד בבסיס השימוש באפשרויות התוכנה הוא שעל התלמידים להציג את המודל המולקולרי של מבנה החלבון על פי הוראות ידועות מראש. רק בהתאם לייצוגים החזותיים הרצויים להצגה מתאפשרת התפתחות ידע אודות החלבון הנחקר.

הטקסטים הנמצאים בתכני המשימות מתחלקים לאחד מהסוגים הבאים: (א) קטעי מידע; (ב) שאלות רבות ברירה או פתוחות. בהמשך, כמענה על שאלת המחקר הראשונה, יסווגו וינותחו שני סוגי הטקסטים במשימות.

עבור המחקר הנוכחי, נבחרו שתי משימות מרכזיות בהן משתמשים התלמידים ב-Jmol (תת-משימה במשימה 2 ומשימה 9, נספח 2). בסביבת הלמידה ישנן שתי תתי-משימות נוספות שבאמצעותם התלמידים משתמשים ב-Jmol (תתי-משימות במשימות 4 ו-5, נספח 2) אך מטרתן הייתה לחזור על תכנים משתי המשימות המרכזיות ועל כן הן הושמטו ממערך המחקר. שתי המשימות שנבחרו למחקר הועברו מסביבת הלמידה "ביואינפורמטיקה בשירות הביטכנולוגיה" אל פלטפורמת Moodle של המחלקה להוראת המדעים. שם הן שולבו כרכיב בוחן בקורס Moodle ייעודי למחקר. התוכן המלא של שתי המשימות מוצג בנספח 3 (כולל הפתרונות לשאלות הפתוחות והסגורות) וכן בגרסה מתורגמת לאנגלית באתר: <https://stwww2.weizmann.ac.il/bioinformatics/>. נושאי המשימות ומטרתן יתוארו להלן:

i. "מרוץ החימוש" היא משימה רב-שלבית, שבחלק האחרון בה תלמידים משתמשים ב-Jmol. לצורכי המחקר, הופרדה תת-המשימה הרביעית משאר חלקי המשימה ועובדה כמשימה נפרדת חד-שלבית אשר אינה דורשת את ביצוע שלושת החלקים הראשונים של "מרוץ החימוש", שבהם משתמשים התלמידים בכלים Nucleotide BLAST, Protein BLAST, ו-ORF-Finder. שינוי המשימה לחד-שלבית נועדה לאפשר למידה בהקשר של Jmol בלבד. במשימה זו התלמידים חוקרים את מבנה ותפקוד החלבון IPNS (isopenicillin N synthase) שמקורו בפטרייה *Aspergillus nidulans* (Burzlaff et al., 1999). IPNS מזרז ביוסינתזה של isopenicillin N (IPN) מתוך חומר המוצא δ -L-(α -Aminoadipoyl)-L-cysteinyll. התלמידים חוקרים את המבנה המרחבי של החלבון באמצעות מודל תלת-ממדי אשר המבנה שלו נקבע באמצעות גיבוש והקרנה בקרני X. הנתונים על מבנה החלבון נדלו מתוך מאגר המידע

Protein Data Bank (PDB) (קוד מזהה 1QJE). יחד עם מולקולת החלבון זוהה גם יון ברזל המשמש כקו-פקטור בתגובה האנזימטית. כמו כן זוהה הסובסטרט ACV והתוצר IPN. במשימת חקר זו, התלמידים מתבקשים להציג את הקו-פקטור, הסובסטרט, התוצר והחלבון במגוון דרכי תצוגה, ומדגישים את שלושת חומצות האמינו הקושרות את יון הברזל החיוני לפעילות הקטליטית. בסביבת הלמידה המקורית המשימה נקראת "יחסי מבנה ותפקוד בחלבון IPNS" ובעבודה זו תקרא בקיצור 'משימת IPNS'.

ii. "חלבונים נוגדי קיפאון" היא משימה חד-שלבית בה תלמידים משתמשים ב-Jmol. במשימה זו התלמידים חוקרים את מבנה החלבון Anti-Freezing Protein (AFP), שמקורו בחיידק האנטרקטי *Marinomonas primoryensis* (Garnham, Campbell, & Davies, 2011). המבנה המרחבי של החלבון מוצג באמצעות מודל תלת-ממדי אשר המבנה שלו נקבע באמצעות גיבוש והקרנה בקרני X. את הנתונים על מבנה החלבון התלמידים דולים מתוך המאגר PDB (קוד מזהה 3P4G). בנוסף למבנה החלבון, התלמידים מתבקשים להציג גם יוני סידן המייצבים את מבנה החלבון וכן מולקולות מים המקיפות את שטח הפנים החיצוני של החלבון. במשימת חקר זו התלמידים מציגים את המודל במגוון דרכי תצוגה, ומדגישים את השיירים הצדדיים של חומצות האמינו הנחוצות לקישור יוני הסידן. בסביבת הלמידה המשימה נקראת "חלבונים נוגדי קיפאון" ובעבודה זו תקרא בקיצור 'משימת AFP'.

בשתי המשימות ישנם שלושה מרכיבים: (1) שאלות סגורות ושאלות פתוחות. התלמידים מקבלים משוב ישירות לאחר מענה לשאלות סגורות. לאחר חלק מהשאלות הפתוחות מופיע מידע רלוונטי הרומז או מציין במפורש את התשובה הרצויה. בנוסף לשאלות, המשימות כוללות גם (2) קטעי מידע ו-(3) ייצוגים חזותיים המופיעים כאיורים, תצלומי מסך או טבלאות. הייצוגים החזותיים משתלבים בשאלות או בקטעי המידע ומיועדים לתמוך בלמידה. במשימת IPNS ישנן 19 שאלות ונספרו 25 קטעי מידע, ובמשימת AFP ישנן 19 שאלות ונספרו 20 קטעי מידע.

כאמור לעיל, בסוף שנת הלימודים התלמידים מקבלים בבחינת בגרות ממוחשבת משימת הערכה ביואינפורמטית אשר מתבססת על התכנים שמופיעים במשימות הנמצאות בסביבת הלמידה. משימת ההערכה נמסרת במערכת ממוחשבת לניהול בחינות iTest אשר שייכת למרכז לטכנולוגיות חינוכיות (מט"ח). כחלק ממשימת הערכה, מוטמע קובץ מבני של חלבון בגרסת הרשת JSmol. תלמידים משתמשים באפשרויות התוכנה ועונים על שאלות העוסקות במבנה ובתפקוד החלבון המוצג, שאלות העוסקות בייצוגים החזותיים וכן בשאלות העוסקות בשימוש בתוכנה.

-מתודולוגיה-

1. הגישה המתודולוגית

במחקר נבחן השימוש שתלמידי תיכון עושים בתוכנת Jmol המציגה מודלים מולקולריים של חלבונים בתלת-ממד, בתיווך משימות ממוחשבות. על כן, מושאי המחקר הן תכני המשימות (שאלת מחקר 1), התלמידים (שאלות מחקר 2-7), והמורים (שאלת מחקר 8). נכון לשנה שבה נאספו הנתונים אודות התלמידים (שנת הלימודים תשע"ו) בכשמונים בתי ספר נלמד נושא הביואינפורמטיקה במסגרת מגמת מערכות ביוטכנולוגיות ומורים בבתי ספר אלו לימדו את התלמידים להשתמש בתוכנה למידול מולקולרי Jmol כחלק מלימודי הביואינפורמטיקה. בסוף שנת הלימודים הוערכו התלמידים בבחינת בגרות ממוחשבת שבה הם השתמשו בגרסת הרשת JSmol. כמעט כל המורים שלימדו את הנושא עברו השתלמות מקדימה שבה הוכשרו ללמד את הנושא, ובין השאר התבקשו ללמד את הנושא באמצעות התנסות באותן משימות Jmol ממוחשבות שהמחקר התמקד בהן, כאסטרטגיית הוראה, למידה והערכת התלמידים.

מכיוון שהמחקר מתמקד בפרקטיקה כיתתית קיימת של שימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות כדרך ללמידה אודות חלבונים אזי המחקר מוגדר כמחקר הערכה (Johnson & Christensen, 2000) ולא כמחקר עיצוב. תרומתם של מחקרי הערכה לשדה החינוכי היא השפעתם על שיקולי הדעת של המורים בנוגע לאופי ההוראה וכן על פיתוח או שינוי חומרי למידה במטרה להיטיב את אופי הלמידה בקרב תלמידים המשתמשים בטכנולוגיות מעצמות למידה. על כן, אופי ההערכה של משימות Jmol הוא מעצב (Formative) ומסקנות המחקר עשויות להוביל לגיבוש המלצות הוראה עתידית וכן שיפור משימות קיימות ופיתוח משימות עתידיות שבהן משולבים מודלים מולקולריים של חלבונים ותוכנות למידול מולקולרי.

המחקר משלב כלים ושיטות מהפרדיגמה האיכותנית, לצד כלים ושיטות מהפרדיגמה הכמותית. הרציונל למתודולוגיה של שילוב שיטות (Mixed Methods) אשר מתבסס על המסגרת של Greene, Caracelli, and Graham (1989) מתבסס על ההנחות הבאות: (א) שילוב השיטות עשוי לבסס טריאנגולציה, כלומר התלכדות ואימות של תוצאות ומסקנות ומכאן הגברת התקפות של המחקר והקטנת ההטיה; (ב) שילוב שיטות עשוי לקדם השלמה, התפתחות והרחבה של מגוון התוצאות המתקבל. כך ניתן לענות על שאלות מחקר כמותיות באמצעות סטטיסטיקה היסקית לצד שאלות מחקר שהמענה עליהן מתקבל באמצעות עושר נתונים וניתוח איכותני; (ג) שילוב שיטות עשוי לקדם גילוי של פרדוקסים וסתירות מתוך תוצאות שנאספו באמצעות שיטות שונות.

תיאור מפורט של כלי המחקר האיכותניים והכמותיים בהם השתמשתי למענה על שאלות המחקר יופיע בהמשך הפרק, וסיכום כולל המאגד את כלי המחקר על פי שאלת המחקר מסוכם בטבלה 3 בהמשך הפרק, אך כן אציג בקצרה את הכלים

שיטות כמותיות: איסוף נתונים כמותי עבור שאלות המחקר 2-3 ו-5-7 נערך כפי שיפורט בהמשך בתת-פרק 2 וניתוח הממצאים בוצע באמצעות כלים של סטטיסטיקה תיאורית והיסקית. הכלים הסטטיסטיים שבהם השתמשתי בשאלות המחקר השונות הם מבחן t מזווג ולא מזווג (שאלות 2-3), MANOVA (שאלות

3-2), מבחן כי בריבוע (שאלה 6) וניתוח גורמים (שאלה 7). תוכן המבחנים ואופן ניתוחם יפורטו בהמשך פרק המתודולוגיה.

שיטות איכותניות: מלכתחילה, גישת המחקר האיכותנית לבחינת תהליכי הלמידה של הלומדים הייתה פנומנולוגית (Husserl, 2002). על פי גישה זו על החוקר לבחון תופעה שהיא שימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות. המטרה הייתה לבחון את ההתנסות של לומדים רבים ככל האפשר בשימוש ב-Jmol. עם זאת, ככל שהמחקר התקדם זוהתה מורכבות הלמידה אודות חלבונים תוך שימוש במשימות Jmol והגישה הפנומנולוגית נמצאה כלא מספקת כבר בשלב איסוף הנתונים. הצורך להצמצם ולהתמקד במספר קטן של מקרים הוביל לשינוי בגישת המחקר והוחלט להשתמש בגישת מחקר המתבססת על חקרי מקרה בודדים (Yin, 1994). ראשית, נערך ניתוח מדוקדק של תכני המשימות (שאלת מחקר 1). שנית, נבחרו שני זוגות של תלמידות אשר השתמשו ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות, ובאמצעות תצפיות וראיונות נבחן השיח שלהם במבט משווה לאחר ביצוע של ניתוח שיח מדוקדק ותיקוף הניתוח (שאלת מחקר 4). שיטת הניתוח הוורבאלי (Chi, 1997) בה נערך שימוש לניתוח הנתונים עבור מענה לשאלת מחקר 4, מותאמת לגישת מחקר זו. בדומה לגישה הפנומנולוגית, גם גישת חקרי המקרה מתמקדת בתופעות, ומאפייניה יפורטו להלן: (1) גישת חקרי המקרה רואה שאלות מחקר כגון "כיצד" ו-"מדוע" כלגיטימיות; (2) התופעה נבחנת בסביבה שבה לחוקר יש מעט מאוד שליטה על האירועים; ו-(3) התופעה נבחנת בהקשר של החיים האמיתיים (Yin, 1994). בנוסף, ישנם גורמים רבים המשפיעים על הנעשה בשיח הממוקד בחקרי המקרה והם נלקחים בחשבון. כמו כן, אפשר להשתמש במגוון שיטות לאיסוף נתונים בחקרי המקרה ועל כן ישנה לגיטימציה להוריד את מספר חקרי המקרה המנותחים למינימום (נותחו שני חקרי מקרה) כדי לא לפגוע באיכות המחקר. כמו כן, נבחנו תפיסות מורים על למידה אודות חלבונים באמצעות משימות Jmol (שאלה 9), באמצעות ניתוח ראיונות מבוססי-תוצר על פי שיטת הניתוח הוורבאלית (Chi, 1997).

2. משתתפי המחקר

אוכלוסיית המחקר כללה תלמידי מערכות ביוטכנולוגיות מכיתה י"א וי"ב (שאלות מחקר 3-5) וכן מסיימי כיתה י"ב (שאלות מחקר 6-8) מכל המגזרים (כ-80 בתי ספר). בנוסף נדגמו מורי מערכות ביוטכנולוגיות (שאלת מחקר 9). פירוט אודות המדגמים השונים יתואר להלן:

א. מדגם התלמידים שמלאו שאלוני ידע אודות חלבונים (שאלות מחקר 2 ו-3) כלל 70 תלמידי מערכות ביוטכנולוגיות, 36 בנים ו-34 בנות, מגיל 16.5 עד 17.5 מחמש כיתות. הנתונים נאספו מאמצע כיתה י"א ועד תחילת כיתה י"ב בחמישה בתי ספר מהמגזר היהודי ומהזרם הממלכתי בשנה"ל תשע"ו ובתחילת תשע"ז. איסוף הנתונים באחד מבתי הספר נידחה לשבוע הראשון של שנה"ל תשע"ז, לאחר שהתלמידים עלו לכיתה י"ב, מאילוצים טכניים של בית הספר. אף על פי שאיסוף נתונים מיטבי דורש התמקדות בטווחי זמן קרובים, איסוף הנתונים התפרס על פני שבעה חודשים (פברואר עד ספטמבר 2016). הסיבה לכך היא שהכניסה לבתי הספר הייתה תלויה בהסכמתם של המורים והמנהלים לביצוע המחקר, ועל כן זו הכתיבה את כניסתי לבית הספר. בהתאם לכך, אופי הדיגום הוגדר כמדגם נוחות. התלמידים מלאו שאלוני ידע לפני ואחרי המענה על שתי המשימות שתוארו בתת-פרק 3 בפרק הקונטקסט למחקר. תלמידים אשר לא ענו על

אחד השאלונים, או לא השתתפו בביצוע הפעילויות לא נכללו במדגם. סיכום המידע אודות הכיתות שנבחרו למחקר זה מופיע בטבלה 1.

טבלה 1: נתוני המדגם של התלמידים שמלאו שאלוני ידע אודות חלבונים מתוך אוכלוסיית המחקר

אזור בארץ	בית ספר	מספר תלמידים ומגדר ^א	מאפייני הכיתה
A - בתי ספר עירוניים מעיר אחת בדרום הארץ	A1	6 (8) 4 בנים ו-2 בנות	תלמידים מכיתה י"א. איסוף הנתונים נערך לקראת סוף שנת הלימודים. תוך ביצוע פרויקט "תסיסה ושמרים". התלמידים מרחיבים לימודיהם באמצעות מגמה מדעית נוספת.
	A2	22 (35) 14 בנים ו-8 בנות	תלמידים מכיתה י"א. איסוף הנתונים נערך באמצע שנת הלימודים. תוך ביצוע פרויקט "תסיסה ושמרים". התלמידים מרחיבים לימודיהם באמצעות שתי מגמות מדעיות נוספות.
	A3	5 (12) בן אחד ו-4 בנות	תלמידים מכיתה י"א. איסוף הנתונים נערך באמצע שנת הלימודים. תוך ביצוע פרויקט "תסיסה ושמרים". חלק מהתלמידים מרחיבים לימודיהם באמצעות שתי מגמות מדעיות נוספות.
B - בתי ספר עירוניים משתי ערים במרכז הארץ	B1	30 (36) 15 בנים ו-15 בנות	תלמידים מכיתה י"ב. איסוף הנתונים נערך מיד עם תחילת שנת הלימודים ולאחר ביצוע פרויקט "PON1". התלמידים מרחיבים לימודיהם באמצעות שתי מגמות מדעיות נוספות.
	B2	7 (14) 2 בנים ו-2 בנות	תלמידים מכיתה י"א מבית ספר עירוני במרכז הארץ. איסוף הנתונים נערך לקראת סוף שנת הלימודים. תוך ביצוע פרויקט מורחב "PON1". התלמידים מרחיבים לימודיהם באמצעות מגמה מדעית נוספת.

^א מספר מציין את התלמידים שמלאו שאלונים והשתתפו בביצוע הפעילויות. המספר בסוגריים מציין מספרם הכולל של התלמידים שלמדו בכיתה בעת איסוף הנתונים. סך כל התלמידים שלמדו בכיתות הוא 105 ומספר התלמידים שהשתתפו במחקר הוא 70.

בשנה שבה נאספו הנתונים השתתפו כל כיתות מערכות ביוטכנולוגיות המשתתפות במחקר בפרויקט יישומי-מחקרי (ביו-טק). מכיוון שאיסוף הנתונים התקיים לקראת סוף שנת הלימודים, חמשת הכיתות היו בעיצומו של הפרויקט בהנחייתו של מורה המגמה ובליווי של מכון מחקר מארח. כיתות מבתי-ספר A1-3 ביצעו פרויקט שנושאו בדיקת פעילות שמרים בתהליך ייצור בירה של חברה גדולה לייצור-בירות. כיתות מבתי-ספר B1-2 ביצעו פרויקט שנושאו בחינת גורמים המשפיעים על פעילות חלבון 1 (PON1) Paraoxonase אשר פעיל בפירוק תרכובות אורגנו-פוספטיות רעילות (Khersonsky & Tawfik, 2005). הפרויקט נערך בהנחייתם של מורות המגמה ובליווי זרוע חינוכית של מכון מחקר. במהלך הפרויקט, הוצג בפני התלמידים

בבתי ספר B1-2, מודל בתלת-ממד של החלבון PON1 על ידי סטודנט במכון המחקר שבו התארחו לצורך ביצוע הפרויקט. כמו כן הם צפו בגבישים של החלבון שמבנהו נקבע. עם התקדמות איסוף הנתונים שכלל איסוף שאלונים מהתלמידים ותצפיות משתתפות, זוהה כי בין שתי הקבוצות, A ו-B, קיים הבדל באופי הלמידה אודות חלבונים. על כן הוחלט כי משתנה בלתי תלוי במחקר יהיה הפרויקט המחקרי המלווה את הלמידה. שלושת הכיתות שבצעו פרויקט שנושאו בדיקת פעילות שמרים אוחדו לקבוצה אחת - קבוצה A (קבוצה שהפרויקט מחקרי שלה לא התמקד בחלבונים). שתי הכיתות שבצעו פרויקט שנושאו בדיקת השפעת גורמים על פעילות PON1 אוחדו לקבוצה שנייה - קבוצה B (קבוצה שהפרויקט מחקרי שלה כן התמקד בחלבונים). בשתי הקבוצות, A ו-B, הכיתות היו לאחר שלב איסוף הנתונים בפרויקט החקר כאשר נאספו נתוני המחקר, ועל כן ניתן להניח שהלמידה בכיתות הושפעה ביותר מההשתתפות בפרויקטים.

השפעת משתנים נוספים שיתוארו להלן לא נבדקה, אך הם יוצגו להלן:

משתנה ראשון הוא המגדר. כפי שצוין לעיל חמשת בתי הספר שייכים לזרם הממלכתי בישראל והיה ייצוג דומה לשני המינים. עם זאת, במחקר לא נבחנה השפעת המגדר על הישגי התלמידים ועל מאפייני למידה. משתנה שני הוא מגמת הבחירה הנוספת של התלמידים ומשתנה שלישי הוא מספר מגמות הבחירה המתווספות למערכות ביוטכנולוגיות. טבלה 2 מציגה את התפלגות בחירת המגמות של משתתפי המחקר בשתי הקבוצות, A ו-B, ואת שכיחותן:

טבלה 2: התפלגות ושכיחות הבחירה של תלמידים במגמות נוספות בנוסף למערכות ביוטכנולוגיות

	בחירת מגמה נוספת מעבר למגמת מערכות ביוטכנולוגיות					מספר מגמות נוספות למערכות ביוטכנולוגיות
	כימיה	ביולוגיה	פיזיקה	מדעי-המחשב	מגמה אחת	
	שתי מגמות				שתי מגמות	
	מספר התלמידים ^א					מספר התלמידים ^ב
קבוצה A (n=33)	27 (82)	22 (67)	8 (24)	0 (0)	9 (27)	24 (73)
קבוצה B (n=37)	33 (89)	4 (11)	26 (70)	2 (5)	9 (24)	28 (76)

^א המספר בסוגריים מציין את אחוז התלמידים שבחרו במגמה הנוספת, בנוסף למגמת מערכות ביוטכנולוגיות. בשתי הקבוצות, האחוזים

הם מעבר ל-100, מכיוון שרוב התלמידים מרחיבים שתי מגמות נוספות.

^ב המספר בסוגריים מציין את אחוז התלמידים שבחרו במגמה אחת או שתיים בנוסף למגמת מערכות ביוטכנולוגיות

השתייכות למגמת כימיה עשויה להשפיע על הישגי הלומדים בשאלוני הידע הממוקדים בידע מדעי בתחום הביוכימיה. בכיתה י' וי"א תלמידי מגמת כימיה רוכשים ידע אודות מבנה וקישור של חומרים מולקולריים, שהוא נושא התומך בהבנת תכנים אודות מבנה ותפקוד של חלבונים. השוואת הבחירה בין שתי הקבוצות, מראה שאין הבדל מהותי בין אחוז הבחירה של תלמידים במגמת כימיה בנוסף למערכות ביוטכנולוגיות בשתי הקבוצות. לבחירה במגמת ביולוגיה ישנה השפעה מינורית, מכיוון שאף שאחוז גבוה מתלמידי קבוצה A היו אמורים ללמוד אודות תפקוד חלבונים במהלך כיתה י"א במסגרת נושא הליבה "התא", הנושא מבנה החלבונים לא נלמד במגמת ביולוגיה טרם איסוף הנתונים. חשוב לציין שטרם התנסות התלמידים ב-Jmol

בתיווך המשימות הממוחשבות והמענה על שאלוני הידע המקדימים לימדו מורי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות את תכני מבנה ותפקוד חלבונים לבקשתי. נכחתי בכיתות בעת הלמידה המוקדמת אודות חלבונים בכיתות A1-3 וצפיתי. מתוך התצפיות ניכר שכל התלמידים בקבוצה A פגשו לראשונה בנושא החלבונים במסגרת לימודי מערכות ביוטכנולוגיות. במגמות האחרות המוצגות בטבלה 2 תלמידים אינם לומדים אודות חלבונים. כמו כן, בהשוואה בין שתי הקבוצות אין הבדל מהותי באחוז הבחירה של שתי מגמות בנוסף למגמת מערכות ביוטכנולוגיות. על כן, ייתכן ומגמת הבחירה או מספר המגמות הנוספות של התלמידים אינו המשתנה המשפיע על הישגים במענה על שאלוני הידע של שתי הקבוצות.

משתנה רביעי, הוא יכולת התלמידים. אף שלא נאסף מידע על יכולתם, על פי הנחייה ארצית על תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות להגיע עם הישגים גבוהים כתנאי לקבלה למגמה, ולראייה השתתפותם במגמות הבחירה הנוספות. על כן לא ניתן לטעון שבאחת משתי הקבוצות התלמידים הם בעלי הישגים נמוכים.

משתנה חמישי הוא הידע המוקדם שבו תלמידים מחזיקים. כאמור לעיל, קבוצה A השתתפה בפרויקט חקר שלא עסק בחלבונים, אך למדה טרם איסוף הנתונים אודות חלבונים במסגרת מגמת מערכות ביוטכנולוגיות. קבוצה B השתתפה בפרויקט חקר שעסק במבנה ותפקוד של חלבון PON1 וכחלק ממנו למדה בכיתה אודות מבנה ותפקוד חלבונים טרם איסוף הנתונים. כמו כן, שתי הקבוצות לא השתמשו בתוכנת Jmol טרם איסוף הנתונים.

לסיכום, ביצוע פרויקט חקר שונה בשתי הקבוצות הוא גורם משפיע ביותר בהשוואה ביניהן ועל כן המשתנה נבחר להיות המשתנה הבלתי תלוי בהקשר לשימוש תלמידים במשימות Jmol.

ב. מדגם התלמידים אשר מאפייני הלמידה שלהן נבחנו ונותחו איכותנית (שאלת מחקר 4) כלל ארבע בנות. שני זוגות תלמידות, הלומדות במגמת מערכות ביוטכנולוגיות בכיתה י"א בשני בתי ספר מערים שונות בישראל השתתפו במחקר בשנת הלימודים תשע"ו. זוגות של תלמידים נוספים השתתפו במחקר אך לא נותחו אודותיהם ממצאים משתי סיבות: האחת היא חוסר רבליות של בני הזוג והשנייה היא תקלות טכניות בהקלטות שמנעו איסוף נתונים אודותיהם. ארבעת התלמידות התנדבו להיות מוקלטות במהלך ביצוע והמענה על הפעילויות, והן הומלצו על ידי המורים לאיסוף נתונים. מכיוון שבשיח שקיימו ביניהן הן הציגו יכולת מילולית גבוהה הן נבחרו כמדגם נוחות לא-אקראי והשיח ביניהן נותח. ההבחנה בין שני הזוגות תעשה באמצעות הכינוי זוג MR לתלמידות מאי ורחל ולזוג SB לתלמידות שלי ובטי על פי האות הפותחת של שמן (השמות המופיעים בעבודה בדויים).

נתוני הזוגות: מאי ורחל (הזוג MR) לומדות בבית-ספר A2. מאי, בת 16.5 בזמן איסוף הנתונים, בחרה במגמת מערכות ביוטכנולוגיות בנוסף למגמת ביולוגיה. רחל, בת 17.5 בזמן איסוף הנתונים, בחרה במגמת מערכות ביוטכנולוגיות בנוסף למגמת כימיה. זוג התלמידות עבדו יחדיו בפרויקט בדיקת פעילות השמרים בתהליך ייצור הבירה. המורה המלמדת את הזוג MR לימדה את הנושא מבנה ותפקוד חלבון טרם איסוף הנתונים. שלי ובטי (הזוג SB) לומדות בבית-ספר B1. שתיהן בנות 17 בזמן איסוף הנתונים ובחרו שתיהן במגמת כימיה בנוסף למגמת מערכות ביוטכנולוגיות. זוג התלמידות עבדו יחדיו בפרויקט PON1 שהיה

בעיצומו במהלך איסוף הנתונים. טרם ביצוע הפרויקט ואיסוף הנתונים לימדה המורה את הנושא מבנה ותפקוד חלבונים, בדומה למורת הזוג MR.

ג. מדגם התלמידים שתפיסותיהם על השימוש במשימות Jmol נבדקו (שאלות מחקר 5-7) כלל 163 תלמידים מסיימי כיתה י"ב (112 בנות ו-51 בנים) משלושים וחמישה בתי ספר. מכיוון שחלק ממורי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות התנדבו להפיץ את השאלון וחלק מתלמידיהם התנדבו לענות עליו, ניתן להגדיר את אופי הדיגום כמדגם נוחות. עיתוי העברת השאלון היה בסמוך למועד בחינת הבגרות בביואינפורמטיקה שנערכה בסיום שנת הלימודים תשע"ו.

ד. מדגם המורים שתפיסותיהם על למידה אודות חלבונים באמצעות השימוש במשימות Jmol נבדק (שאלת מחקר 8) כלל שני מורים, מתוך כלל המורים שהתנסו בהוראה הכוללת שימוש של תלמידים ב-Jmol בתיווך המשימות וזאת כחלק מהוראת הביואינפורמטיקה בתיכון. המורים נבחרו על בסיס היכרות אישית עם החוקר ועל כן היה מדובר במדגם נוחות. שני מורים אלו הם בעלי תואר שני בביוולוגיה: מורה א' בעל 20 שנות וותק ומורה ב' בעלת 31 שנות וותק בהוראה. תלמידיו של מורה א' לא השתתפו במחקר, ואילו תלמידיה של מורה ב' מבתי הספר B2 ו-B3 השתתפו במחקר (טבלה 1).

3. כלי המחקר, איסוף הנתונים ושיטות הניתוח

במחקר נעשה שימוש בארבעה כלי מחקר. בפרק זה אתאר את כלי המחקר ואת איסוף הנתונים באמצעותם, וכן את שיטת ניתוח הנתונים שנאספו באמצעות כלי המחקר. הכלים שנבחרו כדי לענות על שאלות המחקר וכדי לאסוף ולנתח נתונים באמצעותם, הם:

- א. ניתוח קוהרנטי של תכני שתי משימות Jmol שנדלו מסביבת הלמידה "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה". הטקסטים המנותחים הם קטעי מידע ושאלות מתוך המשימות.
- ב. שאלונים הבודקים תפיסות ושאלונים הבודקים שינוי בידע הלומדים
- ג. ראיונות הבודקים תפיסות מורים וראיונות Think-aloud protocol שנערכים בעקבות תצפיות.
- ד. תצפיות – שבהן החוקר מתנהל כמשתתף שהוא גם צופה (Participant-as-observer).

בטבלה 3 בעמוד הבא סיכום של כלי המחקר שבהם נערך שימוש בכל שאלת מחקר, אוכלוסיית המחקר והמדגם. מגוון הכלים המחקריים עשוי להגדיל את התקפות החיצונית של ממצאי המחקר וכן עשוי להוביל לטריאנגולציה של ממצאי המחקר, אף שמקורם במטרות מחקר שונות (Johnson & Christensen, 2000).

3.1 ניתוח תכני משימות Jmol ממוחשבות

הניתוח של תכני משימות Jmol מתבסס על שיטת ניתוח דומה לזו שנערך בה שימוש במחקר שפורסם על ידי Machluf & Yarden (2013). באותו מחקר סווגו שאלות מתוך משימות רב-שלביות בסביבת "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה" לקטגוריות ידע בתחום הביולוגיה והביואינפורמטיקה בהתאם למסגרת תיאורית המגדירה ידע, ואשר תוארה על ידי De Jong & Ferguson-Hessler (1996). המסגרת שהוכנה עבור המחקר שפורסם ב-2013 נמצאה כלא מתאימה לניתוח תכנים טקסטואליים בשתי המשימות שנבחרו למחקר IPNS ו-AFP (תת-פרק 3 בפרק קונטקסט למחקר), עקב שני הבדלים עקרוניים הקשורים למחקר הנוכחי בהשוואה למחקר הקודם: (א) במחקר קודם נותחו כל השאלות ללא הבחנה בין כלים ביואינפורמטיים שבהם משתמשים ואילו במחקר הנוכחי סווגו שאלות שכולן מתמקדות בכלי ביואינפורמטי אחד שהוא Jmol; (ב) במחקר קודם נותחו רק שאלות ואילו במחקר הנוכחי נותחו קטעי מידע בנוסף לשאלות. כאמור, קטעי המידע והשאלות במשימות מסביבת "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה" עמדו לרשות החוקר לניתוח מחודש. עם זאת, תכני המשימות IPNS ו-AFP שנבחרו לניתוח לא נותחו בעבר (Machluf & Yarden, 2013). הניתוח נערך על פי המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון אשר נוסחה בתת-פרק 5 בפרק המבוא ואשר מתארת ארבעה מרכיבי ידע: C, P1, P2 ו-E (איור 1). תכני המשימות כוללים קטעי מידע ושאלות, ואליהם מצטרפים איורים, תצלומי מסך, תרשימים וטבלאות שמטרתן לתמוך בתלמיד תוך כדי מענה. כדי לאפיין את משימות Jmol (שאלת המחקר 1) ואת המידה שבה מיוצגים מרכיבי הידע בקטעי המידע ובשאלות, קוטעו כל תכני המשימות IPNS ו-AFP לקטעי מידע ולשאלות שסווגו על פי ארבעת מרכיבי הידע המדעי המתוארים במסגרת המושגית.

טבלה 3: סיכום מטרות המחקר, שאלות המחקר, כלי המחקר, האוכלוסייה והמדגם הנבחר

מטרה	שאלה	כלי המחקר	אוכלוסייה ומדגם
1. פיתוח מסגרת מושגית עבור שימוש במשימות Jmol ממוחשבות על ידי תלמידי תיכון כדרך לרכישת ידע מדעי אודות חלבונים, ושימוש בה לאפיון המשימות הממוחשבות מסביבת הלמידה.	1. כיצד מיוצגים מרכיבי הידע שאותם מצופה מהתלמיד לרכוש או להשתמש, בשאלות ובקטעי המידע המופיעים בתכני שתי משימות Jmol ובאיזו מידה הם מיוצגים?	ניתוח קטעי ומידע ושאלות במשימות IPNS ו-AFP.	נדגמו כל קטעי המידע (N=45) בשתי המשימות וכל השאלות הפתוחות ורבות הברירה (N=38) משתי משימות מסביבת "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה"
2 בחינת שימוש של תלמידים בתוכנת Jmol למידול מולקולרי של חלבונים בתיווך משימות ממוחשבות: א. בחינת הישגי לומדים ואפיון תהליכי למידה של משתמשי הממוחשבות של Jmol בסביבת הלמידה.	2. האם בעקבות השימוש במשימות הממוחשבות של Jmol חל שינוי בידע הלומדים אודות חלבונים?	שאלון ידע (שאלון I ו II נספח 4)	תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות לקראת סוף שנת הלימודים בכיתה י"א ובתחילת כיתה י"ב (n=70).
2 בחינת שימוש של תלמידים בתוכנת Jmol למידול מולקולרי של חלבונים בתיווך משימות ממוחשבות: ב. בחינת ההבדלים בהישגי לומדים משתי קבוצות הנבדלות ביניהן בפרויקט-החקר ובחינת ההבדלים בתהליכי הלמידה שלהם בהקשר לשימוש במשימות הממוחשבות של Jmol בסביבת הלמידה.	3. האם ישנם הבדלים בהישגי שתי קבוצות לומדים, הנבדלים בניהם בפרויקט החקר, לאור השימוש במשימות הממוחשבות של Jmol?	שאלוני ידע (שאלון I ו II נספח 4)	תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות לקראת סוף שנת הלימודים בכיתה י"א ובתחילת כיתה י"ב (n=70).
2+א2	4. האם שני זוגות תלמידות, המשתמשות ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות, רוכשות ידע מדעי אודות	תצפית משתתפת וראיון (Think-aloud protocol)	שני זוגות תלמידות בכיתה י"א משני בתי ספר שונים (n=4)

		חלבונים במהלך השיחה שהן מקיימות? כיצד ומדוע?	
תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות עם תום לימודיהם במועד ההערכה המסכמת בנושא. (n=163)	שאלון הבודק תפיסות תלמידים (שאלון III חלק א' נספח 4)	5. כיצד תופסים התלמידים את Jmol בהשוואה לכלים ביואינפורמטיים שבהם התנסו, במסגרת הלימודים במגמת מערכות ביוטכנולוגיות?	3. בחינת תפיסות תלמידים ומורים על למידה אודות חלבונים באמצעות השימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות. 3. בחינת תפיסות תלמידים והמורים על למידה אודות חלבונים באמצעות השימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות.
תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות עם תום לימודיהם במועד ההערכה המסכמת בנושא. (n=163)	שאלון הבודק תפיסות תלמידים (שאלון III חלק ב' נספח 4)	6. מהן תפיסות התלמידים על תרומתם היחסית של מרכיבי הידע הפרוצדורלי הנדרשים ללמידה אודות חלבונים במהלך השימוש ב-Jmol?	
תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות עם תום לימודיהם במועד ההערכה המסכמת בנושא. (n=163)	שאלון הבודק תפיסות תלמידים (שאלון III חלק ג' נספח 4)	7. מהן תפיסות התלמידים על האתגר בלמידה אודות חלבונים לאור השימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות?	
שני מורים מנוסים בהוראת ביואינפורמטיקה ובהוראת המקדמת שימוש ב-Jmol בתיווך משימות-ממוחשבות	ריאיון מבוסס תוצר עם המורים (נספח 5)	8. מהן תפיסות מורים על למידה אודות חלבונים באמצעות השימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות?	

בתכני המשימות יש 38 שאלות, (19 בכל משימה) ו-45 קטעי המידע (25 במשימת IPNS ו-20 במשימת AFP). לאחר מכן, נערך תיקוף מומחים לסיווג התכנים במשימות על פי ארבעת מרכיבי הידע. בתיקוף שנערך יחד עם חוקרת נוספת עבור מדגם אקראי של 25% מסך הקטעים והשאלות, הגיעו החוקרים להסכמה משותפת ב-100% מהתכנים.

3.2 שאלונים

שלושת השאלונים שהוכנו עבור מענה על השאלות במטרות המחקר השנייה והשלישית מופיעים בנספח 4. שאלונים I ו-II בודקים את הישגי התלמידים המשתמשים ב-Jmol בתיווך המשימות הממוחשבות (שאלות מחקר 2-3) ואילו שאלון III בודק את תפיסות התלמידים (שאלות מחקר 5-7).

שאלון I ו-II

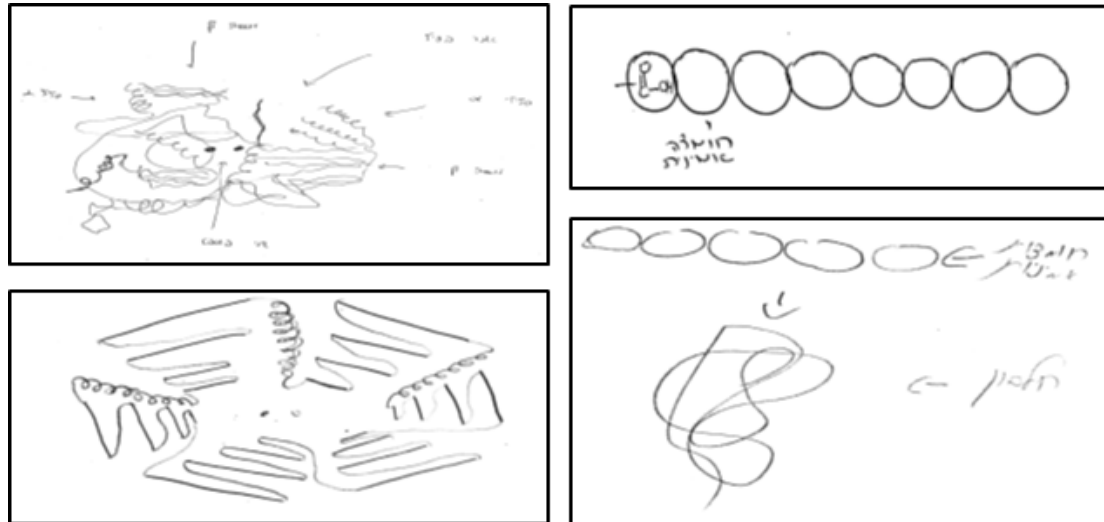
השאלונים הוכנו בהתאם לשאלות השייכות למטרת המחקר השנייה אשר בדקו האם בעקבות השימוש במשימות הממוחשבות של Jmol חל שינוי בידע הלומדים אודות חלבונים? (שאלה 2) וכן האם ישנם הבדלים בהישגי שתי קבוצות לומדים, הנבדלים בניהם בפרויקט החקר, לאור השימוש במשימות הממוחשבות של Jmol? (שאלה 3). בין מענה על השאלון המקדים למסיים עבר משך זמן של חודש עד חודשיים, וזאת בחמשת בתי הספר שבהם הועבר השאלון. ניתוח הממצאים מהשאלונים חושף את הידע המדעי של התלמידים אודות חלבונים, ומתייחס לשני מרכיבי ידע מתוך ארבעת מרכיבי הידע שתוארו במסגרת המושגית: ידע תוכני אודות מבנה ותפקוד חלבונים (C) וידע פרוצדורלי אודות השימוש בייצוגים חזותיים (P1). בכל מרכיב ידע הובחנו תתי-מרכיבי ידע שעבורם נבדקו הישגי הלומדים. תתי-מרכיבי הידע התוכני הם: (א) ידע אודות מבנה חלבון; (ב) ידע אודות תפקוד חלבון; (ג) ידע אודות הקשר בין מבנה לתפקוד חלבון. תתי-מרכיבי הידע הפרוצדורלי אודות השימוש בייצוגים חזותיים הם: (א) מיומנות בפענוח ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים; (ב) מיומנות בבניית ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים (Schönborn & Anderson, 2010). סיכום של מרכיבי הידע ותתי-מרכיבי הידע כפי שהם מופיעים בשאלות מתוך שאלונים I ו-II מתוארים בטבלה 4. תיאור תתי-מרכיבי הידע מבהיר מהו הידע שעליו נשאל התלמיד בשאלונים. מחווי השאלונים והדרישות הקוגניטיביות בכל שאלה שהממצאים עבורה נותחו יפורטו בהמשך.

ראוי לציין, שהמסגרת המושגית התפתחה במהלך המחקר ועל כן בשלב מוקדם של המחקר פותח שאלון ידע שאינו מתוקף דיו עבור הידע האפיסטמי E. השאלון שעסק בידע האפיסטמי חולק רק למספר קטן של תלמידים בתחילת איסוף הנתונים, אך לא המשיך להיות מחולק בעקבות בעיות התיקוף שזוהו. בנוסף, לא פותח שאלון ידע עבור הידע הפרוצדורלי P2 מכיוון שהתלמידים לא החזיקו בידע מוקדם אודות שימוש באפשרויות תוכנת Jmol.

טבלה 4: מרכיבי הידע ותת-מרכיבי הידע בשאלות מתוך שאלוני ה-Pre וה-Post

מרכיב ידע	תת-מרכיבי הידע	השאלה	מענה מצופה מתלמיד
ידע תוכני אודות חלבונים (C)	(א) ידע אודות מבנה חלבון	שאלון II - ממה מורכב אתר פעיל בחלבון?	ראה טבלה 7 בפרק השיטות
	(ב) ידע אודות תפקוד חלבון	שאלון II - מהי החשיבות של אתר פעיל בחלבון?	ראה טבלה 8 בפרק השיטות
	(ג) ידע אודות הקשר בין מבנה לתפקוד חלבון	שאלון II - ישנה חומצה אמינית X הממוקמת באתר הפעיל של חלבון כלשהו. האם מוטציה אשר מובילה לשינוי של חומצה אמינית X לחומצה אמינית אחרת בחלבון זה, תגרום <u>בהכרח</u> לירידה בפעילותו? נמק תשובתך.	ראה טבלה 9 בפרק השיטות
ידע פרוצדורלי אודות השימוש בייצוגים חזותיים (P1)	(א) מיומנות בפענוח ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים	שאלון II – בקשה מהתלמיד לפענח שלש תצוגות שונות של חלבונים (בתצוגות: <i>CPK-Space</i> , <i>Cartoon</i> <i>fill</i> וכדורים ומקלות)	טבלה 6 בפרק השיטות: לתאר את המיוצג (לדוגמה קשר קוולנטי) באופן מדויק על פי המייצג (לדוגמה תצוגת כדורים ומקלות)
	(ב) מיומנות בבניית ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים	שאלון I – בקשה מהתלמיד לצייר מולקולת חלבון	טבלה 5 בפרק השיטות: ייצוג רמות מבנה שונות, הוספת יונים, קו-פקטורים, ממס, משיכה חשמלית חלשה או קשרים די-סולפידים

בשאלון I (נספח 4) התלמידים מתבקשים לצייר את מולקולת החלבון כפי שהם רואים אותה בדמיונם, על גבי טופס ריק. התלמידים התבקשו לספק הסברים מילוליים בדף לצד הציור על מנת להקל בפענוח המידע. מכיוון שציורי התלמידים כוללים אלמנטים ויזואליים רבים (איור 2) הציורים עשירים בנתונים וניתן לקודד אותם על פי מאפיינים מבניים המוצגים במודלים מולקולריים.



איור 2: דוגמאות לציורי תלמידים אשר התבקשו לצייר מולקולת חלבון

ציורים עשויים לחשוף ידע, מודלים מנטליים וחשיבה מבוססת-מודל ועל כן יכולים להוות כלי חשוב לקידום למידה אך גם כמקור חשוב לאיסוף נתונים מלומדים ככלל (White & Gunstone, 2014) ובפרט בביולוגיה (Quillin & Thomas, 2015) ואף בהקשר ספציפי לידע תוכני אודות מבני חלבונים (Harle & Towns, 2013). על פי (Schönborn & Anderson, 2010), מיומנות קוגניטיבית של בניית (Construct) ייצוגים חזותיים היא יכולת חיונית עבור ביוכימאי ויש לפתח מיומנות זו בקרב הלומדים. בשונה מהמיומנות של שימוש באפשרויות תוכנה למידול מולקולרי (P2) המאפשרת לביוכימאי או ללומד לבנות מודל מולקולרי באמצעים דיגיטליים, ציור על דף לא דורש מיומנות בידע הפרוצדורלי P2 כפי שתואר במסגרת המושגית. על פי המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים (איור 1), ניתן לזהות את הציור שציירו הלומדים כמיומנות קוגניטיבית אשר מקוטלגת במחקר זה כידע פרוצדורלי P1 אשר דורש בניית ייצוגים חזותיים באמצעות ציור. בשונה מהמתואר במסגרת המושגית (איור 1) לא ניתן להגדיר את מיומנות הבנייה של המודל המולקולרי כידע פרוצדורלי P2 מכיוון שציור מודל מולקולרי לא דרש שימוש בתוכנה למידול מולקולרי.

לצורך ניתוח הנתונים, אותרו וקודדו בציורי התלמידים 16 תיאורים חזותיים שונים. 12 מהם של מאפיינים של ארבע רמות מבנה החלבון ועוד 4 ייצוגים המוגדרים כמאפיינים אחרים: משיכה חשמלית חלשה, קשרים די-סולפידיים, קו-פקטורים וממס. רשימת הייצוגים מופיעה בטבלה 5 בעמוד הבא.

כדי לכמת את הידע שהביעו התלמידים בציורים שלהם, ניתן ניקוד בעל משקל יחסי אשר מספק אינדיקציה לידע אשר מוחצן על ידי הציורים. ציור אלמנטים של מבנה שניוני ומבנה שלישוני מקבל משקל כפול של ניקוד בהשוואה למבנה ראשוני ושניוני, מכיוון שתלמידים שבחרו לצייר את המבנה השניוני ו/או שלישוני אינם רואים צורך להציג בציור שלהם את המבנה הראשוני, להוציא מקרים בודדים שבהם תלמידים כן

בחרו להדגיש בציור **גם** את רצף חומצות האמינו, ועל כך קיבלו נקודה נוספת. שיקול נוסף למתן ניקוד כפול עבור מבנה שלישוני ניתן בעקבות החשיבות הרבה של מודלים קונספטואליים המאפשרים החזייה של מבנה זה עבור יצירת מודל מנטלי המקשר בין מבנה חלבון לתפקודו. על פי מחוון שהוכן במחקר זה, הניקוד המקסימלי שניתן לקבל לשאלון הוא 10 נקודות. ציון מקסימלי זה מעיד על מומחיות בתיאור של מבנה ותפקוד חלבון, ומכיוון שתלמידי כיתה י"א אינם בהכרח מומחים, הציפייה היא לציונים ממוצעים הנמוכים משמעותית מ-10.

טבלה 5: סיווג ייצוגים מתוך ציורי תלמידים על פי מאפיינים במולקולת החלבון וניקוד במחוון

מאפיין	הייצוג החזותי	ניקוד במחוון
מבנה ראשוני	נוסחה מבנית של חומצה אמינית	1
	נוסחה מבנית של פפטיד	
	תיאור סכמתי של חומצות אמינו בשרשרת	
	קבוצה אמינית וקבוצה קרבוקסיל בקצוות השרשרת	
מבנה שניוני	ציור סליל אלפא	1
	ציור משטחי ביטא	1
מבנה שלישוני	התקפלות שרשרת בתצוגת Cartoon (סיבי או כדורי)	2 (ניקוד מקסימלי)
	התקפלות שרשרת בתצוגת Sticks (סיבי או כדורי)	
	התקפלות שרשרת בתצוגת Spacefill (סיבי או כדורי)	
	התקפלות שרשרת בתצוגת Balls & Sticks (סיבי או כדורי)	
	התקפלות שרשרת בתצוגת Trace (סיבי או כדורי)	
מבנה רביעוני	תיאור ברור של יותר משרשרת אחת במבנה שלישוני	1
קשרים/ליגנדים/ממס	קו מרוסקים (למשיכה חשמלית חלשה)	1
	ציור ברור של קשר S-S בשרשרת (קשרים דיסולפידיים).	1
	ציור נקודות/עגולים במרכז השרשרת המקופלת (קו-פקטורים)	1
	ציור מולקולות מים מסביב לשרשרת המקופלת (ממס)	1

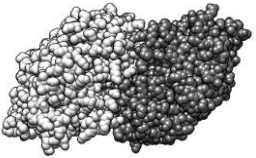
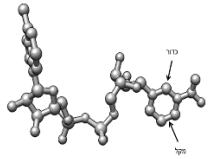
בשאלון II (נספח 4) התלמידים התבקשו לענות על עשר שאלות.

שאלות 1-3 הם שאלות סגורות הבוחנות את הידע התוכני של התלמיד בהכרות עם סוגי הקשרים הכימיים במבנה החלבון (מבנה חלבון); שאלות 4-5 הם שאלות סגורות, אשר בוחנות ידע תוכני של תלמידים בסיווג הקבוצות הפונקציונליות של חומצות האמינו כל פי מבנה וכן בסיווגן בהתאם למשיכה החשמלית שהן מקיימות. על פי המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים (איור 1) הידע הנדרש מהלומדים כאן היא מיומנות קוגניטיבית אשר מקוטלגת במחקר זה כידע פרוצדורלי P1 אשר דורש פענוח של ייצוגים חזותיים (Schönborn & Anderson, 2010) המוצגים במודל מולקולרי של חלבון; שאלה 6 היא שאלה סגורה הבוחנת את יכולת התלמידים לפענח ייצוגים חזותיים קיימים במגוון תצוגות של מודלים מולקולריים בדו-ממד בהקשר לארבע רמות המבנה של חלבון; שאלה 7 היא שאלה פתוחה הבוחנת את יכולת התלמידים לפענח ייצוגים חזותיים קיימים במודל מולקולרי בדו-ממד בתצוגת כדורים ומקלות בהקשר למרכיבי המולקולה. גם שאלות 6 ו-7, הן שאלות בהן הידע הנדרש מהלומדים כולל מיומנות קוגניטיבית אשר מקוטלגת במחקר זה כידע פרוצדורלי מסוג P1 אשר דורש פענוח של ייצוגים חזותיים (Schönborn & Anderson, 2010); שאלות 8 – 10 הן שאלות פתוחות הבוחנות את הידע התוכני של התלמיד בהכרות עם מבנה החלבון, תפקוד החלבון, והקשר בין מבנה לתפקוד חלבון. ידע זה מקוטלג במחקר זה כידע תוכני C.

שאלון II נמסר לתלמידים רק לאחר שמסרו לידי את שאלון I, כדי למנוע השפעה של הייצוגים אשר נדרשו לפענח על היכולת שלהם לצייר מולקולת חלבון. משך המילוי של השאלון היה 15 דקות לערך. לצורך ניתוח הנתונים, נותח המענה של התלמידים על חלק מהשאלות בשאלון. נערך ניתוח נפרד לשני חלקים מתוך השאלון בהתאם למרכיב הידע שנדרש מהתלמידים להחציין.

- ניתוח ידע מסוג P1 לפענוח ייצוגים: מענה התלמידים לשאלות 6 ו-7 בשאלון הידע נותח כדי לזהות את הישגי הלומדים בשאלות ידע מסוג P1 הדורשות פענוח ייצוגים, וזאת בשונה משאלון I שדרש מהתלמידים להראות בניית מודל מולקולרי בציור. בטבלה 6 בעמוד הבא מוצג מחוון המתאר את אופי הקידוד והציון הניתן למענה. על פי מחוון זה, הניקוד המקסימלי שניתן לקבל הוא 6 נקודות. גם כאן, ציון מקסימלי זה מעיד על מומחיות בתיאור של מבנה ותפקוד חלבון, ומכיוון שתלמידי כיתה י"א אינם בהכרח מומחים, הציפייה היא לציונים ממוצעים הנמוכים משמעותית מ-10.
- ניתוח ידע תוכני אודות מבנה חלבון, תפקוד חלבון, והקשר בין מבנה לתפקוד חלבון: מענה התלמידים לשאלות 8-10 בשאלון הידע נותחו כדי לזהות את הישגי הלומדים בשאלות ידע מסוג תוכני אודות מבנה החלבונים, תפקוד חלבונים ומבנה ותפקוד החלבונים. השאלה "ממה מורכב אתר פעיל?" עוסקת במבנה חלבון והמחוון לשאלה זו מופיע בטבלה 7 בהמשך. השאלה "מהי החשיבות של אתר פעיל בחלבון?" עוסקת בתפקוד חלבון, ומחוון לשאלה זו מופיע בטבלה 8 בהמשך. השאלה "ישנה חומצה אמינית X הממוקמת באתר הפעיל של חלבון כלשהו. האם מוטציה אשר מובילה לשינוי של חומצה אמינית X לחומצה אמינית אחרת בחלבון זה, תגרום בהכרח לירידה בפעילותו?" נמק תשובתך" עוסקת בקשר בין מבנה לתפקוד חלבון, ומחוון לשאלה זו מופיע בטבלה 9 בהמשך. על פי מחוון זה, הניקוד המקסימלי שניתן לקבל לשאלון הידע התוכני הוא 15 נקודות.

טבלה 6: מחוון למענה התלמידים על שאלות הדורשות פענוח של ייצוגים מבניים

שאלה וסעיף	הייצוג החזותי	קידוד וניקוד במחוון
שאלה 6 ייצוג 2	 התשובה: שניוני ושלישוני	שניוני ושלישוני – 2 נקודות. שניוני – נקודה אחת. שלישוני – נקודה אחת. שניוני, שלישוני, רביעוני – נקודה אחת. ראשוני, שניוני, שלישוני – נקודה אחת. ראשוני, שניוני – 0 נקודות. שלישוני, רביעוני – 0 נקודות. ראשוני, שניוני, שלישוני, רביעוני – 0 נקודות. ראשוני – 0 נקודות. רביעוני – 0 נקודות.
שאלה 6 ייצוג 3	 התשובה: שלישוני ורביעוני	שלישוני, רביעוני – 2 נקודות שלישוני – נקודה אחת רביעוני – נקודה אחת. ראשוני – 0 נקודות שניוני – 0 נקודות
שאלה 7	 התשובה: כדור הוא אטום, מקל הוא קשר קוולנטי.	מתשובות התלמידים, עבור כדור המיוצגים שנכתבו בתשובות התלמידים: - קשר קוולנטי בין אטומים - קשר קוולנטי - קשר בין אטומים - קשר כימי - קשר - קשר פפטידי - קשר בין חומצות אמינו (סמוכות) - קשר בין מולקולות - קשרי מימן - קשרי ו.ד.ו - קשרים יוניים - סליל אלפא - משטח ביטא - קשר בין מולקולרי - שרשראות של ח.א מתשובות התלמידים, עבור כדור המיוצגים שנכתבו בתשובות התלמידים: - אטום, - פחמן, חמצן או מימן - יסוד - חומצה אמינית - מולקולה (כולל מולקולות חלבון או חלבון). - סליל אלפא - מעטפת קפלים ביטא - קשר בין שרשראות נקודה אחת עבור המיוצגים המודגשים. 0 נקודות עבור כל שאר המיוצגים. נקודה אחת עבור המיוצגים המודגשים. ללא ניקוד עבור כל שאר המיוצגים.

טבלה 7: מחוון וניקוד לשאלה העוסקת במבנה חלבון: "ממה מורכב אתר פעיל בחלבון?"

ניקוד	הקריטריון למחוון	דוגמה לתשובה
0	התלמיד עונה שהוא לא יודע	לא זוכרת
1	התלמיד מתאר תפיסה אלטרנטיבית	רצף של נוקלאוטידים, מרווח ביניהם ושוב רצף של נוקלאוטידים.
2	התלמיד מתאר מרכיב אחד ומכניס תפיסה אלטרנטיבית	שני יוני סידן ועוד כמה דברים ששכחתי (התפיסה האלטרנטיבית היא שהתלמיד עושה אינדוקציה מחלבון אחד. לא בכל האתרים הפעילים שני יוני סידן)
3	התלמיד מתאר מרכיב מבני אחד	מיונים אשר מייצבים אותו והתאמה מרחבית.
4	התלמיד מתאר שני מרכיבים ומכניס תפיסה אלטרנטיבית	משני יוני סידן וכמה חומצות אמינו (התפיסה האלטרנטיבית היא שהתלמיד עושה אינדוקציה מחלבון אחד. לא בכל האתרים הפעילים שני יוני סידן)
5	התלמיד מתאר שני מרכיבים מבניים	מרצף חומצות אמינו ביניהן קשרים חשמליים היוצרים מבנה מרחבי. לעיתים האתר הפעיל מושפע גם מיון בתוך החלבון כמו יון סידן קטליטי.

טבלה 8: מחוון וניקוד לשאלה העוסקת בתפקוד חלבון: "מהי החשיבות של אתר פעיל בחלבון?"

ניקוד	הקריטריון למחוון	דוגמה לתשובה
0	התלמיד עונה שהוא לא יודע	לא יודע
1	התלמיד מעלה טיעון הטבוע בגוף השאלה	האתר הפעיל חשוב לחלבון, האתר הפעיל אחראי לפעילות החלבון
2	התלמיד מתאר מרכיב אחד הקשור לפעילות האתר (קישור, פעילות כימית, זירוז, יצירת תוצר) אך מעלה תפיסה אלטרנטיבית.	חשיבותו של האתר הפעיל בחלבון היא לקשור סובסטרט אליו במקרה של אנזים או לדוגמה של רנ"א מעביר אשר קושר אל האתר הפעיל חומצה אמינית.
3	התלמיד מתאר מרכיב אחד הקשור לפעילות האתר (קישור סובסטרט, זירוז תגובה כימית, יצירת תוצר)	רמת ההתאמה המרחבית משקפת את רמת היעילות של פעילות החלבון שכן שככל שההתאמה גבוהה יותר, בחלבון יקשר דרך האתר הפעיל בצורה טובה יותר ויציבה יותר לסובסטרט ויבצע את פעולתו באופן יציב יותר.
4	התלמיד מתאר שני מרכיבים הקשורים לפעילות האתר (קישור סובסטרט, זירוז תגובה כימית, יצירת תוצר) אך מעלה תפיסה אלטרנטיבית.	החשיבות של האתר הפעיל בחלבון היא בכך שאתר פעיל בחלבון הוא אתר הקישור עם מולקולה שאת התהליך שלה רוצים לזרז.
5	התלמיד מתאר שני מרכיבים הקשורים לפעילות האתר(קישור סובסטרט, זירוז תגובה כימית, יצירת תוצר)	היא בכך שהוא אחראי לתפקוד החלבון. לכל חלבון פעולה ייחודית המתבצעת בעזרת האתר הפעיל אשר נקשר לסובסטרט הרצוי ויוצר תוצר כמו באנזים או שמבצע כל פעולה אחרת של החלבון.

טבלה 9: מחוון וניקוד לשאלה העוסקת בקשר בין מבנה לתפקוד חלבון: "ישנה חומצה אמינית X הממוקמת באתר הפעיל של חלבון כלשהו. האם מוטציה אשר מובילה לשינוי של חומצה אמינית X לחומצה אמינית אחרת בחלבון זה, תגרום בהכרח לירידה בפעילותו? נמק תשובתך".

ניקוד	הקריטריון למחוון	דוגמה לתשובה
0	התלמיד עונה שהוא לא יודע	---
1	התלמיד מעלה טיעון הטבוע בגוף השאלה או שלא מעלה טיעון/או נימוק מוטעה	מוטציה המובילה לשינוי של חומצה אמינית X ממוקמת באתר הפעיל לא תגרום בהכרח לירידה בפעילותו של החלבון מכיוון שיכול להיות שזאת מוטציה נקודתית שבה נוקלאוטיד הפך לנוקלאוטיד אחר ועדיין מקודד לאותה חומצה אמינית (מוטציה שקטה)
2	התלמיד מציין שהמוטציה מורידה את הפעילות בהכרח . הנימוק נכון אך לא שלם מכיוון שהוא לא מתאר את ההבדלים המבניים בין חומצות האמינו של החלבון הנורמלי והחלבון המוטנטי	מוטציה המובילה לשינוי של חומצה אמינית X וממוקמת באתר הפעיל תגרום לירידה בפעילותו של החלבון כיוון שהחומצה האמינית חיונית לפעילות האתר הפעיל
3	התלמיד מציין שהמוטציה לא בהכרח מורידה את הפעילות. הנימוק נכון אך לא שלם מכיוון שהוא לא מתאר את ההבדלים המבניים בין חומצות האמינו של החלבון הנורמלי והחלבון המוטנטי	מוטציה המובילה לשינוי של חומצה אמינית X וממוקמת באתר הפעיל לא גורמת בהכרח לירידה בפעילותו של החלבון מכיוון שפגיעה באתר הפעיל של החלבון יכולה להביא לשינוי בתפקוד החלבון. לעיתים יש סיכוי שלא ישפיע על תפקוד החלבון יש לבדוק
4	התלמיד מציין שהמוטציה מורידה את הפעילות בהכרח . הנימוק שלם מכיוון שהוא מתאר את ההבדלים המבניים בין חומצות האמינו של החלבון הנורמלי והחלבון המוטנטי	מוטציה המובילה לשינוי של חומצה אמינית X וממוקמת באתר הפעיל תגרום לירידה בפעילותו של החלבון מכיוון שהחומצה האמינית באתר הפעיל תשפיע על רמת ההתאמה המרחבית בין האתר הפעיל והסובסטרט, שכן התאמה זו משפיעה על יציבות הקשירה ביניהם ובסופו של דבר על כמות התוצר או פעילות החלבון,
5	התלמיד מציין שהמוטציה לא בהכרח מורידה את הפעילות. הנימוק שלם מכיוון שהוא מתאר את ההבדלים המבניים בין חומצות האמינו של החלבון הנורמלי והחלבון המוטנטי	מוטציה המובילה לשינוי של חומצה אמינית X וממוקמת באתר הפעיל לא תגרום בהכרח לירידה בפעילותו של החלבון מכיוון שיש חומצות אמיניות עם מבנה דומה שלא ישנו את הצורה של האתר הפעיל.

ציורי התלמידים (שאלון I) והתשובות לשאלות העוסקות בייצוגים מתוך שאלון II קודדו על פי שני המחזונים שהוכנו מראש (טבלאות 5-6), ולאחר מכן הועמדו לבחינה, שיפור והתכוונות שהושגו בסיוע של מומחה לביוכימיה, עד להגעה להסכמה משותפת בשני המחזונים. כמו כן, תוקפו 10% מתשובות התלמידים לשאלות 8-10 בשאלון II על פי המחזונים (טבלאות 7-9) בסיוע מומחית להוראת המדעים אשר בדקה כמעריכה נוספת את השאלות. הבדיקה השנייה עמדה על דיוק בסך 86% בהשוואה לבדיקה הראשונה.

כדי לענות על שאלת המחקר 2, הבודקת האם בעקבות השימוש במשימות הממוחשבות של Jmol חל שינוי בידע הלומדים אודות חלבונים, נערכו שני מבחנים סטטיסטיים בשתי קבוצות תלמידים נפרדות מחמישה בתי ספר טרם השימוש במשימות Jmol ממוחשבות¹⁰. הישגי התלמידים נבחנו עבור כל אחד מחמשת תת-מרכיבי הידע בנפרד באמצעות השוואה פרמטרית מזווגת בין הישגי התלמידים לפני ולאחר השימוש במשימות Jmol וזאת באמצעות מבחן t. תת מרכיבי הידע הם: ידע תוכני C אודות מבנה חלבון, ידע תוכני C אודות תפקוד חלבון, ידע תוכני C אודות הקשר בין המבנה לתפקוד, ידע פרוצדורלי P1 אודות בניית ייצוג חזותי וידע פרוצדורלי P1 - אודות פענוח ייצוגים חזותיים. בנוסף נערך מבחן MANOVA (Multivariate analysis of variance) חד צדדי עבור השפעת משתנה בלתי תלוי אחד שהוא השוואה בין תוצאות מבחני קדם לתוצאות המבחנים אחר השימוש במשימות Jmol, על חמישה משתנים תלויים שהם חמשת תת-מרכיבי הידע שתוארו לעיל.

כדי לענות על שאלת מחקר 3, הבודקת האם ישנם הבדלים בהישגי שתי קבוצות לומדים, הנבדלים בניהם בפרויקט החקר, לאור השימוש במשימות הממוחשבות של Jmol, נערכו אותם שני מבחנים סטטיסטיים שתוארו עבור שאלת המחקר השלישית, אך הפעם באמצעות השוואה פרמטרית לא מזווגת בין הישגי התלמידים באמצעות מבחן t לפני השימוש במשימות Jmol עבור כל אחד מחמשת תת-מרכיבי הידע בנפרד. בנוסף נערכו שני מבחני MANOVA חד צדדיים המשווים בין: (א) מבחני הקדם של שתי הקבוצות; ו- (ב) השיפור הממוצע בשתי הקבוצות. הניתוחים הסטטיסטיים נערכו באמצעות תוכנת SAS.

שאלון III

השאלון (נספח 4) הוכן בהתאם למטרת המחקר השלישית (שאלות המחקר 5-7). שאלון זה בודק תפיסות תלמידים אודות השימוש ב-Jmol מתוך השקפה רחבה יותר של התנסות בכלים ביואינפורמטיים אחרים. השאלון הועבר בפעם הראשונה בסיומה של שנת הלימודים תשע"ה במסגרת מחקר הפיילוט ועליו ענו 100 תלמידים. באמצעות המענה הראשוני ובעקבותיו, הוכנה גרסה נוספת כדי לשפר את מהימנות ותקפות השאלון. הגרסה השנייה הועברה בסיום שנת הלימודים תשע"ו. לשאלון שלושה חלקים, כאשר כל חלק מיועד לבחון שאלת מחקר אחת. חלק א' בודק כיצד תופסים התלמידים את השימוש ב-Jmol בהשוואה לכלים הביואינפורמטיים האחרים שבהם הם מתנסים. חלק ב' בודק מהי התרומה היחסית של פרוצדורות

¹⁰ כפי שצוין בתת פרק קודם, הקבוצות נבדלו בניהן בסוג פרויקט המחקר שבו היו מעורבות. כיתות מבתי-ספר A1-3 ביצעו פרויקט שמרים וייצור בירה (n=33) ואילו כיתות מבתי-ספר B1-2 ביצעו פרויקט שעסק בחלבון PON1 (n=37). לתיאור מפורט של ההבחנה בין שתי הקבוצות ראה תת-פרק 2 בפרק זה.

P1 (השימוש בייצוגים חזותיים) ו-P2 (השימוש באפשרויות תוכנת Jmol) להיבטים שונים בלמידה על פי השקפתם של תלמידים. חלק ג' בוחן את תפיסות התלמידים על האתגר בלמידה אודות חלבונים באמצעות Jmol. השאלון הועבר לתלמידי כיתה י"ב כשאלון ממוחשב ב-Google Forms. שיתוף השאלון הסתייע על ידי המורים אשר הפיצו אותו בקרב תלמידיהם בסמוך למועד בחינת הבגרות בביואינפורמטיקה. 85% מהתלמידים המשיבים ענו עליו או יום או יומיים לפני מועד בחינת הבגרות ושאר המשיבים מיד לאחריו. בהתאם לשאלת מחקר 5, בחלק א' של השאלון התבקשו תלמידים לבחור כלי ביואינפורמטי שהתמחו בו, על פי הקריטריונים הבאים: המעניין ביותר ללמידה, הקשה ביותר להפעלה (שאלה על השימוש במאפייני התוכנה), בעל דף התוצאה המורכב ביותר לניתוח (שאלה העוסקת בהבנת הייצוגים) וכן הקשור ביותר לידע שרכשו בנושא הנדסה גנטית אשר נלמד באותה שנה. חמשת הכלים שבהם התמחו התלמידים בשנת הלימודים תשע"ו היו: Jmol, ORF-Finder, BLAST Protein, BLAST Nucleotide, ENTREZ. לתלמידים ניתנה האפשרות לסמן בחירה של יותר מכלי ביואינפורמטי אחד בכל קריטריון, כדי לאפשר לעונים פוטנציאלים לא החלטיים להביע עמדתם, במקום לבחור באפשרות המענה הנוחה של "לא יודע". בחלק זה של השאלון נקבעה התפלגות הבחירה של התלמידים בלבד, ללא ניתוחים סטטיסטיים נוספים, מכיוון שתלמידים רבים בחרו יותר מכלי אחד מועדף בקריטריונים שונים. כל הניתוחים הסטטיסטיים נערכו באמצעות תוכנת SAS.

בחלק ב' של השאלון התבקשו תלמידים, בהתאם לשאלת מחקר 6, לענות על חמש שאלות נוספות המייצגות היבטים שונים: האחת היא "מהו המאפיין שגרם לי לרצות יותר ללמוד על חלבונים?", השנייה היא "מהו המאפיין שגרם לי להבין יותר על חלבונים?", השלישית היא: "מהו המאפיין שגרם לי להנאה רבה יותר?", הרביעית היא: "מה המאפיין שסייע לי להבין את העיקרון שתצוגות¹¹ שונות של חלבון מדגישות תכונות שונות של חלבון" והחמישית היא "מהו המאפיין שסייע לי להבין את הקשר בין תצוגת המולקולות לבין מבנה מולקולות בעולם הממשי?". בארבעת השאלות הראשונות ניתנה לתלמידים האפשרות להחליט בין המאפיינים הבאים: "העובדה שהפעלתי Jmol" / "העובדה שמבנה חלבון הוצג בפניי" / "שניהם במידה שווה" / "אף לא אחד מהם". בשאלה האחרונה ניתנה להם אפשרות מענה חמישית והיא: "אני לא מבין את הקשר בין תצוגת המולקולות לבין מבנה מולקולות בעולם הממשי". המאפיינים כפי שנוסחו בשאלון מבחינים בין שני מרכיבי ידע שהינם פרוצדורות של תלמידים ב-Jmol: השימוש בייצוגים חזותיים ("העובדה שמבנה החלבון הוצג בפניי") לבין שימוש באפשרויות התוכנה ("העובדה שהפעלתי Jmol"). על כן, התלמידים מתבקשים לייצר הפרדה בין שני מרכיבי הידע באמצעות הבחנה בין הידע הפרוצדורלי P1 לידע הפרוצדורלי P2. בתיאור התוצאות אציג את הניתוחים הסטטיסטיים של היגדים 1-4 אך לא של היגד 5, מכיוון שהיגד זה אינו מתוקף דיו. התיקוף הבעייתי של היגד 5 נובע מעצם היות המשפט "הקשר בין תצוגה של מולקולות לבין מבנה המולקולות בעולם הממשי" נתון לפרשנות שונה בקרב תלמידים שונים, זאת מכיוון שהקשר הנ"ל לא נכתב בהיגד.

¹¹ כדי להקל על התלמיד, הובהר בשאלון המונח תצוגות שונות: "לדוגמה תצוגת מוטות וכדורים או תצוגת מבנה שניוני"

לצורך ניתוח סטטיסטי של תשובות התלמידים המתפלגים למאפיינים השונים בארבעת השאלות, נערכה השוואה של השכיחות הקיימות של כל אחד מהמאפיינים מול השכיחות האקראית של תשובות התלמידים בכל אחת מהשאלות בנפרד, באמצעות מבחן χ^2 . מובהקות מחושבת מתוך השוואה זו.

בחלק ג' של השאלון התבקשו תלמידים, בהתאם לשאלת מחקר 8, להביע הסכמה / חוסר הסכמה עם שמונה-עשר היגדים על פי סולם מסוג ליקרט (Likert, 1932) המורכב מ-4 נקודות: מ-1 (לא מסכים) ועד 4 (מסכים). ארבעה היגדים מתוך השמונה-עשר היו הופכיים. ההחלטה להשתמש בסולם הכולל ארבע נקודות, ולא חמש או שבע כמקובל, נבעה מהצורך לגרום למשתתפי המחקר לתפוס עמדה כזו או אחרת.

ניתוח המענה של משתתפי המחקר כלל את חישוב ממוצע מידת ההסכמה של התלמידים עם ההיגדים. לאחר מכן תוכנן תהליך של הגדרת גורמים אשר כלל ניתוח גורמים (Factor Analysis) ונבדקה מהימנותם של הגורמים באמצעות זיהוי העקיבות הפנימית (α Cronbach's). קודם לניתוח הגורמים הוחלט כי יש להשמיט מתוך סך ההיגדים ארבעה היגדים שמספרם 5, 8, 11, 12 (נספח 4). להלן הסיבות להשמטת: היגד 5 והיגד 8 ההופכי לו: "הבנתי / לא הבנתי את התוכן המדעי במשימות הלמידה" הושמט. על פי המסגרת המושגית ידע מדעי מורכב מארבעה מרכיבים (איור 1) ומכיוון שלא ברור מהו התוכן המדעי שהתלמיד מתבקש להביע עמדתו עליו ההיגדים זוהו כלא מהימנים. שני ההיגדים הנוספים הושמטו בגלל בעיות מהימנות אחרות: היגד 11: "הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין את מאפייני המבנה הראשוני שלו" הושמט מכיוון שהתלמידים לא למדו להציג מבנה ראשוני של חלבון באמצעות Jmol, ולכן ישנו פרדוקס בהיגד שגורם לכך שתלמידים המזדהים עמו מציגים תפיסה שגויה¹². היגד 12: "שליפת קובץ מבני של חלבון מתוך מאגר מידע של מבני חלבונים, היא פעולה פשוטה עבורי כשאני מפעיל Jmol", הושמט מכיוון שהתלמידים לא התבקשו לחפש במאגר מידע למבני חלבונים (PDB) רשומה אלא רק נדרשו להזין קוד של קובץ מבני אותו קיבלו מהוראות המשימה (לדוגמה 1QJE), קוד שאותו הקלידו בחלונית Get PDB הנפתחת באמצעות שימוש בסרגל התפריטים ב-Jmol.

ניתוח הגורמים התקבץ לשלושה גורמים ברמת מהימנות מקובלת. שלושת הגורמים היוו משתנים חבויים בשאלון, הממצאים הכוללים את הטעינה של הגורמים, המהימנות, הממוצעים וסטיות התקן יוצגו בפרק התוצאות.

3.3 תצפיות

כמענה לשאלה 4 במטרת המחקר השנייה, שבדקה האם, כיצד ומדוע שני זוגות תלמידות משתי קבוצות שונות, המשתמשות ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות, רוכשות ידע מדעי אודות חלבונים במהלך שיח שהן מקיימות, נערכה תצפית משתתפת על ארבע תלמידות הלומדות במגמת מערכות ביוטכנולוגיות בכיתה י"א בשני בתי ספר מערים שונות בישראל. הזוג MR (מאי ורחל) לומדות בבית ספר בדרום הארץ. זוג הבנות, השתתף בפרויקט ביו-טק שעסק ביצור בירה ובתסיסת שמרים; הזוג SB (שלי ובטי) לומדות בבית ספר בדרום הארץ. זוג הבנות, השתתף בפרויקט ביו-טק שעסק בחלבון PON1. התצפית שבוצעה כללה

¹² במסגרת לימודיהם, תלמידים למדו לזהות ייצוגים של מבנה ראשוני באמצעות הייצוגים החזותיים המוצגים בדפי תוצאה של ארבעת הכלים הביואינפורמטיים האחרים בהם השתמשו.

השתתפות של החוקר בשיח במידה ונדרש, ועל כן מוגדרת כתצפית משתתפת (Spradley, 1980). ההשתתפות מקדמת מצד אחד מעורבות אישית של החוקר בהתנסות התלמידים במשימות מעין אלה, כך משתתפות המחקר חוות את החוקר כ-Insider. מצד שני, המשתתפות חוות את החוקר כ- Outsider בעת כהשתתפות שנמצא במקום כדי לאסוף נתונים אודות הלמידה שלהן. שילוב זה, שאותו מכנה Spradley כהשתתפות מתונה אפיין את התנהגותי בכיתות שאליהן נכנסתי לאורך כל שלב איסוף הנתונים שהתבצע באמצעות תצפיות. על כן, בכל פעם שהיה נראה שהתערבותי עלולה לפגוע בשיח, השתדלתי שלא להתערב בשיח או לדרבן את הזוגות להתקדם ללא הסיוע שלי. כאשר היה נראה שהזוג נמנע מחשיבה משותפת, או כאשר הזוג ביקש סיוע כתוצאה מהגעה למבוי סתום (לדוגמה חוסר הבנה מתמשך בידע פרוצדורלי P2), העדפתי להשתתף בשיח.

איסוף הנתונים נערך באופן הבא: שני הזוגות ענו על שתי המשימות בכיתות מחשבים בבית הספר. הזוג MR הופרד מרוב תלמידי הכיתה אשר שהו בחדר מחשבים אחר יחד עם מורתם. לזוג MR הצטרפו שישה תלמידים נוספים שהתקבצו לכיתה מחשבים נפרדת יחד עימי כדי לאפשר הקלטה ואיסוף נתונים, ללא נוכחות המורה. זוג SB שהה עם כל תלמידי כיתתו (14 תלמידים) יחד עמי ויחד עם המורה המלמדת. הנתונים נאספו במשך ארבעה שיעורים לכל זוג. שני הזוגות התבקשו לחשוב בקול תוך כדי המענה, ולא הוגבלו בקבלת סיוע על פי בקשתן. משך הזמן הכולל של המענה על משימות Jmol של זוג MR ארך 156 דקות, ואילו של זוג SB ארך 132 דקות. איסוף הנתונים נעשה באמצעות הקלטה סינכרונית של שיח הזוגות ומסך המחשב שבו עבדו, באמצעות תוכנת Screencast-O-Matic (<https://screencast-o-matic.com/>).

ניתוח הנתונים של שיח הזוגות נערך באופן הבא: נבחנה למידה אודות חלבונין של זוגות המשתמשים ב-Jmol בתיווך משימות מבוססות-מחשב, לאור ארבעת מרכיבי הידע C, P1, P2 ו-E שתוארו במסגרת המושגית עבור משימות Jmol ממוחשבות. כדי לאפיין את הלמידה מתוך שיח הזוגות, נבחרה שיטת ניתוח שתאפשר מחד לכמת את המידע המופיע בקורפוס הנתונים בלי לאבד את התמונה הכוללת, ומאידך תאפשר מיקרו-ניתוח של קטעי שיח ספציפיים (הנקראים אפיזודות) של הזוגות המנסים לענות על שאלות הדורשות מהם לייצג את מרכיבי הידע. שיטת הניתוח הוורבאלית (Chi, 1997) נמצאה כמתאימה לאפיון השיח במסגרת המגבלות שתוארו. נערך תמלול מלא של שיח הזוגות. כדי לאפיין את הלמידה באופן המייצג ביותר לא צומצמו נתונים מתוך קורפוס הנתונים שעברו תמלול במטרה להבחין במאפייני השיח במלואם. לאחר מכן, קוטעו תמלילי שיח לימודי לאפיזודות שבמהלכן ענו הזוגות על שאלות במשימות, ולאפיזודות שבמהלכן התלמידות קראו קטעי מידע. הקיטוע של השיח הלימודי נערך בהתאמה לקיטוע תוכן המשימות שנערך לצורך מענה על שאלת מחקר 1. בנוסף זוהו, קוטעו וקודדו אפיזודות אחרות שבהן הזוגות עסקו בשיח חברתי, כלומר בפעילות שאינה קשורה באופן ישיר לשאלות או לקטעי הטקסט. קידוד האפיזודות שבהן הזוגות עסקו בשיח חברתי, נעשה בגישה של Bottom-up ללא תאוריה המנסה להבהיר את אשר מתרחש. הקטגוריות שעל פי הן האפיזודות קודדו הן גורמים המשפיעים על אופי הפעילות של הלומדות. הגורמים המשפיעים יתוארו בפרק התוצאות.

בשלב הבא, נותח השיח הלימודי של התלמידות העונות על שאלות נבחרות במשימות כדי לענות על השאלה: האם התלמידות המשתמשות ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות רוכשות ידע מדעי אודות חלבונין? כיצד

ומדוע? נערך מיקרו-ניתוח של שבע אפיזודות מתוך מענה הזוגות על שאלות הקשורות לשלושה מרכיבי ידע מתוך הארבעה: P1, P2 ו-E. שנה לאחר שיה הזוגות ולאחר ניתוח ראשוני של אפיזודות המענה על שבע השאלות, בוצעו ראיונות המשך מסוג Think-aloud protocol (Patton, 2005) עם כל אחת מארבע התלמידות בנפרד. הראיונות התמקדו בבירור השיח באותן שבע אפיזודות שנבחרו למיקרו-ניתוח. כדי לזהות האם, כיצד ומדוע תלמידות רוכשות ידע מדעי, נערך מיקרו-ניתוח של שבעת האפיזודות בגישה של Top-down, נערך ניתוח על פי המסגרת התיאורטית של המודל ללמידת-תחום (Model of Domain Learning, MDL) אשר הוצע על ידי Patricia Alexander (2004) והוצג בפרק הרקע התיאורטי (תת-פרק 1.3). אלכסנדר מבחינה בין שלושה שלבים על ציר של מומחיות בלמידה של כל תחום המאפיינים לומדים לאורך חייהם: התאקלמות (Acclimation), כשירות (Competence) ומומחיות (Proficiency) וכן שלבי ביניים ביניהם (Early/Late Competence) על פי שלושה קריטריונים המגדירים את רמת המומחיות של הלומד: ידע, אסטרטגיה ועניין. חיפוש מדוקדק של שלושת הקריטריונים בשיח הזוגות ובראיונות העוקבים מייצג את הניתוח ברמת המיקרו, אשר יוצג בפרק התוצאות.

המודל ללמידת-תחום עשוי להראות את רמת המומחיות של התלמידות בהבנת נושא מבנה ותפקוד של חלבונים, שבאופן טבעי נופלת בהרבה משל מומחים בביוכימיה. מכיוון ששאלת מחקר 3 משווה בין תלמידים המקוטלגים על פי פרויקטים שונים של חקר, נערכת גם בשאלת מחקר 4 השוואה בין שני חקרי מקרה עבור הזוגות המייצגות שתי קבוצות שונות. מיקרו-ניתוח זה מאפשר לערוך השוואה בין הזוגות על פי רמת המומחיות של כל זוג בכל מרכיב ידע, באמצעות הבהרת תמונות-מצב (Snapshots) של למידה באפיזודות שונות על פי שלושת הקריטריונים המתוארים בהרחבה בתת-פרק 1.3 בפרק הרקע התיאורטי.

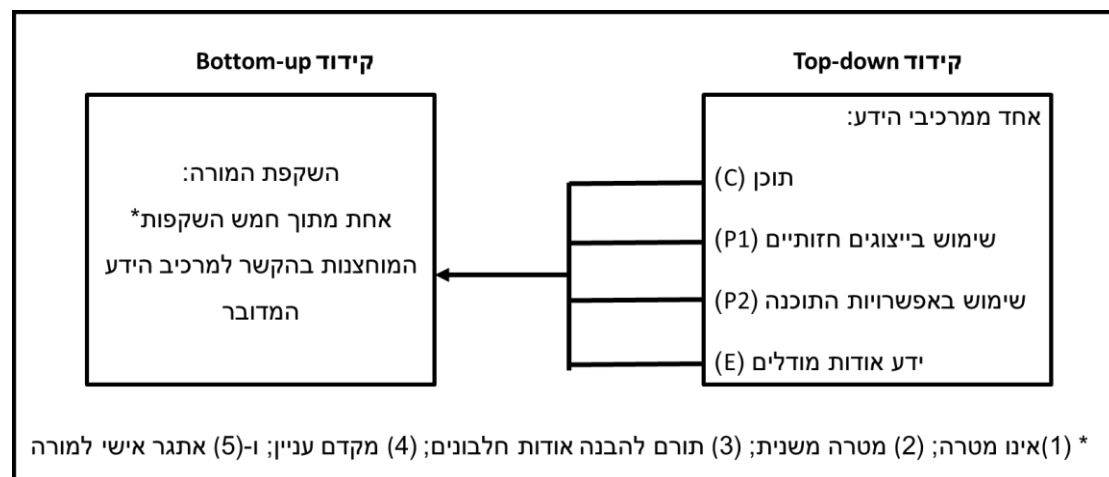
3.4 ראיונות

כדי לענות על שאלת מחקר 8 במטרת המחקר השלישית אשר בוחנת תפיסות מורים על רכישת ידע מדעי אודות חלבונים על ידי תלמידים הלומדים באמצעות Jmol, בוצעו ראיונות עם שני מורים ותיקים בסיום שנת הלימודים תשע"ו. המורים שנבחרו נכחו במרכז העשייה של קהילת מורי מערכות ביוטכנולוגיות בישראל ונשאו תפקידי הדרכת מורים באותה העת. הריאיון הוגדר כמבוסס-תוצר (Henderson, Yerushalmi, Kuo, Heller, & Heller, 2007) מכיוון שבמהלך הריאיון היו בין המראייין למרואיין כרטיסיות שבהן רשם המרואיין את השקפתו וסביב התוכן הנרשם בכרטיסיה נסוב הדיון. תוכן הכרטיסיות שבהן רשם המורה את תפיסותיו סיפק לחוקר הקשר לשאלות ששאל את המרואיינים בכל אחד מהשלבים. על כן הכרטיסיות מקבלות מעמד של תוצרים שעליהם נסוב הריאיון (פרוטוקול הריאיון מופיע בנספח 5). בתחילת הריאיון התבקש המורה לרשום, בשלוש כרטיסיות, שלש מטרות שלדעתו מושגות כתוצאה מלמידה באמצעות פעילויות שבהם משתמשים תלמידים ב-Jmol. לאחר מכן המורה התבקש להביע בהרחבה את התפיסות שלו לגבי כל אחת מהמטרות שציין בכל אחת מהכרטיסיות. בשלב השני, ניתנו למורה ארבע כרטיסיות נוספות שבהן נכתבו מראש ארבע פרקטיקות מתוך שמונת הפרקטיקות שפורסמו במסמך ה-NRC (2012). ארבעת הפרקטיקות שהופיעו בכרטיסיות היו: (א) פיתוח ושימוש במודלים; (ב) שימוש

בחשיבה מתמטית ומבוססת מחשב; (ג) ניתוח ופירוש נתונים; (ד) הבניית הסברים ועיצוב פתרונות. המורה התבקש לרשום בכרטיסיה האם מטרה זו מיושמת בכיתתו, כאשר תלמידים משתמשים ב-Jmol בתיווך המשימות הממוחשבות. לאחר מכן המורה התבקש לפרט מדוע הוא קיבל או דחה את המטרה שנכתבה בכל אחת מהכרטיסיות. בשלב השלישי, המורה התבקש לסדר את התוצרים בשבעת הכרטיסיות על פי היררכיה שאותה קבע לפי סדר החשיבות של המטרות עבורו.

השימוש בכרטיסיות ובתוכנם נבע משלושה מניעים עיקריים: הראשון הוא יצירת מסגרת המספקת למורה-קקשר להחצין את מערכת הערכים והאמונות שלו; המניע השני הוא הגברת העקביות והלכידות לרעיונות אשר המורה מעלה עקב השימוש בכרטיסיות; המניע השלישי הוא מתן ביטוי לשפה אחידה ומובנת למורה באמצעות שימוש במונחים המופיעים בכרטיסיות. כתוצאה מכך הסיכויים להטיה במחקר פוחתים (Henderson et al., 2007).

המידע שנאסף מתוך שני ראיונות עם מורים עבר ניתוח ורבלי על פי Chi (1997). בשני השלבים הראשונים, השיח צומצם וקוטע ליחידות ניתוח המספקות משמעות למקטעים. בשלב השלישי, בכל אחת מ-42 יחידות הניתוח שנמצאו זוהתה סכמת קידוד. ניתוח האפיזודות נעשה בגישה המשלבת בין קטגוריזציה של האפיזודות Top-down בהתאם לארבעת מרכיבי הידע שתוארו במסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים (איור 1) לבין תפיסה מקודדת שעלתה מתוך הנאמר על ידי המורים בכל אחת מהאפיזודות Bottom-up. ב-42 יחידות הניתוח זוהו חמש תפיסות של המורים Bottom-up: (1) מרכיב הידע אינו מהווה מטרה למידה; (2) מרכיב הידע מהווה מטרה משנית בלבד; (3) מרכיב הידע תורם להבנה אודות חלבונים; (4) מרכיב הידע מקדם עניין; ו-(5) מרכיב הידע מהווה אתגר אישי למורה. סכמת הקידוד לכל יחידת ניתוח מתוארת באיור 3.



איור 3: אפשרויות שונות של סכמת קידוד ביחידת ניתוח המתארת את תפיסת מורה את המידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים. אפשרויות שונות של סכמת קידוד ביחידת ניתוח משלבת קידוד Top-down עם קידוד Bottom-up. סכמת הקידוד מתארת את השקפתו של מורה על מרכיב ידע מסוים, על פי המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים. דוגמה לסכמת קידוד ביחידת ניתוח מסוימת: "המודה מדבר על מרכיב ידע P1 ותפיסתו על מרכיב הידע היא שמרכיב הידע תורם להבנה אודות חלבונים". בשלב הרביעי תוקפו סכמות הקידוד על ידי שני מעריכים

עד להגעה להסכמה ביניהם. בשלב החמישי מוצגת שכיחות יחידות הניתוח על פי סכמות הקידוד באופן כמותי בטבלה (הממצאים יופיעו בפרק התוצאות). מתוך הייצוג הכמותי של תפיסות המורים אודות השימוש ב-Jmol בתיווך המשימות הממוחשבות ניתן לזהות עבור כל אחד מהמורים תבנית המתארת את תפיסותיו על למידה אודות חלבונים של שתי הזוגות המשתמשים ב-Jmol בעזרת המשימות. ראיונות נוספים שנערכו במחקר, הם ראיונות המשך מסוג Think-aloud protocol (Patton, 2005) שנערכו לשני זוגות התלמידות באמצעות ניתוח ראשוני של שבע אפיזודות, כפי שתואר בתת הפרק הקודם.

-תוצאות-

1 מרכיבי הידע במשימות IPNS ו-AFP

שאלת מחקר 1 - כיצד מיוצגים מרכיבי הידע שאותם מצופה מהתלמיד לרכוש או להשתמש, בשאלות ובקטעי המידע המופיעים בתכני שתי משימות Jmol ובאיזו מידה הם מיוצגים?

לאחר פיתוח המסגרת המושגית שעיקרה הוא תיאור מרכיבי הידע, נבדקו תכני המשימות על פי נוכחותם של מרכיבי הידע השונים של הידע המדעי: ידע תוכני אודות חלבונים (C); ידע אודות שימוש בייצוגים חזותיים (P1); ידע אודות השימוש באפשרויות התוכנה (P2); וידע אודות מודלים מולקולריים ככלי מדעי (E). דוגמאות לקטעי מידע או שאלות על פי סיווגן למרכיבי ידע מוצגות בטבלה 10. ממצא מעניין שעלה מניתוח ותיקוף טקסטים בתכני המשימות, כדוגמת אלו שמוצגים בטבלה, הראה שבכל התכנים הטקסטואליים אשר זוהה בהם מרכיב ידע מסוג P1, היה נוכח מרכיב ידע C ובכל התכנים הטקסטואליים שזוהה בהם מרכיב ידע P2 או E היו נוכחים מרכיבי ידע C ו-P1. במילים אחרות, באופן שבו נכתבו התכנים הטקסטואליים נבנתה היררכיה בייצוג מרכיבי ידע, אשר באה לידי ביטוי באופן מוחצן בקטעי המידע ובמרומוז בשאלות (בטבלה 10 דוגמאות מייצגות). להוציא את מרכיב הידע C אשר עומד בפני עצמו, בכל קטע מידע או שאלה הממוקדת במרכיב ידע, נוכחים באופן מרומוז מרכיבי ידע הנדרשים גם הם לשימוש מועיל במרכיב הידע בו ממוקד הטקסט.

טבלה 10: דוגמאות לקטעי מידע ולשאלות המסווגות על פי מרכיבי ידע בתכני משימות IPNS ו-AFP

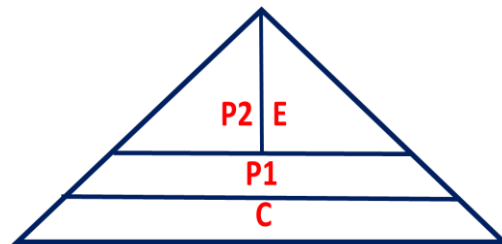
מרכיבי ידע ^א	דוגמאות לתכנים מתוך משימות Jmol ממוחשבות IPNS ו-AFP
מרכיב ידע C	שאלה פתוחה: מרבית החלבונים המסיסים במים הם בעלי מבנה דמוי כדור ולכן הם נקראים חלבונים גלובולריים. תמיסת מים המכילה בתוכה חלבונים גלובולריים תיקרא כתמיסה צלולה. דונו בינכם ושערו מדוע. התייחסו בתשובתיכם למיקומן בחלבון של חומצות אמינו הידרופוביות, שונאות מים, ושל חומצות אמינו הידרופיליות, אוהבות מים. קטע מידע: אחת ההתאמות הביוכימיות שיש לאורגניזמים החיים בסביבה קרה כל כך, היא ייצורם של חלבונים נוגדי קיפאון, (Anti-Freezing Proteins או בקיצור AFPs). זו משפחה של חלבונים אשר הודות למבנה הכימי והמרחבי שלהם, יש להם נטייה גבוהה לקשור על פני שטחם את גרעיני ההתגבשות של הקרח באופן המונע את תהליך התגבשות הקרח, וכך הם מגנים על התא מפני פגיעה. הימצאותן של מולקולות גדולות המונעות את התגבשות הקרח - כדוגמת חלבונים נוגדי קיפאון או מולקולות קטנות המעלות את ריכוז המומסים ועל ידי כך מורידות את טמפרטורת הקיפאון - הן דוגמאות להתאמות ברמה המולקולרית למחיה בסביבה שהטמפרטורות בה נמוכות.
מרכיב ידע P1	שאלת רבת ברירה: איזו מבין החומצות האמיניות הללו קושרת את יוני הסיידן? א. שתיהן - הן החומצה האמינית אספרטט (עמדה 84) והן החומצה האמינית גלוטמין (עמדה 85). ב. חומצה אמינית אספרטט ג. חומצה אמינית גלוטמין ד. אף לא אחת מן החומצות האמיניות הללו אינה קושרת את יון הסיידן, אלא חומצות אמיניות אחרות.

קטע מידע: בחלבון קיימים שלושה סוגים של מבנים שניוניים עיקריים, ואלה הם: סליל אלפא - (alpha helix) כשמו, כן הוא - מבנה סלילי כדוגמת קפיץ (הפניה לצילום מסך 3). הצורה הסלילית נוצרת בזכות קשרי מימן (קווקו לבן) הקושרים בין כל חומצה אמינית לבין החומצה האמינית הרחוקה ממנה מרחק ארבע חומצות אמינו ברצף החלבון. משטח בטא - (beta sheet) מבנה דמוי משטח הנוצר כתוצאה מקשרי מימן בין מקטעים מקבילים של השרשרת הפוליפטידית (הפניה לצילום מסך 4). כל מקטע במשטח בטא נקרא גדיל (strand). סיבוב (turn) ולולאה (loop) - מבנים אלו משנים את כיוון השרשרת הפוליפטידית (השרשרת החלבנית). הם מהווים אזורי קישור בין סלילי אלפא ובין משטחי הבטא (הפניה לצילום מסך 5).	
שאלת רבת ברירה: מהו סדר הפקודות שיש לבצע כדי להציג רק את תת-יחידה A ואת מולקולות המים הקשורות אליה? א. בחלון לוח הבקרה (Console) נקיש "Select :B:C:D" ולאחר מכן בתפריט האפשרויות הנוספות נבחר Style -> Atoms -> Off ב. בחלון לוח הבקרה (Console) נקיש "Select :A" ולאחר מכן בתפריט האפשרויות הנוספות נבחר Style -> Atoms -> Off ג. נלחץ על המקש הימני בעכבר ובתפריט האפשרויות הנוספות נבחר Select->Hetero -> All water, ואח"כ נבחר Style-> Atoms -> Off ד. בחלון לוח הבקרה (Console) נקיש "Select :B,:C,:D" ולאחר מכן בתפריט האפשרויות הנוספות נבחר Style -> Atoms -> Off קטע מידע: בתצוגת מוטות וכדורים אמנם רואים כל אטום בחלבון ואת הקשרים הכימיים בין האטומים, אך קשה להבחין מהם המבנים השניוניים הקיימים בחלבון. נחזור לסביבת העבודה Jmol ונשנה את תצוגת החלבון לתצוגת מבנה שניוני (Cartoon) ב-Jmol. נלחץ על המקש הימני של העכבר לקבלת תפריט לאפשרויות נוספות. בתפריט האפשרויות נבחר Style -> Scheme -> Cartoon	מרכיב ידע P2
תצוגת קשרים כימיים (Sticks) תצוגת נפח האטומים וקשרי קו-ורדנלס (CPK Spacefill) תצוגת מבנה שניוני (Cartoon) שאלה פתוחה: לפניכם 3 תצוגות שונות של אותו החלבון. איזו מבין התצוגות מציגה את מבנה החלבון כפי שהוא במציאות? קטע מידע: למדנו שניתן להציג את מבנה החלבון בדרכי תצוגה רבות ושכל אחת מהן ממחישה ומדגישה תכונות שונות של החלבון. לדוגמה, תצוגת המוטות והכדורים מציגה את כל האטומים ואת כל הקשרים הכימיים בין האטומים. בעזרת תצוגה זו אנו יכולים לראות חומצות אמינו בודדות. כך ראינו את מבנה האתר הפעיל. אך בתצוגה זו קשה מאוד להבחין במבנים השניוניים של החלבון. לכן בחרנו בתצוגת ה cartoon-המצגת מבנים שניוניים. ראינו שבחלבון קיימים שלושה סוגים של מבנים שניוניים - סליל אלפא, משטח בטא וכן לולאות וסיבובים המקשרים בין מבנים אלו. ניתן להציג חלבון בדרכי תצוגה נוספות שלא הזכרנו כאן, וניתן להתנסות בהן בסביבת העבודה. אך עלינו לזכור שאלו רק תצוגות שונות של המבנה, ואין זה אומר שכך נראה החלבון במציאות.	מרכיב ידע E

^a **מקרא:** C- ידע תוכני אודות חלבונים; P1- ידע אודות שימוש בייצוגים חזותיים; P2- ידע אודות השימוש באפשרויות התוכנה; E - ידע אודות מודלים מולקולריים ככלי מדעי.

כדי לתאר ממצא זה, מוצע כאן מודל דמוי מבנה פירמידה המתאר את ההיררכיה במרכיבי הידע במשימות Jmol (איור 4 בעמוד הבא). ההיררכיה אינה אמורה להציג מורכבות או חשיבות של מרכיב הידע בהשוואה למרכיבי הידע האחרים, אלא את האופן שבו מחברי המשימות מציגים בפני תלמידים מרכיב ידע אחד

המקושר למרכיב ידע אחר בקטעי המידע. ביטוי נוסף להיררכיה הוא שאלות הדורשות מהתלמידים לשלב בין מרכיבי הידע על פי המודל (איור 4) ולחשוב על מרכיב ידע אחד בהקשר של מרכיב ידע אחר. על כן, בהקשר לתכני משימות Jmol ממוחשבות, מורחבת ההגדרה של המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים באופן הבא: בבסיס הפירמידה ניצב מרכיב הידע C, בנדבך מעליו ניצב מרכיב הידע P1, ובנדבך מעליו ניצבים מרכיבי ידע P2 ו-E. על כן, בכל טקסט או שאלה שעסקה במרכיב הידע P1 היה ייצוג למרכיב הידע C. בכל טקסט או שאלה שעסקה במרכיב הידע P2 או במרכיב הידע E, היה ייצוג למרכיב הידע P1 ו-C.



איור 4: מודל המתאר את היררכיית ארבעת מרכיבי הידע בקטעי המידע ובשאלות במשימות Jmol. באיור זה מרכיבי הידע הקרובים לבסיס המשולש משתלבים עם מרכיבי הידע הנמצאים מעליהם בתכנים של משימות Jmol ממוחשבות. מקרא: C – ידע תוכני אודות חלבונים; P1 – ידע אודות שימוש בייצוגים חזותיים; P2 – ידע אודות השימוש באפשרויות התוכנה; E – ידע אודות מודלים מולקולריים ככלי מדעי.

החלק הנוסף של שאלת המחקר מברר באיזו מידה מיוצגים מרכיבי הידע במשימות. התכנים הטקסטואליים קוטעו ל-19 שאלות ול-25 קטעי מידע במשימת IPNS, ול-19 שאלות ול-20 קטעי מידע במשימת AFP. מידת הייצוג של מרכיבי הידע בתכנים של שתי המשימות מוצגים כשכיחות של מרכיבי הידע בקטעי המידע ובשאלות במשימות (טבלה 11). הממצאים מראים כי ישנם הבדלים ניכרים בשכיחות הייצוג של מרכיבי הידע P1 ו-P2 בקטעי המידע בהשוואה לשכיחותם של אותם מרכיבי הידע בשאלות בשתי המשימות. נמצא כי 46% מקטעי המידע במשימות עוסקים בשימוש באפשרויות התוכנה (P2) אך רק 18% מהשאלות דורשות מהתלמיד להשתמש בידע זה. הנטייה מתהפכת כאשר בוחנים את ייצוגו של הידע אודות השימוש בייצוגים החזותיים המופיעים במשימות ובתצוגת Jmol: רק 18% מקטעי המידע במשימות עוסקים בשימוש בייצוגים החזותיים, אך עם זאת 50% מהשאלות דורשות מהתלמיד להשתמש בידע זה.

טבלה 11: שכיחות קטעי מידע ושאלות על פי מרכיבי ידע שזוהו בשתי המשימות IPNS ו-AFP

סך קטעי המידע והשאלות שמהן מחושבת השכיחות	מספר קטעי המידע והשאלות המייצגים מרכיב ידע ושכיחות (%)				מרכיבי הידע ^א תכנים
	E	P2	P1	C	
25	(36) 9	(36) 9	(28) 7	(0) 0	קטעי מידע במשימות IPNS
20	(15) 3	(60) 12	(5) 1	(20) 4	קטעי מידע במשימות AFP
45	(27) 12	(47) 21	(18) 8	(9) 4	קטעי מידע בשתי המשימות
19	(10) 2	(16) 3	(58) 11	(16) 3	שאלות IPNS
19	(11) 2	(21) 4	(41) 8	(26) 5	שאלות AFP
38	(11) 4	(18) 7	(50) 19	(21) 8	שאלות בשתי המשימות

^א מקרא: C- ידע תוכני אודות חלבונים; P1- ידע אודות שימוש בייצוגים חזותיים; P2- ידע אודות השימוש באפשרויות התוכנה; E - ידע אודות מודלים מולקולריים ככלי מדעי.

ממצאים אלה שופכים אור על האופן שבו עוצבו המשימות כדי ללמוד את נושא החלבונים במסגרת המשימות הממוחשבות. אף שלקטעי המידע תפקיד חשוב בסיוע ובהכוונת התלמיד לרכישת ידע משמעותי אודות שימוש באפשרויות תוכנת Jmol (P2), ניכר שהתכנון של כותבי המשימות הוא שתלמידים בעיקר יפתחו בעצמם מבני ידע אודות שימוש בייצוגים חזותיים (P1). שכיחות קטעי המידע מלמדת שהדרכה בשימוש באפשרויות תוכנת Jmol (P2) היא מטרה מרכזית של מפתחי המשימות (46% מקטעי המידע), ולעומת זאת מפתחי המשימות אינם שמים את הדגש בהבניית ידע של התלמיד בהקשר למרכיב הידע P2 (18% מהשאלות). המגמה מתהפכת עבור שימוש התלמידים בייצוגים חזותיים P1 (18% מקטעי המידע ו-50% מהשאלות עוסקות ב-P1). שני מרכיבי הידע האחרים (C ו-E) מקבלים ייצוג נמוך יותר הן בקטעי המידע והן בשאלות. הסיבה לכך ש-C מקבל ייצוג נמוך להיות המרכזיות של המודלים המולקולריים המוצגים ב-Jmol על ידי התלמידים אשר מייצרת שאלות שאינן מגיעות בהקשר של ייצוגים חזותיים. במשימת IPNS אין כלל קטעי מידע שעוסקים במבנה ותפקוד חלבון (C) ללא הקשר לייצוגים החזותיים. הייצוג הנמוך יחסית של מרכיב הידע E בתכני המשימה מלמד על כך שהמטרה העיקרית שהציבו המפתחים יכולה להיות רכישת ידע אודות חלבונים כאשר המודלים מסייעים בכך, כאשר הזרקור מכוון לעבר הבנה אודות מודלים מולקולריים בהזדמנויות ספורות בלבד.

ממצאי הניתוח לשאלת מחקר זו מתארים את שכיחות הטקסטים במשימות, קטעי מידע ושאלות, ומספקים הקשר לקיומם של תהליכי למידה אשר יתוארו באמצעות מיקרו-ניתוח בתת-הפרק 2.2 בהמשך. כך לדוגמה, שאלה, שבה נדרש ייצוג של מרכיב ידע P2 המסתמך על מרכיבי הידע C ו-P1 (איור 4), עשויה לקדם למידה שבה התלמידים משלבים בין שלושת מרכיבי הידע במענה על השאלה, אך גם עלולה להוביל לשיח עקר שבו אין התייחסות לשני מרכיבי ידע אלו שעליהם מתבסס מרכיב הידע P2. שיח התלמידים

במקרה זה אינו דומה כלל לשיח העשיר הקיים בפרקטיקה המדעית, אשר כולל שילוב של ארבעת מרכיבי הידע. בשיח תיאורטי זה התלמידים עשויים להציג עיסוק טכני ומנותק מהקשר במרכיב הידע P2. דוגמה תיאורטית נוספת היא חשיבות הקריאה המעמיקה של קטעי המידע כאסטרטגיה מועילה של לומדים. הצגת ממצאים מתוך ניתוח המשימות, עשויה לקדם הבנה מחקרית אודות שיח תלמידים בהקשר של מענה על שאלות, בהתייחס לקריאת קטעי המידע במשימות הממוחשבות שבהן תלמידים משתמשים ב-Jmol.

2 למידה של משתמשי Jmol בתיווך המשימות הממוחשבות

בתת-פרק זה מוצגים הממצאים עבור מטרת המחקר השנייה. בשלב הראשון מוצגים הממצאים הכמותיים הנוגעים להישגי לומדים מקבוצות שונות המשתמשים ב-Jmol וכן נערכות השוואות ביניהם (כמענה לשאלת מחקר 2 ו-3). בשלב השני מתוארים הממצאים האיכותניים הנוגעים לאפיון רכישת ידע מדעי של משתמשי Jmol מקבוצות שונות (כמענה לשאלת מחקר 4).

2.1 ניתוח כמותי של הישגי לומדים משתמשי Jmol מקבוצות שונות

שאלה 2 - האם בעקבות השימוש במשימות הממוחשבות של Jmol חל שינוי בידע הלומדים אודות חלבונים?

כדי לבדוק את השפעתן של משימות Jmol ממוחשבות על הישגי לומדים אודות חלבונים, נבדק הידע המדעי של שתי קבוצות לומדים, A ($n=33$) ו-B ($n=37$), באמצעות מבדקים אשר מעריכים את מרכיב ידע C אודות מבנה חלבון, תפקוד חלבון ומבנה ותפקוד חלבון ומבדקים המעריכים את מרכיב הידע P1 אודות פענוח ובניית מודל מולקולרי של חלבון (פירוט שני מרכיבי הידע וחמשת תתי-מרכיבי הידע מופיע בטבלה 4 בפרק המתודולוגיה). הממצאים מוצגים לכל אחת מהקבוצות, A ו-B, בנפרד וללא השוואה ביניהם שתיערך בהמשך כמענה על שאלת המחקר 3.

ידע אודות חלבונים לאחר שימוש במשימות Jmol נבדק בשיטת MANOVA (multivariate analysis of variance) המשווה בין ציוני המבדקים לפני ולאחר השימוש במשימות Jmol תוך בחינה של חמשת תתי מרכיבי הידע יחדיו. הניתוח מצביע על השפעה חיובית מובהקת של השימוש במשימות Jmol על הישגי לומדים בקבוצה A ($Wilks's \lambda=0.302$; $F=12.91$; $df=5,28$; $p<.0001$) ומכאן על רכישת ידע אודות חלבונים. ניתוח של כל אחד מחמשת תתי מרכיבי הידע (שתוארו בפרק השיטות) באמצעות מבחני t מזווגים עבור השוואת ציוני מבדקים של תלמידי קבוצה A לפני ולאחר השימוש במשימות ב-Jmol מראה כי היה הבדל מובהק בציוני התלמידים עבור כל אחד מהמשתנים המייצגים תת-מרכיבי ידע (טבלה 12): ידע אודות מבנה חלבון; ידע אודות תפקוד חלבון; ידע אודות הקשר בין מבנה לתפקוד חלבון; מיומנות בפענוח ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים וכן מיומנות בבניית ייצוגים חזותיים במודלים. ציונים מקסימליים ניתן לקבל רק כאשר רמת המומחיות של הלומד במבנה ותפקוד של חלבון גבוהה. כאשר בודקים את הציונים הממוצעים של תלמידי קבוצה A בהשוואה לציונים המקסימליים שניתן לקבל, אפשר לזהות שלמרות השיפור המובהק שהתקבל בציוני המבדקים, עדיין התלמידים לא קרובים לציונים המקסימליים. לכן, גם לאחר השימוש במשימות Jmol, תלמידים רבים עדיין לא מציגים ידע משכנע אודות חלבונים.

טבלה 12: ערכים סטטיסטיים המשווים בין מבדקי תלמידים לפני ולאחר השימוש במשימות Jmol

גודל ההשפעה (Cohen's d)	t-test מזווג להשוואת מבדקי Pre-Post (t Value)	ציוני מבדקים של קבוצה A (n=33)*		מרכיב ידע ותתי-מרכיבי ידע
		מבחן Post ממוצע (סטיית תקן)	מבחן Pre ממוצע (סטיית תקן)	
מרכיב ידע C				
0.75	**4.31	(1.17) 2.45	(1.43) 1.39	מבנה חלבון
0.73	**4.18	(1.6) 2.6	(1.79) 1.273	תפקוד חלבון
0.71	**4.07	(1.55) 2.88	(1.75) 1.48	הקשר בין מבנה לתפקוד חלבון
מרכיב ידע P1				
0.65	**3.75	(0.97) 3.242	(1.00) 2.57	פענוח ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים
0.57	**3.26	(1.78) 2.70	(1.55) 1.97	בניית ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים
גודל ההשפעה (Cohen's d)	t-test מזווג להשוואת מבדקי Pre-Post (t Value)	ציוני מבדקים של קבוצה B (n=37)*		מרכיב ידע ותתי-מרכיבי ידע
		מבחן Post ממוצע (סטיית תקן)	מבחן Pre ממוצע (סטיית תקן)	
מרכיב ידע C				
0.47	*2.83	(1.30) 3.03	(1.72) 2.16	מבנה חלבון
0.04	0.22	(1.48) 2.57	(1.66) 2.51	תפקוד חלבון
0.14	0.87	(1.60) 3.16	(1.79) 2.95	הקשר בין מבנה לתפקוד חלבון
מרכיב ידע P1				
0.63	**3.80	(1.05) 3.30	(1.12) 2.54	פענוח ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים
0.32	1.97	(1.09) 4.24	(1.09) 3.92	בניית ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים

* $0.01 < p < 0.05$

** $0.001 < p < 0.01$

* הציונים המקסימליים שניתן לקבל בחמשת המבדקים הוא: 5 עבור מבנה חלבון; 5 עבור תפקוד חלבון; 5 עבור הקשר בין מבנה לתפקוד חלבון; 6 עבור פענוח ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים; 10 עבור בניית ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים (מחוננים מופיעים בפרק השיטות). קבוצה A השתתפה בפרויקט מחקרי שנושאו בדיקת פעילות שמרים וקבוצה B השתתפה בפרויקט מחקרי שעסק במבנה ותפקוד של חלבון PON1.

ידע אודות חלבונים לאחר שימוש במשימות Jmol נבדק בשיטת MANOVA גם בקבוצה B. ה-MANOVA מראה השפעה חיובית מובהקת של השימוש במשימות Jmol על הישגי הלומדים ומכאן על רכישת ידע אודות חלבונים ($Wilks's \lambda=0.488; F=6.69; df = 5,32; p = .0002$). למרות שנראה שיפור מובהק בציון הכללי במבדקים, ניתוח של כל אחד מחמשת תתי מרכיבי הידע באמצעות מבחני t מזווגים עבור השוואת ציוני מבחנים של תלמידי קבוצה B לפני ולאחר השימוש במשימות Jmol מראה כי היה הבדל מובהק בציוני התלמידים רק עבור שניים מתוך חמשת תתי-מרכיבי הידע: ידע אודות מבנה חלבון ומיומנות בפענוח ייצוגים חזותיים במודלים. בשלושת המבדקים הנוספים שבדקו את שלושת תתי-מרכיבי הידע האחרים שהם ידע אודות תפקוד חלבון, הקשר בין מבנה לתפקוד חלבון ומיומנות בבניית ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים לא נצפה הבדל מובהק בין ציוני המבחנים שקדמו לשימוש במשימות Jmol לבין ציוני המבחנים שלאחר השימוש במשימות (טבלה 12). כאשר בודקים את הציונים הממוצעים של תלמידי קבוצה B בהשוואה לציונים המקסימליים שניתן לקבל, אפשר לזהות שלמרות השיפור המובהק שהתקבל בציוני המבדקים, עדיין התלמידים לא קרובים לציונים המקסימליים. לכן, גם לאחר השימוש במשימות Jmol, תלמידים רבים עדיין לא מציגים ידע משכנע אודות חלבונים.

המסקנה העיקרית העולה מתוך ממצאים אלו היא ששתי קבוצות התלמידים, A ו-B, הראו שיפור ניכר בהישגיהם המלמדים על רכישת ידע אודות חלבונים לאחר שהשתתפו וענו על שתי משימות Jmol. על אף השיפור, הממוצעים מלמדים על כך שתלמידים עדיין רחוקים מאוד מהישגים מקסימליים ועל כן לא ניתן לומר שהתלמידים בשתי הקבוצות הם בעלי רמת מומחיות גבוהה במבנה ותפקוד חלבונים.

שאלה 3 - האם ישנם הבדלים בהישגי שתי קבוצות לומדים, הנבדלים ביניהם בפרויקט החקר, לאור השימוש במשימות הממוחשבות של Jmol?

מתוך ממצאי ה-MANOVA עבור שאלת המחקר הקודמת ניתן היה להסיק כי הישגי התלמידים בקבוצה A אשר למדו אודות חלבונים בכיתתם טרם השתתפותם במענה על משימות Jmol, אך לא השתתפו בפרויקט מחקרי שעסק במבנה ותפקוד של חלבונים, השתפרו. מכאן ניתן להסיק כי הם רכשו ידע אודות חלבונים כתוצאה מהשתתפותם במענה על משימות Jmol. הישגי תלמידי קבוצה B אשר השתתפו בפרויקט מחקרי שעסק במבנה ותפקוד של חלבון PON1 גם הם השתפרו. וניתן להסיק כי גם הם רכשו ידע אודות חלבונים בעקבות השימוש במשימות Jmol. עם זאת הישגיהם השתפרו באופן מובהק רק בשניים מתוך חמשת תתי-מרכיבי הידע (תתי-מרכיבי הידע מסוכמים בטבלה 4). אם כך, האם ישנם הבדלים בהישגי שתי הקבוצות, העולים מתוך המבדקים ובחמשת תתי-מרכיבי הידע לאור ההבדל בין הקבוצות בפרויקט החקר? מענה לשאלה זו נבחן משני כיוונים: ראשית באמצעות השוואה בין ציוני מבחנים מקדימים ושנית באמצעות השוואת השיפור של שתי הקבוצות בעקבות השימוש במשימות Jmol:

נערכה השוואה בין ציוני המבחנים המקדימים של שתי הקבוצות באמצעות שיטת MANOVA המשווה בין ציוני המבדקים של קבוצות A ו-B במבדק שנערך לפני השימוש במשימות Jmol תוך בחינה של חמשת תתי מרכיבי הידע יחדיו. שיטת MANOVA מראה באופן מובהק כי קבוצה B הציגה ידע נרחב יותר אודות

חלבונים טרם השימוש במשימות Jmol בהשוואה לקבוצה A ($Wilks's \lambda=0.604$; $F=8.39$; $df = 5,64$; $p < 0.0001$). היתרון של קבוצה B בידע המוקדם של הלומדים אודות חלבונים טרם השימוש במשימות Jmol אינו מפתיע לאור ההבדלים בתכני הפרויקטים וזאת על אף שבשלושת בתי הספר A1-3 הקפידו המורים ללמד אודות מבנה ותפקוד חלבונים טרם המענה על השאלון המקדים.

טבלה 13: ערכים סטטיסטיים המשווים בין מבדקים שתי קבוצות לפני השימוש במשימות Jmol

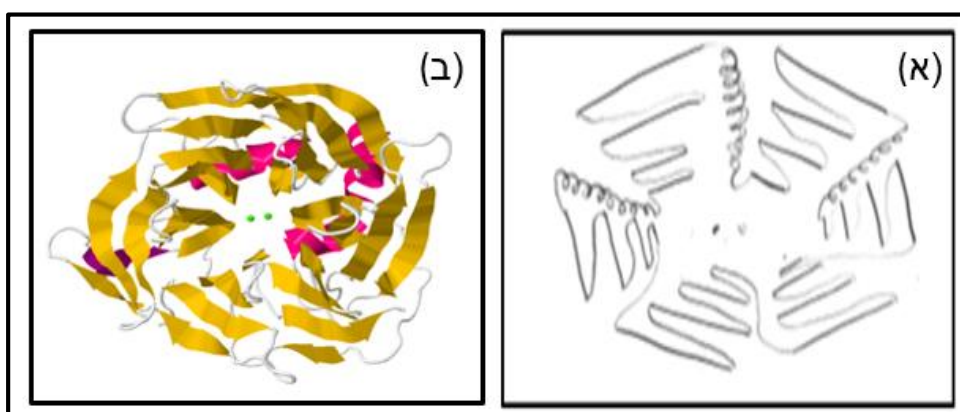
מרכיב ידע ותתי-מרכיבי ידע	ציוני מבדקי Pre של קבוצה A* (n=33)	ציוני מבדקי Pre של קבוצה B ² (n=37)	t-test לא מזווג להשוואת מבדקי Pre בין שני הקבוצות (t Value)
מרכיב ידע C			
מבנה חלבון	1.39 (1.43)	2.16 (1.72)	*2.01
תפקוד חלבון	1.273 (1.79)	2.51 (1.66)	**3.01
הקשר בין מבנה לתפקוד חלבון	1.48 (1.75)	2.95 (1.79)	**3.44
מרכיב ידע P1			
פענוח ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים	2.57 (1.00)	2.54 (1.12)	0.14
בניית ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים	1.97 (1.55)	3.92 (1.09)	**6.02

* $0.01 < p < 0.05$

** $0.001 < p < 0.01$

^{*} קבוצה A השתתפה בפרויקט מחקרי שנושאו בדיקת פעילות שמרים
² קבוצה B השתתפה בפרויקט מחקרי שעסק במבנה ותפקוד של חלבון PON1.

בנוסף, מבחני t שנערכו למדגמים לא תלויים מראים כי הישגיהם של התלמידים מקבוצה B נמצאו גבוהים יותר באופן מובהק בהשוואה להישגי תלמידים מקבוצה A עבור ארבעה מתוך חמישה משתנים המייצגים תת-מרכיבי ידע: ידע אודות מבנה חלבון; ידע אודות תפקוד חלבון; ידע אודות הקשר בין מבנה לתפקוד חלבון וכן במיומנות כבניית ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים (טבלה 13).



איור 5: השוואה בין ציור של תלמיד מקבוצה B המייצג מולקולת חלבון דומה למבנה חלבון PON1 (א) לבין תצוגת Cartoon המוצגת ב-JSmol באתר PDB (ב). בציור התלמיד ובתצוגה ניתן לראות שישה מתחמים דמויי פרופלור הכוללים משטחי בטא וכן שלושה סלילי אלפא.

עיון בממצאים החזותיים העולים מתוך הציורים של מולקולות החלבון מראה כי חלק מהתלמידים בקבוצה B ניסו לייצג מולקולת חלבון בציורים שלהם טרם ולאחר השימוש ב-Jmol כבעלי מבנה הכולל מספר מתחמים בעלי מבנה משותף של פרופלור, בדומה למבנה המפוענח של חלבון PON1 (איור 5 ב'). תלמידים מעטים אף ממש זכר במדויק את אחד מהייצוגים החזותיים שהוצגו בפניהם בתיאטרון המולקולרי של מכון המחקר כחלק מפרויקט המחקר (דוגמה באיור 5). לעומת זאת, במבדק שבו נבדקה מיומנות פענוח ייצוגים חזותיים במודלים מולקולריים נמצא כי הציונים אינם שונים באופן מובהק בין שתי הקבוצות טרם השימוש במשימות Jmol, וזאת על אף שקבוצה B השתתפה בפרויקט החקר שעסק במבנה ותפקוד של חלבון PON1 וניתנה לה הדרכה על מבנה החלבון תוך הצגת המודל המולקולרי שלו.

ממצא כמותי נוסף הוא השוואת השיפור של שתי הקבוצות בעקבות השימוש במשימות Jmol. ההשוואה בין שתי הקבוצות נערכה על ההפרשים הממוצעים שהתקבלו בין ציוני המבחנים המקדימים ולציוני המבחנים המאחרים, והיא נועדה לבחון את ההבדל במבט על בין שתי הקבוצות, A ו-B, לאור השימוש במשימות Jmol. ההשוואה נערכה באמצעות שיטת MANOVA המשווה בין ההפרשים בממוצעי המבדקים של קבוצות A ו-B לפני ולאחרי השימוש במשימות Jmol תוך בחינה של חמשת תתי מרכיבי הידע יחדיו. שיטת ה-MANOVA מראה על הבדל מובהק בהבדלים בין הקבוצות. קבוצה A הראתה שיפור מובהק בהשוואה לשיפור שהראתה קבוצה B ($Wilks's \lambda=0.773; F=3.74; df=5,64; p=.0049$). מכאן ניתן להסיק שהשימוש במשימות Jmol סייע יותר לתלמידים שלא השתתפו בפרויקט שהתמקד במבנה ותפקוד של חלבון, בהשוואה לתלמידים שהשתתפו בפרויקט שהתמקד במבנה ותפקוד של חלבון PON1.

2.2 אפיון רכישת ידע מדעי של משתמשות Jmol מקבוצות שונות

מיקרו-ניתוח שיח מתוך תצפית משתתפת וניתוח ראיונות המשך נועד כדי לענות על שאלת המחקר הבאה:

שאלה 4 - האם שני זוגות תלמידות המשתמשות ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות רוכשות ידע מדעי אודות חלבונים במהלך השיח שהן מקיימות? כיצד ומדוע?

ארבעת המשתתפות שעבורן נותח שיח ונערכו ראיונות המשך הן הזוג MR מבית-ספר A2 ואשר שייכות לקבוצה A והזוג SB מבית-ספר B2 השייכות לקבוצה B.

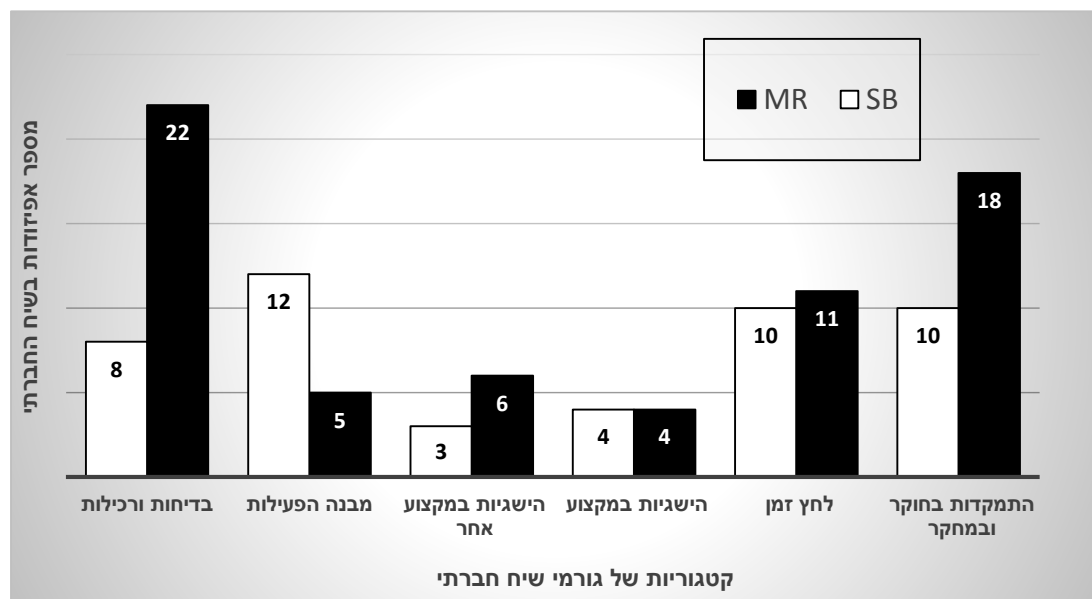
ניתוח הממצאים הנוגעים לשאלת מחקר 5 מוצג בשני שלבים: בשלב הראשון מוצגים ממצאים מתוך קידוד האפיזודות שבהן הזוגות עסקו בשיח שאינו לימודי, כלומר שיח שאינו קשור באופן ישיר לשאלות או לקטעי המידע. ניתוח שיח זה נעשה בגישה של Bottom-up, כלומר ללא תאוריה המנסה להבהיר את אשר מתרחש. בשלב זה מזהים גורמים המשפיעים על שיח הזוגות וכן מקודדת רמת ההתעמקות בקריאת קטעי המידע. בשלב השני מוצגים ממצאים העולים מניתוח שיח לימודי בשבע אפיזודות Top-down, על פי המסגרת התיאורטית של המודל ללמידת-תחום (Model of Domain Learning, MDL) שהוצע על ידי Patricia Alexander (2004). כל אפיזודה מסווגת למרכיב ידע מתוך המסגרת המושגית המתארת מידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים ותוצאתה הרצויה היא רכישת ידע מדעי אודות חלבונים. על אף שגישת

הניתוח בשלב השני היא Top-down, ממצאי הניתוח הראשוניים עשויים להסביר ולייצר הקשר לניתוח השיח הלימודי בשבעת האפיזודות.

2.2.1 שלב ראשון: גורמים המשפיעים על שיח הזוגות

כפי שצוין בפרק השיטות, שני הזוגות נדרשו לקרוא 45 קטעי מידע ולענות על 38 שאלות (19 שאלות לכל משימה), מתוכן 16 שאלות פתוחות ו-22 רבות ברירה בשתי המשימות. שני הזוגות הקפידו לענות על כל השאלות, וכן הקפידו לקרוא לפחות 80% מקטעי המידע. התלמידות קיימו שיח משותף לאורך כל שלבי המשימה להוציא מקרים מועטים שבהן אחת מבנות-השיח לקחה אחריות באופן בלעדי על המענה לשאלה ללא השתתפות בת-הזוג. לעיתים שני הזוגות הסתייעו בי כדי להתקדם במשימה באופן מועיל וביקשו סיוע לפני, תוך כדי ולאחר מענה על שאלות. במרבית הפעמים ביקשו הזוגות להבהיר מדוע תשובתם לא נכונה ובמיעוט המקרים הן קראו לי לסיוע טכני. הזוג MR קרא לי 17 פעמים ואילו הזוג SB קרא לי 14 פעמים. בהתאם לצורך ומתוך מחויבות לתצפית משתתפת, בחרתי להתערב בשיח של MR שבע פעמים ובשיח של SB שלוש פעמים, בנוסף לפעמים בהן ביקשו התלמידות את עזרתי.

לעיתים התלמידות קיימו שיח חברתי. הגורמים הבאים נמצאו בשיח חברתי וסווגו לקטגוריות נפרדות: עצם קיום המחקר ונוכחות החוקר במקום, בדיחות ורכילות, אורך המשימות ואילוצי הזמן, הישגיות התלמידות במקצוע מערכות ביוטכנולוגיות או במקצועות אחרים הנלמדים בבית-הספר ומבנה הפעילות. להלן שכיחות האפיזודות אשר קודדו על פי כל אחד מהגורמים המוחצנים בשיח (איור 6).

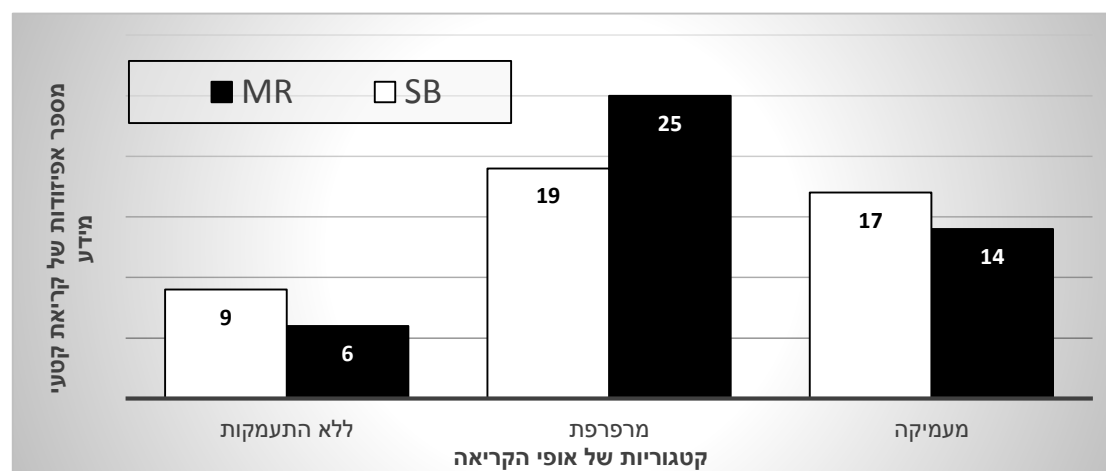


איור 6: אופי השיח החברתי של הזוגות כפי שהוא מתואר מתוך שכיחות האפיזודות המחציות גורמים שונים בשיח החברתי. עבור הזוג MR נצפו בסך הכול 66 אפיזודות ועבור הזוג SB נצפו בסך הכול 47 אפיזודות

הלמידה התקיימה בשעות אחר הצהריים, בשיעורים האחרונים ובסופו של יום לימודים ארוך, והשעה המאוחרת והעייפות היוו גורם מכריע לאיכות הלמידה של שני הזוגות ועל כן נצפו אפיזודות רבות הקשורות ללחץ זמן בו היו נתונות התלמידות. שנית, השיח הלימודי הפך לחברתי בין בנות הזוג ועם זוגות נוספים ששהו עימם בכיתה והתמקד בבדיחות ורכילות אשר נועדה כנראה לפריקת לחצים (בעיקר עבור הזוג MR)

ולאור העייפות של סוף יום הלימודים. שלישית, נצפו אפיזודות שעצרו את השיח הלימודי לטובת השוואות הקשורות להישגי התלמידות במקצוע מערכות ביוטכנולוגיות או במקצועות אחרים. רביעית, בחלק מהאפיזודות שנצפו היו הערות אגב הקשורות למבנה המשימה שהוטמעה במערכת Moodle (בעיקר אצל הזוג SB). סוג אחרון של אפיזודות שיח שאינן קשורות ישירות למענה על המשימה, שנצפה בקרב שני הזוגות, היה התייחסויות הנוגעות לחוקר או למחקר. בחלק מהאפיזודות התלמידות הביעו תמיהה ומבוכה על עצם היותן מוקלטות (על אף הסכמתן), ובחלק מהאפיזודות הראו מאפיינים של ריצוי החוקר (בעיקר הזוג MR). ראוי לציין שעבור הזוגות, איסוף נתונים היה אירוע ייחודי בשגרת הלמידה הבית ספרית, ועצם איסוף הנתונים גרם להם לעיתים לקטוע את השיח הלימודי.

על אף שההשתתפות במענה על המשימות היה רצוף קטיעות בשיח הלימודי, בתחילת כל מענה על משימה הראו בנות-השיח בשני הזוגות מוטיבציה חיצונית הנובעת מריצוי או מוטיבציה פנימית שמקורה ברצון לרכוש ידע חדש אודות חלבונים. על כן הקפידו בנות הזוג על קריאת קטעי מידע בקול וזאת על אף שקריאת קטעי המידע דרשה מהן מאמץ קוגניטיבי ניכר. בחלוף הזמן, ולאור השוואה עם זוגות סמוכים, שני הזוגות החלו לקרוא קטעי מידע באופן מרפרף ושטחי. באיור 7 מוצגת התפלגות אופי הקריאה של קטעי מידע של שני הזוגות בשתי המשימות. הממצאים אודות אופי הקריאה מעידים על הבדלים מינוריים בוויסות-עצמי (Self-regulation) בלמידה של שני הזוגות. אף שבנות הזוג MR קראו שלושה קטעי מידע יותר מהזוג SB (9 קטעי מידע שלא נקראו על ידי הזוג SB בהשוואה ל-6 קטעי מידע שלא נקראו על ידי הזוג MR, איור 7), הן קראו יותר קטעי מידע באופן שטחי ומרפרף מהזוג SB (25 קטעים בהשוואה ל-19 קטעים). אופי קריאה זה מלמד על הבדלים מסוימים בוויסות-העצמי של שני זוגות התלמידות. הזוג MR הראה מאפיינים של קריאה שטחית בהשוואה לזוג SB, אך גם משך הזמן הכללי למענה על המשימות עבורו היה ארוך יותר (156 דקות לזוג MR בהשוואה ל-132 דקות לזוג SB). העיסוק החברתי המוגזם של בנות הזוג MR והתמקדות נכרת במאפייני המחקר ובחוקר (איור 6) לצד הקריאה השטחית (איור 7) והזמן הרב שנדרש מהן לסיים את המשימות הם ממצאים המצביעים על קושי בוויסות העצמי של הזוג MR בהשוואה לזוג SB.



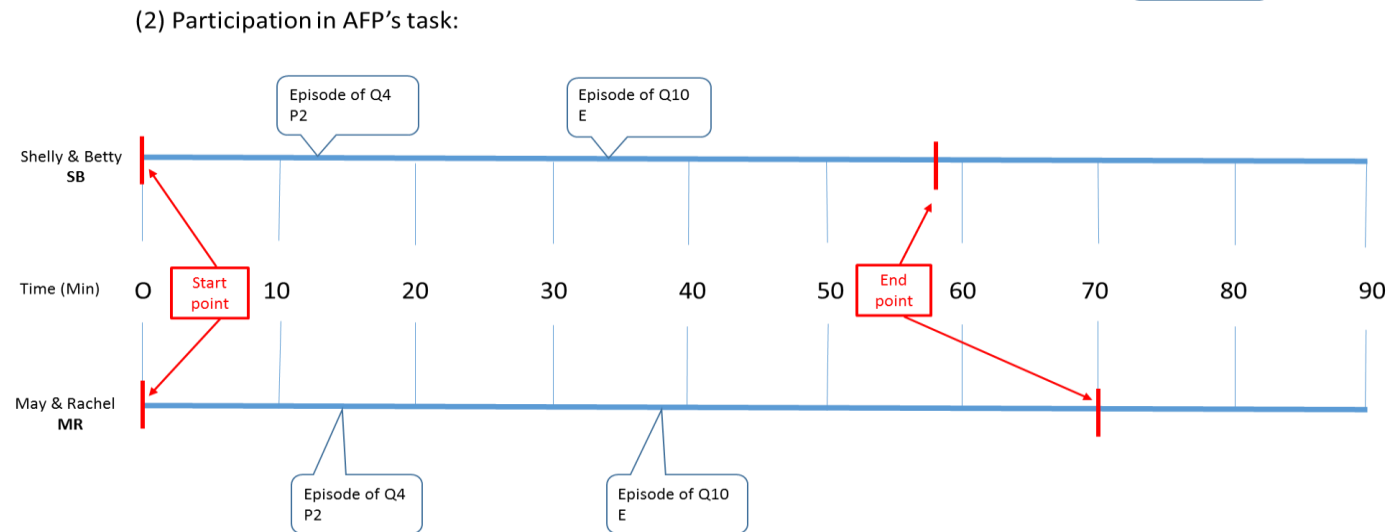
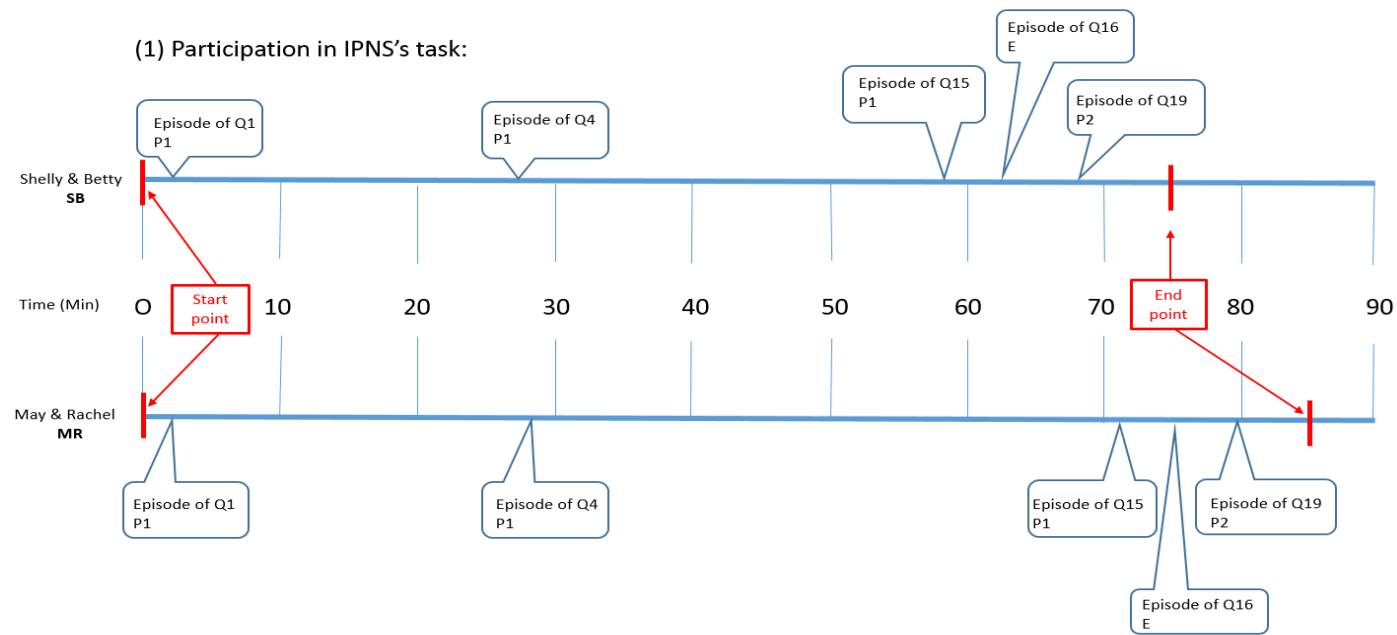
איור 7: התפלגות אפיזודות הקריאה של קטעי המידע על פי רמת ההתעמקות של הזוגות MR ו-SB. בהן. הזוגות התבקשו לקרוא 45 קטעי מידע סך הכול

2.2.2 שלב שני: ניתוח שיח זוגות וראיונות-המשך לאפיזודות המייצגות למידה הקשורה למרכיבי ידע

סיווגן של שבע אפיזודות שנבחרו מתוך שיח לימודי של שתי בנות-זוג נערך על פי מרכיב הידע שנדרש למענה על השאלה, וניתוח ידע עבור כל אחד מהזוגות כשני חקרי מקרה נפרדים, נערך כמענה לשאלת המחקר הבוחנת כיצד ומדוע נרכש ידע מדעי (במידה ונרכש) בקרב שני זוגות תלמידות המשתמשות ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות. בנספח 6 ניתן למצוא קישורים לסרטוני וידאו קצרים הכוללים הקלטות קול ומסך מחשב של הזוגות בשבע האפיזודות המנותחות. כדי לקדם מענה על שאלה זו, נותחו שבע אפיזודות המייצגות מרכיבי ידע שונים על פי המודל ללמידת-תחום (MDL) על פי Alexander (2004). מודל זה מציג שלושה שלבי התמחות של לומדים לאורך חייהם: שלב התאקלמות, שלב כשירות ושלב מומחיות. את השלב שבו נמצאת כל תלמידה ניתן לבחון על פי שלושת הקריטריונים: ידע, אסטרטגיה ועניין (להרחבה ראה תת-פרק 1.3 בפרק הרקע התיאורטי). שיח הזוגות נותח בכל אחת מהאפיזודות ובוצעו ראיונות המשך לשיח, עם כל אחת מהתלמידות.

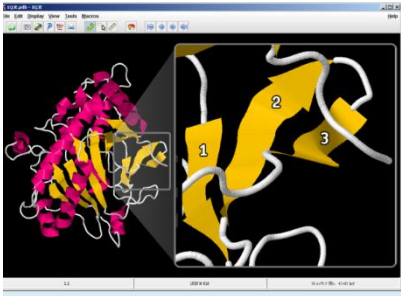
בטבלה 14 (עמודים 86-90) מוצגות שבע שאלות מתוך שלושים ושמונה שאלות שמופיעות במשימות Jmol. השאלות מסווגות על פי מרכיבי-הידע במסגרת המושגית בהתאם לממצאי שאלת מחקר 1, והשאלות התפלגו באופן הבא: שלוש שאלות דרשו מהזוגות להציג שיח הכולל את מרכיב הידע P1, שתי שאלות דרשו מהזוגות להציג בשיח את מרכיב הידע E ושתי אפיזודות דרשו מהזוגות להציג בשיח את מרכיב הידע P2.

כפי שתואר בפרק המתודולוגיה (פרק 3.3), נתוני השיח נאספו באמצעות תצפית משתתפת במשך ארבעה שיעורים לכל זוג. איור 8 בעמוד הבא מציג את רצף אפיזודות השיח כמענה על 7 שאלות, על ציר-זמן במהלך התקדמות המענה של שני הזוגות במשימות.



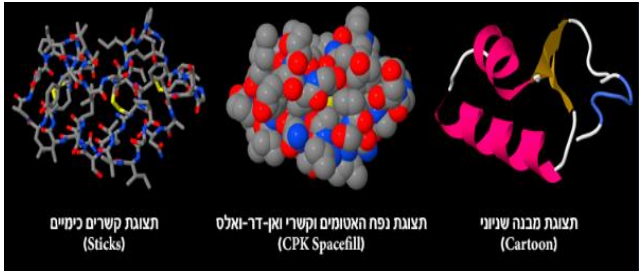
איור 8: רצף אפיזודות השיח על ציר זמן במהלך התקדמות המענה של שני הזוגות, MR ו-SB, על המשימות לפי הרצף הבא: (1) IPNS ו-(2) AFP. מקרא: Q1 - שאלה; P1, P2, E - רכיב ידע הנדרש למתן מענה על השאלות כפי שסווגו בשאלת מחקר 2

טבלה 14: שאלות במשימות Jmol שעבורן נותח שיח שני הזוגות ובוצעו ראינות עם התלמידות, וסיווגן על פי מרכיבי ידע

מספר שאלה	שאלה	מידע המתווסף לשאלה במשימה	מרכיב הידע המסווג עבור השאלה ¹³
IPNS שאלה 1	כיצד ייתכן שהאתר הפעיל של האנזים IPNS מורכב מחומצה אמינית היסטידין בעמדה 270, הרחוקה כמעט 60 חומצות אמינו מעמדות 214 או 216 שבהן ממוקמות שאר החומצות המרכיבות את האתר הפעיל? האם נובע מכך שהאתר הפעיל משתרע על פני אזור גדול באנזים?	איור (ראה מטה) המציג מבנה ראשוני של חלבון ששלושת חומצות האמינו של האתר הפעיל מודגשות בו 	P1
IPNS שאלה 4	במבנה האנזים ניתן להבחין בשני משטחי בטא; במשטח אחד קיימים 3 גדילים (מסך 5). כמה גדילים קיימים במשטח השני? בחרו תשובה אחת: א. גדיל אחד ב. שלושה גדילים ג. שמונה גדילים ד. לא ניתן לדעת	איור (ראה מטה) המציג תצלום מסך שבו תצוגה המראה כיצד באנזים ה-IPNS קיימים שני משטחי בטא. בצד ימין ניתן לראות הגדלה של משטח בטא המסומן בריבוע אפור, כאשר כל גדיל בטא ממוספר. במקביל, מופיע מידע חזותי מתצוגת Jmol שהזוגות הציגו. 	P1

¹³ מרכיבי הידע בשאלות סווגו עבור מטרת המחקר הראשונה, שאלת מחקר 2, ועל כן סיווג זה אינו ממצא הנובע משאלת מחקר 5.

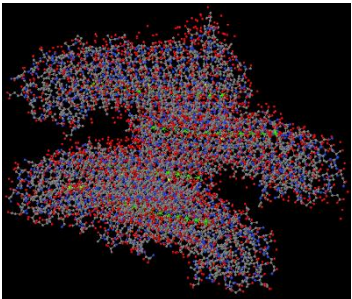
המשך טבלה 14: שאלות במשימות Jmol שעבורן נותח שיח שני הזוגות ובוצעו ראיונות עם התלמידות, וסיווגן על פי מרכיבי ידע

משימה ושאלה	שאלה	מידע המתווסף לשאלה במשימה	מרכיב הידע המסווג עבור השאלה
IPNS שאלה 15	יחד עם מבנה החלבון זוהה יון המתכת ברזל. היכן לדעתכם ממוקם יון המתכת ברזל בחלבון ה-IPNS? הסבירו בחירתכם.	בשאלה קודמת הופיע איור (ראה מטה) המציג תצלום מסך שבו תצוגה של האנזים IPNS עם מולקולת הסובסטרט (אדום) ומולקולת התוצר (סגול) ממוקמות מול האתר הפעיל (תכלת) באנזים ה-IPNS. במקביל, מופיע מידע חזותי מתצוגת Jmol שהזוגות הציגו.	P1
IPNS שאלה 16	לפניכם שלוש תצוגות שונות של אותו החלבון. איזו מבין התצוגות מציגה את מבנה החלבון כפי שהוא במציאות?	איור (ראה מטה) המציג תצלום מסך שבו תצוגות שונות של מבנה חלבון. 	E

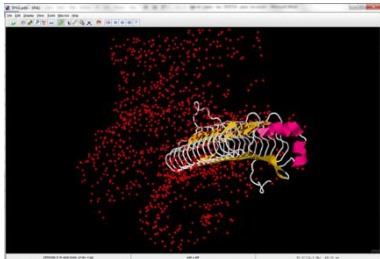
המשך טבלה 14: שאלות במשימות Jmol שעבורן נותח שיח שני הזוגות ובוצעו ראיונות עם התלמידות, וסיווגן על פי מרכיבי ידע

משימה ושאלה	שאלה	מידע המתווסף לשאלה במשימה	מרכיב הידע המסווג עבור השאלה
IPNS שאלה 19	בחלבונים רבים קיימים קשרי גפרית בין שני אטומי גפרית התורמים רבות לייצוב מבנה החלבון. חלבון האינסולין, לדוגמה, מכיל קשרי גפרית. חומצות האמינו המכילות את אטום הגפרית הן חומצות אמינו מסוג ציסטאין. לפניכם מבנה מרחבי של חלבון המוצג בתצוגת ה-cartoon, וברצונכם לבדוק אם קיימים בו קשרי גפרית. תארו מה הפקודות שעליכם לבצע על מנת לבדוק שאלה זו (קשרי הגפרית בסביבת העבודה Jmol מוצגים בצבע צהוב)?	לא קיים מידע נוסף מעבר למופיע בשאלה, על התלמידים להציג בעצמן שיירים צדדיים של חומצות אמינו ציסטאין, ובאמצעות ההצגה להוכיח שקשרים דיסולפידיים ביניהם אינם קיימים. להלן תצלום מסך מתוך Jmol שמראה תצוגה אופציונלית שעל תלמידים לעשות כדי להוכיח שלא קיימים קשרים דיסולפידיים (תצוגת Cartoon המופיעה ברקע בצבע סגול צריכה לספק ניגודיות לשיירים הצדדיים הללו): 	P2

המשך טבלה 14: שאלות במשימות Jmol שעבורן נותח שיח שני הזוגות ובוצעו ראיונות עם התלמידות, וסיווגן על פי מרכיבי ידע

משימה ושאלה	שאלה	מידע המתווסף לשאלה במשימה	מרכיב הידע המסווג עבור השאלה
AFP שאלה 4	בתצוגת מבנה החלבון ישנן גם מולקולות מים. כיצד הן מתוארות? בחרו תשובה אחת: א. כדורים כחולים המייצגים את אטומי החמצן של מולקולות המים. ב. כדורים כחולים המחוברים לכדורים אפורים או כדורים כחולים במקלות. ג. כדורים אדומים המייצגים את אטומי החמצן המרכיבים את מולקולות המים. ד. כדורים אדומים המחוברים לכדורים אפורים או כדורים כחולים במקלות.	בטקסט שהופיע קודם לשאלה הופיע המידע הבא: "תצוגת ברירת המחדל של המבנה נקראת תצוגת אטומים "Balls and sticks" בתצוגה זו ניתן לזהות את האטומים השונים (הכדורים) במולקולה לפי צבעם ואת הקשרים הקוולנטיים (המקלות) בין האטומים השונים. גלילה והשתהות על פני אטום מסוים יציגו את סוג האטום, את מספרו, מידע בשאלה אם הוא חלק מחומצה אמינית מסוימת או ממולקולת מים וכו'". במקביל, מופיע מידע חזותי מתצוגת Jmol שהזוגות הציגו: 	P2

המשך טבלה 14: שאלות במשימות Jmol שעבורן נותח שיח שני הזוגות ובוצעו ראיונות עם התלמידות, וסיווגן על פי מרכיבי ידע

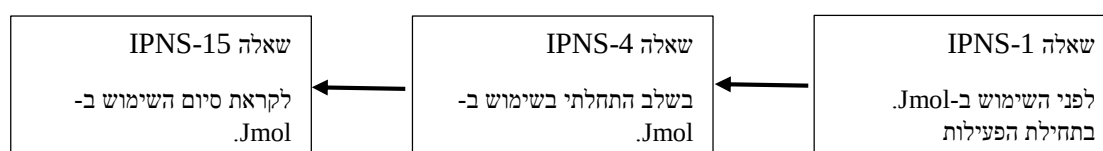
משימה ושאלה	שאלה	מידע המתווסף לשאלה במשימה	מרכיב הידע המסווג עבור השאלה
AFP שאלה 10	סביר להניח שמולקולות המים שנמצאות בתצוגה זו קשורות אל החלבון בקשרי מימן. כיצד ניתן להסביר נוכחות של מולקולות מים המרוחקות מתת-היחידה A המוצגת?	מיד לפני השאלה הופיע איור (ראה מטה) המציג תצלום מסך שבו תצוגת Cartoon של תת-יחידה A של החלבון MpAFP עם כל מולקולות המים במבנה (אטום החמצן בכל מולקולת מים מוצג ככדור אדום). במקביל, מופיע מידע חזותי זהה מתצוגת Jmol שהזוגות הציגו. 	E

כתמיכה לניתוח השיח של הזוגות על פי קריטריונים של ידע, אסטרטגיה ועניין, נערכו ראיונות המשך לתלמידות. הממצאים מתוך ראיונות אלה מסייעים בניתוח והבנת שיח התלמידות במהלך המענה על שאלות משימות Jmol בכיתה.

לנוחות הקורא, בנספח 6 מצורפים קישורים המציגים את שיח התלמידות בשבעת האפיוזות כפי שהוקלט באמצעות תוכנת Screencast-O-Matic, ובנספח 7 מופיעים התמלילים במלואם. להלן יוצג ניתוח האפיוזות לפי מרכיבי הידע שהן דורשות למתן המענה על השאלות. כל ניתוח של חקר מקרה יוצג בנפרד, וסיכום הבדלים בין שני חקרי המקרה יופיע בסוף כל תת-פרק המסווג על פי מרכיבי הידע P1, P2 ו-E. חשוב לציין, כי ציטוט מתוך השיח מסומן בכתב מודגש עם ציון השורה מתוך התמלול ואילו ציטוט מתוך ראיון המשך מסומן בכתב נטוי שאינו מודגש.

מרכיב הידע P1 – הצגת ידע מדעי אודות שימוש יעיל בייצוגים החזותיים במודל המולקולרי

שלוש אפיוזות נותחו בהקשר למרכיב ידע זה: שאלה 1, 4, 15 במשימת IPNS (טבלה 14). באיור 9 ניתן לראות את השילוב של השימוש ב-Jmol ביחס למענה על השאלות.



איור 9: מיקום השאלות העוסקות במרכיב ידע P1 במשימת IPNS ביחס לפעילות התלמידים בשימוש ב-Jmol

בשאלה IPNS-1 הוצג איור של מבנה ראשוני של החלבון IPNS שבו מודגשות חומצות האמינו של השיירים הצדדיים הנדונים בשאלה, והתלמידים התבקשו להסביר את אופן ההתקפות של המולקולה. על פי (Schönborn & Anderson, 2010), הזוגות התבקשו לפענח (Decode) את מערכת הסמלים המופיעה באיור ולפרש (Interpret) את המידע בתצוגה החזותית הסטטית המוטמעת במשימה (טבלה 14 עמוד 83). ראוי לציין כי אין צורך לעשות שימוש ב-Jmol על מנת לתת מענה על שאלה זו. שאלות IPNS-4 ו-IPNS-15 ממוקדות בתצוגות חזותיות של מודלים מולקולריים המופיעים באיורים המוטמעים במשימות ובייצוגים החזותיים שהוצגו על ידי התלמידות ב-Jmol. בשאלה 4 התלמידות התבקשו לזהות כמה גדילים יש באחד ממשטחי הבטא במולקולה. על כן הזוגות התבקשו לפענח את המידע החזותי שהופיע באיור ובתצוגת Jmol וכן להפעיל מניפולציה או חשיבה מרחבית כדי לפרש או להסביר היבטים הקשורים למודל המולקולרי (Manipulate). בשאלה IPNS-15 התלמידים התבקשו לנבא מיקום של יון ברזל במולקולת החלבון. על כן הזוגות התבקשו לפענח את המידע החזותי ולהשתמש במודל כדי לפרש מידע המופיע בשאלה. פענוח אינו המיומנות היחידה בשאלה זו מכיוון שיון ברזל אינו מוצג במודל המולקולרי בעת שהזוגות ענו על השאלה ולכן הזוגות נדרשו גם לפרש את המידע החזותי במודל המולקולרי כדי לחזות היכן היון עשוי להימצא. להלן ניתוח האפיוזות של שני הזוגות בנפרד על פי שלושה קריטריונים: ידע מוקדם, אסטרטגיה ועניין (על פי Alexander, 2004).

א. ידע מוקדם: בשיח עבור שאלה IPNS-1 שלי ובטי הראו ידע נושאי (Topic knowledge) אודות התקפות מבנית של חלבון. מרכיב הידע שבו השתמשו הוא C. מתוך השתלשלות השיח נראה ששלי היא מייצגת הידע העיקרית:

- 50 שלי: לא, כי את יודעת יש להן R, ה-R ים שלהם, השיירים שלהם, אז הם מתחברים,
 51 בטי: נו, אז הם מתחברים, כן, אני יודעת
 52 שלי: זה קשרים לא, לאו דווקא פפטידיים ב...איזה קשרים יש? קשרי מימן

בעידודה של שלי, בנות-השיח מקדמות מנייה של חמישה סוגי קשרים שאחראים ליצירת מבנה שלישוני ואינם קשרים פפטידיים. ראיון ההמשך, שבו ביקשתי מהתלמידות לענות שוב על אותן השאלות, תומך בכך ששלי היא מייצגת הידע העיקרית. בריאיון, היא חזרה על התשובה וקראה לקשרים החלשים אינטראקציות. לעומתה, בטי לא הצליחה להסביר מה גרם להתקפות החלבון אף שהבינה שחומצות האמינו קרובות זו לזו כתוצאה מהתקפות.

כמענה לשאלה IPNS-4, הזוג SB השתמש במרכיב-הידע מסוג P1 בנוסף למרכיב הידע C ולא התקשו בהפעלת חשיבה מרחבית כדי לזהות שני משטחי ביטא נפרדים וזאת בשונה מהשאלה הקודמת IPNS-1. כמו כן, בשונה מהמענה על שאלה IPNS-1, הידע נרכש תוך כדי המענה על השאלה. הידע הנרכש הוא ידע מסוג P1 העושה הבחנה בפענוח של סמלים המייצגים גדילים (Strands) לבין פענוח של מספר גדילים היוצרים משטח (Sheet). מיד לאחר קריאת השאלה, שלי מעלה תהייה המלמדת כי היא לא רכשה את הידע עדיין:

- 324 שלי: מה זה גדילים?

ולאחר מכן בטי מבנה ידע חדש:

- 330 בטי: זה בטח בביטא, לא? [3 שניות], אהה! אני הבנתי [2 שניות] תראי... יש לך פה אחד, הנה אחד
 331 עם שלושה...הנה, שלושה גדילים, עכשיו פה יש לך עוד אחד עם אחד, שתיים, שלוש, ארבע, חמש,

במעבר לשאלה IPNS-15, זוג התלמידות כמעט מסיימות לבנות את המודל המולקולרי של החלבון IPNS ב-Jmol, שמוצג ללא יון ברזל בסמוך לשלושת חומצות אמינו 214, 216 ו-270 הנמצאות סמוכות זו לזו:

- 798 שלי: "יחד
 799 עם מבנה החלבון זוהה יון המתכת ברזל". תזווי קצת אחורה אולי נראה איזה נקודה, [4 שניות]
 800 למה משמש יון ברזל?
 801 בטי: הולכה חשמלית [צחוק]
 802 שלי: אהה! זה בחלבון? כאילו, אה זה בחלבון, אין לי מושג, [צועקת למורה ולחוקר] מאיפה אני אמורה לדעת
 803 איפה ממקם יון ברזל? [ללא מענה]
 804 שלי: [שואלת תלמיד] איפה ממקם היום ברזל?
 805 תלמיד: אהה?
 806 שלי: [חוזרת ושואלת] איפה ממקם היום ברזל?
 807 תלמיד: במרכז נראה לי...
 808 שלי: למה?

809	בטי: אולי זה כמו הסידן ב-PON1
810	שלי: נכון, תרשמי שאולי הוא עוזר לקיפול ה-
811	בטי: הוא עוזר,
812	שלי: תרשמי שאנחנו משערים
	אפיזודה 61 קוטעת [בעיה טכנית באתר Moodle]
820	בטי: [כותבת] יון הברזל ממוקם באמצע ה... [שואלת את שלי] האתר הפעיל או החלבון?
821	שלי: נראה לי האתר הפעיל, שהוא נמצא בו
822	בטי: [כותבת] באמצע האתר הפעיל, אה זהו. אה למה?
823	שלי: כי אולי הוא עוזר לקיפול נכון ולתפקוד טוב של ה-
824	בטי: [ממשיכה לכתוב] כי אולי הוא עוזר נכון לתפקוד החלבון ולקיפול נכון שלו

בדומה למענה על שאלה IPNS-4, התפתח מהלך שיח דומה בין בנות השיח: שלי העלתה תהייה באמצעות קריאת השאלה ואילו בטי הבנתה ידע בעקבות התהייה של שלי. ברגע הראשון שלי ניסתה להשתמש במרכיב הידע P1, במיומנות של פענוח של סמלים בתצוגה, כאשר הייצוג הפנימי (מודל מנטלי) שלה עבור תצוגת יון ברזל היא נקודה. לאחר קריאת השאלה היא הבינה שיון ברזל אינו מוצג במודל המולקולרי וערערה על הלגיטימיות של השאלה: "מאיפה אני אמורה לדעת...". כדי לקצר את משך זמן הפעילות שלהן היא פנתה לתלמידים אחרים, אך כאן בטי הגיבה במהירות: מכיוון שבטי הניחה שיון הברזל נמצא במרכז החלבון, היא השתמשה במיומנות של מרכיב ידע P1 מסוג *תרגום אנכי* (Translate vertically) (Schönborn & Anderson, 2010). בטי קישרה בין ידע שנרכש מתוך מודל מולקולרי שנחשפה אליו במסגרת פרויקט ה-PON1 שעליו עמלו כזוג: "אולי זה כמו הסידן ב-PON1". במהלך פרויקט PON1 וטרם איסוף הנתונים, הוצג בפני התלמידים על מסך באולם (הנקרא "תיאטרון מולקולרי") מודל תלת-ממדי של החלבון PON1. המודל הוצג על ידי סטודנט במכון מחקר, שבו התארחו לצורך ביצוע הפרויקט. במהלך המפגש הצגתי בפני התלמידים תצוגות של שני יוני סידן הנמצאים בליבת החלבון ונאמר להם שאחד מיוני הסידן חיוני לקיפול החלבון ואילו השני חיוני לתפקודו (המידע סופק על ידי המורה). עבור שלי, הקישור שבטי עשתה נתן תמיכה מספקת כדי למצוא תשובה הקשורה למנגנון הפעולה שמשליך על מיקומו של יון הברזל: "כי אולי הוא עוזר לקיפול נכון ולתפקוד טוב של ה[חלבון]". על כן, ההשתתפות בפרקטיקה מדעית במסגרת הפרויקט סייעה במענה על השאלה.

ב. אסטרטגיה: בשלושת האפיזודות שתוארו, הזוג SB הראה מאפיינים שטחיים של אסטרטגיה (Surface-Processing Strategies). האסטרטגיות שהזוג SB הציג הן קריאה סלקטיבית של קטעי מידע הנראים להם כחשובים, וקריאה לעמיתים לכיתה לסיוע בעת קושי. לדוגמה, שלי ובטי רפרפו במהירות על קטע מידע בנושא מבנים שניוניים לפני שאלה IPNS-4. בין השאר דלגו על מידע מילולי וויזואלי הנוגע להבדל בין גדילים למשטחים. כאשר הייצוגים של גדילים מסומנים כחיצים, ואילו משטחי בטא מסומנים כמשטחי חיצים. למרות הנטייה לקריאה מרפרפת, הן מצליחות להבנות ידע מתוך רמזים המוטמעים בשאלה הסגורה ובאיוורים המלווים. מאפיין נוסף שאפשר לזהותו כאסטרטגיה ללמידה באמצעות מודלים הוא שיח המייצר הבחנה ברורה בין מייצג למיוצג: כאשר הזוג SB ענה על שאלה IPNS-4, המונחים המייצגים גדיל/גדילים שהם "חץ/חצים" לא הופיעו אף לא פעם אחת בשיח. התלמידות השתמשו במונחים אחרים כגון "זה", "יש לך פה אחד". מכיוון שהמונח המיוצג "גדיל" אכן מופיע בשיח שלהן, עצם המחסור בשימוש הסימול שלו

שהוא חץ הופך את השיח לפחות מובן ונתון לפרשנויות עבור בנות השיח. עם זאת, במקרה אחר ויחיד נערך ניסיון מצד שלי לשיים ייצוג ליון הברזל כמענה לשאלה IPNS-15:

799 שלי: ...תזווי קצת אחורה אולי נראה איזה נקודה,

מתוך בחירת המילים של התלמידות בשיח הזוגות, ניכר שהן כמעט ואינן משתמשות בשיח שהן מקיימות במילים המבחינות בין מייצג למיוצג כדי להקל על פענוח ופירוש המודלים המולקולריים.

ג. עניין: הזוג SB מפתחות עניין תלוי-סיטואציה (Situational Interest), כפי שניתן לזהות בשיח שלהן כמענה על שאלה IPNS-4:

334 בטי: [תשובה נכונה] וואו

335 שלי: וואו, יפה בטי [נותנות כיף אחת לשנייה]

בשאלה IPNS-15, שוב קשה להבחין במאפיינים המצביעים על עניין. התלמידות מעוניינות בקיצורי-דרך כדי להתקדם לסוף המשימה ועל כן קשה למצוא גם מאפיינים של עניין תלוי סיטואציה.

847 שלי: [5 שניות] כמה שאלות נשארו לנו? אה הוא אמר ששאלה 16 ו-17 חשובות, לא?

848 בטי: כן

849 שלי: למה?

850 בטי: לא יודעת, אה, שמעת מה קראתי?

ניתוח השיח של הזוג SB על פי קריטריון של עניין, מלמד על צורך שלהן במשוב חיובי כמענה על שאלות סגורות. ובשאלות פתוחות שלהן אין משוב מפורש קשה לזהות שיח שמלמד על עניין.

סיכום: ניתוח שלושת האפיזודות מראה שהזוג SB רכש ידע הקשור למרכיב הידע P1. חלק מהידע נרכש במהלך פרויקט החקר שלזוג התלמידות על החלבון PON1, וחלק במהלך המשימה. בנות השיח מבנות את הידע באמצעות שיח שאותו מנווטת בעיקר שלי ומעוררת את בטי להציג ידע. בשתי אפיזודות בטי מסייעת לשלי בהבניית ידע (שאלה 4, 15) ואילו באפיזודה אחת (שאלה 1) שלי מבנה את הידע ובטי מהווה שותפה פסיבית. אף שבנות הזוג נמצאות בשלב ההתאקלמות על פי Alexander (2004), השיח בניהן מקדם אותן, כשהשימוש בידע מתוך הפרויקט מסייע להן לרכוש ידע חדש (שאלה 15).

הזוג MR:

א. ידע מוקדם: בשיח עבור שאלה IPNS-1 מאי ורחל קיימו שיח ארוך באופן חריג, אשר לקח זמן רב (לתמלול המלא ראה נספח 8). במהלך השיח מאי הציגה רכישה של ידע נושאי הדרוש למענה על השאלה, כאן מרכיב הידע שבו השתמשה הוא C. מאי תיארה את הקשרים כגורמים להתקפלות, אך לא ניתן להבין מדבריה האם מדובר בקשרים חלשים ובין אילו קבוצות כימיות.

36 מאי: [לאחר קריאת שאלה] לא... פשוט יש מצב שהן כאילו כזה אחת מול השנייה, ואז הן, כאילו-

37 רחל: כן, כמו בזה...במבנה ה...

38 מאי: [צחוק] כמו במעטפת ההיא...קפלים ביטא נגיד, שהם באים כאילו ממול ואז עושים קשרים

בראיון ההמשך מאי תיארה את הקשרים כך:

כאילו כנראה שיש להם איזה משהו בפלוס או מינוס או משהו כזה, הדברים האלה שגורמים להם לעשות קשר אחד עם השני

לעומתה רחל, אף שהציגה ידע אודות התקפלות חלבון כגורם המסביר קרבה של חומצות אמינו מרוחקות בשרשרת, ציינה בהססנות בריאיון ההמשך שמדובר בקשרים, אך לא הצליחה להראות כי הבנתה את הידע:

למה זה מקופל? כי יש בין החומצות אמינו קשרים? לא יודעת, לא? ... אני לא יודעת למה זה מקופל? כי זה המבנה של זה.

בדומה לזוג SB, מאי ורחל לא קיימו שיח באופן ישיר בהקשר לאיור שהוצג עבורן, כלומר מרכיב הידע P1 אינו נוכח בשיח שלהן כלל. ועל כן מרכיב הידע המופיע בשיח הוא C בלבד.

כמענה על שאלה IPNS-4, התפתח מהלך שיח עבור MR הדומה לשל הזוג SB. רחל העלתה תהייה מיד לאחר קריאת השאלה:

379 רחל: "במבנה האנזים ניתן להבחין בשתי משטחי ביטא, במשטח אחד קיימים
380 שלושה גדילים, כמה גדילים קיימים במשטח השני?" אה... כאילו כל אחד הוא גדיל?

ומאי, מעט לאחר מכן הציגה הבנייה של ידע לקראת רכישתו:

387 מאי: אה! כל אחד מהם זה גדיל. הבנתי.

כאשר MR הגיעו לחלק במשימה שבו הן מתבקשות לענות על שאלה IPNS-15, זמן הפעילות התארך יתר על המידה, והתלמידות התעייפו ומאי לחצה לסיים מכיוון שזהו סופו של יום לימודים. זוג התלמידות מקיים את השיח הבא:

967 רחל: "היכן לדעתכם ממוקם יון המתכת ברזל" מה? אה! [מתרגזת וחוזרת לקרוא טקסט קודם שלא
968 נקרא] "נחזור ונדגיש כי לאחר שהאנזים IPNS"
969 מאי: אה, הריבוע שנוצר זה נראה לי יון מתכת ברזל,
970 רחל: [לאחר שסיימה לקרוא את הטקסט] אני לא מבינה, "היכן לדעתכם ממוקם יון המתכת ברזל"
971 אוהד [החוקר לא מגיע],
אפיוזדה 59 קוטעת [סדרת לחישות הקשורות ללחץ זמן]
978 מאי: סביר שהוא בפנים. כי ברזל הוא הידרופובי. לא? סבבה
979 רחל: בתוך ה-
980 מאי: חלבון, לא? [10 שניות, פונה לזוג בנים] סיימתם? יואו נבלות [8 שניות, לא מובן]
981 תלמיד: יאללה סיימנו
982 רחל: [כותבת] תראי מה כתבתי [בתוך החלבון כי הברזל הוא הידרופובי והסביבה החיצונית היא
983 מימית והוא לא יוכל להיות בחוץ]
984 מאי: סבבה הבא

בחלק זה של פעילות התלמידות, מאי הפכה להיות מייצגת הידע השייך למרכיב ידע P1. שיח זה מייצג את יחסי הכוחות בין בנות השיח כאשר מאי תפסה בעלות על ייצוג ידע מסוג P1. רחל לעומתה הסתמכה עליה וקיבלה את תפקיד הלומדת. מאי פעלה בדומה לשלי (המבע של שלי בשורה 799 בעמוד 92). היא גייסה את מרכיב הידע P1 בניסיון לפענח סימולים בתצוגה. אך בשונה משלי, מאי נשארה עם תפיסה שגויה שיון ברזל כבר מוצג במודל המולקולרי כטבעת לקטמית המוצגת כחלק ממבנה תוצר פעילות האנזים איזופניצלין (שורה 969). לעומת מאי, שלי חזרה בה והבינה כי ייצוג של יון הברזל אינו מופיע במודל המולקולרי

(המבע של שלי בשורה 802 בעמוד 92) אך השכנוע של מאי בנוכחותו של ייצוג ליון הברזל הוא עמוק והיא חוזרת על הטענה גם בראיון ההמשך:

מאי: [חושבת] שנייה. חומצה אמינית לא בנויה מיון ברזל. נכון?

מראיין: [בהמשך] את מבינה שזה... בתוך הסובסטרט או התוצר נמצא יון ברזל?

מאי: כן

בעוד שרחל לא התיימרה לנסות ולהסביר את המיקום של יון הברזל בליבת החלבון, מאי העלתה את הטענה: "סביר שהוא בפנים. כי ברזל הוא הידרופובי. לא? סבבה". כדי להסביר את המיקום מאי שלפה ידע שרכשה ממענה על שאלה קודמת במשימת IPNS (שאלה 7 במשימה ראה נספח 3 בעמוד 173) אודות מיקומן של חומצות אמינו הידרופוביות בהשוואה למיקומן של חומצות אמינו הידרופיליות. מכיוון שמאי פירשה את הימצאותו של יון הברזל כחלק ממולקולה כגון מולקולת הסובסטרט, וחוסר היכולת שלה לייצג אותו כאטום בודד המוצג ככדור, התשובה שלה משלבת תפיסה שגויה הקשורה למבנה חלבון. רחל כאמור לא ניסתה בשלב זה לערער על טיעונה של מאי, מכיוון שהיא וויתרה על תפקיד ה"מומחית" בשיח הדורש מרכיב ידע P1 בפעילות התלמידות במענה על המשימות. עם זאת, כפי שנחזה בהמשך, ככל שפעילות הזוג במשימות התקדמה רחל תפסה את עצמה כמתמחה במרכיב הידע P2, בהשוואה למאי שתפסה את מקום ה"מומחית" במרכיב הידע P1.

השיח שהתעורר באמצעות שאלה IPNS-15 הוא דוגמה מייצגת להבדלי ידע מסוג P1 של שני הזוגות – MR ו-SB. על אף שהזוג MR למד בבית הספר אודות יוני מתכות כקו-פקטורים (נתונים שסופקו על ידע המורה), הוא לא הצליח לייצר קישור בין ידע זה לידע הנדרש בשאלה IPNS-15, בניגוד לזוג SB.

ב. אסטרטגיה: עבור הזוג MR האסטרטגיות העיקריות שננקטו הן קריאת טקסטים, קריאה לחוקר, ושימוש במחברת שבה ישנו מידע על מבנה ותפקוד של חלבון. נסקור שלוש אסטרטגיות בקצרה, כפי שבאו לידי ביטוי באפיונות השונות: (1) קריאה חוזרת של טקסט: למרות הנטייה לקריאה מרפרפת (בדומה לזוג SB), רחל השתמשה באסטרטגיה של קריאה חוזרת של שאלה ולעיתים אף ניסיון להסביר אותה במילותיה שלה. אסטרטגיה זו נמצאה כיעילה במענה על שאלות IPNS-1,4; (2) קריאה לחוקר לסיוע: כדי לספק אישור לדרך הפעולה שבחרו במענה על שאלה 4, רחל (זוג MR) פונה אל החוקר כמומחה כדי לקדם אותם ביכולת לפענח ולפרש את המידע החזותי. ואכן ניסיתי לקדם את הזוג להשתמש בתפיסה המרחבית שלהם באמצעות התבוננות במודל בתלת-ממד באמצעות Jmol; בנוסף (3) שימוש בעזרים חיצוניים: רחל השתמשה במידע הקיים במחברת שבה סיכומים אודות מבנה ותפקוד חלבון ובין השאר מידע אודות מבנים שניוניים.

בדומה לזוג SB, גם בשיח של MR בלט היעדר אסטרטגיה לשיום סמלים במטרה להבחין בין מייצג למיוצג. לדוגמה כאשר הזוגות ענו על שאלה IPNS-4, המונחים המייצגים גדילים של משטחי בטא "חץ/חצים" לא הופיעו אף לא פעם אחת בשיח של שני הזוגות. התלמידות השתמשו במונחים אחרים לסימון המייצג גדיל: כגון "כל אחד", "הצהובים השניים", "כל זה", "את זה". מכיוון שהמונח המיוצג "גדיל" מופיע בשיח שלהן (בדומה לזוג SB), עצם מחסור בשיום הסימול המייצג גדיל (חץ או חיצים) הופך את השיח לפחות מובן ונתון לפרשנויות עבור בנות השיח.

עם זאת, באופן חריג ישנו ניסיון של מאי לייצג יון הברזל בשיח כריבוע, כמענה לשאלה IPNS-15:

969 מאי: אה, הריבוע שנוצר זה נראה לי יון מתכת ברזל,

מתוך המשתמע בדברי מאי, הריבוע הוא המיוצג. הריבוע שאליו מתייחסת מאי הוא תצוגת קשרים של הטבעת הבטא-לקטמית של התוצר איזו-פניצילין. הבחנה זו בין מייצג למיוצג, סייעה בהחצנת המודל המנטלי השגוי של מאי.

ג. עניין: כאשר התלמידות ענו על שאלה IPNS-1, הן השקיעו זמן רב ומאמצים קוגניטיביים ניכרים הכולל דיון ביניהן להחצנת מבני הידע, וכן לניסוח טיעון במשך זמן רב. נראה שהתלמידות מעוניינות בריצוי בתחילת המשימה. עם זאת, לקראת סוף המענה על שאלה זו, הזוג MR מוסח על ידי אינטראקציה חברתית שבה תלמיד סמוך מספר להן בדיחה וקו המחשבה שלהן נקטע. המוטיבציה החיצונית מתמעטת ככל שפעילות התלמידות במשימה מתקדמת.

עם זאת, השימוש הראשוני באפשרויות התוכנה ב-Jmol הלהיב אותן. בשאלה IPNS-4 התלמידות החלו להשתמש ב-Jmol. בנוסף לכך, שאלה זו היא השאלה הסגורה הראשונה בה הן נתקלו. בעקבות מענה מדייק הן צפו במשוב שגרם להן להגיב באופן דומה לזוג SB:

428	רחל: רגע רגע,
429	מאי: עשיתי כבר
430	רחל: אבל אם טעינו
431	מאי: צדקנו [מחליקות כיף, צחוק]

לקראת סוף המשימה, בשאלה IPNS-15, נראה על פניו שחסר אף עניין תלוי סיטואציה מצידה של מאי, אשר רוצה לסיים את המענה על המשימה:

1026	מאי: איזה לאט את כותבת,
1027	רחל: אמרתי לך אני מקלידה ממש לאט
1028	מאי: אני רוצה להגיע ל [שאלה] תשע-עשרה.

סיכום: ניתוח שלושת האפיזודות מראה שהזוג MR רכש באופן חלקי ידע הקשור למרכיב הידע P1. בשתי אפיזודות זוג הבנות רוכש ידע (בשאלה 1 ללא שימוש בייצוג חזותי ושאלה 4 עם שימוש בו) תוך שימוש במספר אסטרטגיות למידה, אך ככל שהמשימה מתקדמת מאי אשר מקבלת את תפקיד ה-"מומחית" במסירת ידע מסוג P1, אך היא מאבדת עניין, ועל כן באפיזודה של שאלה IPNS-15, בשיח עדות לרכישת ידע חדש. באפיזודה זו מאי משתמשת בידע של מרכיב C שאינו רלוונטי וידע שגוי של מרכיב הידע P1 אשר מוביל אותה לתפיסה שגויה ואת רחל לחוסר מעורבות.

מרכיב הידע E – הצגת ידע מדעי אודות מאפיינים אפיסטמולוגיים של מודלים מולקולריים

שתי אפיזודות נותחו בהקשר למרכיב ידע זה: שאלה 16 במשימת IPNS ושאלה 10 במשימת AFP (טבלה 14). באיור 10 ניתן לראות את המענה על השאלות ביחס לפעילות התלמידים בשימוש ב-Jmol:



איור 10: מיקום השאלות העוסקות במרכיב ידע E במשימות IPNS ו-AFP ביחס לפעילות התלמידים בשימוש ב-Jmol

בשאלה IPNS-16 הוצג איור שבו תצוגות שונות של מבנה חלבון (טבלה 14). התלמידות התבקשו לציין אלו מהתצוגות מייצגות את החלבון כפי שהוא במציאות. כשלב מקדים לשאלה AFP-10, ועל פי הוראות המשימה, התלמידים התבקשו לשנות את תצוגת תת-היחידות לתצוגת Cartoon והציגו מולקולות מים בתצוגת כדורים ומקלות. לאחר מכן, הם הסירו מהתצוגה (כלומר הסתירו) את תתי היחידות B, C, D והשאירו את התצוגה של תת-יחידה A ואת תצוגת מולקולות המים מסביב לכל ארבעת היחידות (איור בטבלה 14). בשאלה AFP-10 התלמידים התבקשו להסביר את נוכחותן של מולקולות מים המרוחקות מתת-היחידה A המוצגת וזאת לאחר שבנו את המודל המולקולרי המוצג על פי ההוראות.

כפי שצוין בפרק שבו נוסחה המסגרת המושגית, ידע אפיסטמי כפי שהוא מוצג במסגרת המשימות הממוחשבות נחלק לארבעה מבנים אפיסטמולוגיים אודות מודלים מולקולריים: האחד הוא ההבנה שהמודל המולקולרי הוא רק מודל ואינו 'הדבר עצמו'; השני הוא עצם ההבנה שמקורם של המודלים המולקולריים במידע ניסויי; השלישי הוא ההבנה שתצוגות שונות מציגות תכונות שונות של מולקולות חלבון; והרביעי הוא שהתצוגות המודל המולקולרי אינן נראות בהכרח כפי שמולקולות חלבון נראות במציאות אלא רק מתארות תכונות שלהם. המטרה של שאלה IPNS-16 היא שתלמידים יציגו את המבנים האפיסטמיים השלישי והרביעי. לצורך כך נכתבה פסקה (קטע מידע) שמוצגת בה אנלוגיה בין מפות שונות של ארצות הברית לבין המציאות הפיזית של ארצות הברית. בקטע המידע, מצוין בפירוט שהאנלוגיה זו מובאת במשימה כהסבר לקשר בין מודלים מולקולריים לבין חלבונים כפי שהם במציאות (ניתן למצוא את האנלוגיה בקטע המידע בנספח 3). בנוסף מופיע מידע המסייע במענה על שאלה IPNS-16 בשתי השורות האחרונות של קטע המידע שהוצג לפני שאלה זו. מטרת השאלה AFP-10 היא לבחון את המבנה האפיסטמי הראשון שהמודל המולקולרי הוא רק מודל ואינו 'הדבר עצמו'.

הזוג SB

א. ידע מוקדם: בשאלה IPNS-16 ניכר משיח הלומדות כי בנות הזוג לא הציגו ידע מוקדם במבנה אפיסטמי העוסק בכך שתצוגות שונות מציגות תכונות שונות של מולקולות חלבון וכן שתצוגות של מודלים מולקולריים אינן נראות בהכרח כפי שנראות מולקולות חלבון במציאות אלא רק מתארות תכונות שלהם. במקום זאת, שתיהן הציגו מודל מנטלי שונה משני המבנים האפיסטמיים:

בטי: "לפניכם שלוש תצוגות של אותו אטום, איזו מבין התצוגות מציגה את מבנה החלבון כפי שהוא

833

במציאות?" במציאות זה זה [CPK Spacefill], לא...לא...תסתכלי שנייה, מה נראה לך במציאות,	834
מציג את המבנה במציאות, זה...לא? לא?	835
שלי: כן,	836
בטי: למה?	837
שלי: כי הוא מראה לנו את הנפח של האטומים. לא?	838
בטי: [כותבת] האיור האמצעי מראה לנו את החלבון כפי שהוא במציאות כי הוא מראה את כל נפח החלבון? [3 שניות]	839
שלי: נפח האטומים, ב [לא מובן] אחר. נפח החלבון?	840
בטי: איפה?	841
שלי: לא יודעת, זה הם אומרים משהו כזה	842
בטי: חלבון בסדר,	843
	844

מתוך השיח שלהן לא ניכר מה הוביל אותן להנחה שחלבון נראה במציאות כתצוגת CPK-Space fill, אך ראיונות ההמשך שופכים אור על הבדלים במבני הידע של שתי התלמידות. בריאיון ההמשך, שלי התלבטה בין תצוגת Cartoon לתצוגת CPK-Space fill (נפח אטומים). הנימוק שלה לזיהוי החלבון במציאות כתצוגת Cartoon היה:

אהממ, בתכלס הכי הייתי חושבת שמבנה שניוני [בהמשך...] כן, בעבודה הראו לנו את המבנה שלו, כאילו תמיד שמדברים אתנו על מבנה תמיד מדברים אתנו על הסלילי אלפא ועל...

הנימוק שלה לזיהוי החלבון כתצוגת CPK-Space fill היה:

אבל לא נראה לי שרואים אותו ככה [Cartoon] כאילו לא ממש רואים אותו ככה, ממש סלילי אלפא, לא יודעת בעצם. לא נראה לי לפחות [ובהמשך...] נפח אטומים יותר נראה לי...[ולאחר מכן] כאילו כשאנחנו ראינו את הגבישים, זה היה נראה לי יותר נפח אטומי.

כאשר דחקתי אותה לקבל החלטה היא הוסיפה את הדברים הבאים:

מראיין: אז את אמביוולנטית, כי זה קצת מוזר, אם חלבון נראה במציאות באיזו צורה מסוימת, איך זה יכול להיות שהוא גם נראה ככה וגם ככה?

שלי: לא אני לא אומרת שהוא גם נראה ככה! אני פשוט לא יודעת מה לבחור! אני מאלה שלא בוחרים [צחק] נראה לי נפח אטומי אני לא יודעת.

מראיין: [מצביע על תצוגת CPK-Space fill] ככה הוא נראה במציאות?

שלי: נראה לי אני לא יודעת. נו אני לא יודעת אוהד!

לעומתה, בטי נשארת עם התפיסה של חלבון אשר נראה במציאות כפי שהוא נראה בתצוגת CPK-Space fill. היא פוסלת את שתי התצוגות האחרות מכיוון שהיא מניחה שאטומים נראים ככדורים:

בטי: אהממ, זה לא, בגלל שזה מבנה שניוני, ומבנה שניוני זה לא המבנה הסופי שלו או הוא לא יכול להיות. זה לא [תצוגת קשרים כימיים] בגלל שזה רק קשרים המחברים בין האטומים, ובוזו מראים גם את האטומים [תצוגת נפח אטומים].

מראיין: זאת אומרת שהמדענים יודעים שבמציאות, לטענתך, ככה נראית מולקולת חלבון?

בטי: כן.

מראיין: כי מה כן? אמרת מה לא. מה כן? שידוע לך בוודאות שככה זה נראה? [מצביע על CPK-Space fill] מה? תתארי לי מה אנחנו רואים פה?

בטי: אהה...אטומים שונים, ולפי מה שלמדתי הם עגולים.

ראיונות ההמשך מלמדים על מודלים מנטליים שבהן מחזיקות שתי התלמידות, שלי ובטי, שבהן ייצוג הידע הוא באמצעות מבנים אפיסטמיים שגויים. מודלים אלו מתבססים על מבנים קוגניטיביים הקשורים למרכיב ידע P1. על פי התלמידות, התצוגה המשכנעת ביותר היא זו שמייצגת את מראה החלבון במציאות. תפיסה זו שונה מהתפיסה המקובלת בפרקטיקה המדעית, שנבנית על סמך שני המבנים האפיסטמיים שתוארו קודם, וניכר שהתלמידות לא רכשו אותם.

במענה על שאלה AFP-10 הציפייה המוקדמת שלי הייתה שהזוג SB יציג את המבנה האפיסטמי הפשוט ביותר והוא שהמודל המולקולרי הוא רק מודל ואינו 'הדבר עצמו'. הנחה בסיסית זו נראית כמובנת מאליה, והיא הבסיס לידע שעליו חייבים להתבסס שאר המבנים האפיסטמיים שצוינו לעיל. ואכן, שלי זיהתה מיד את ההבדל בין החלבון למודל המולקולרי, ובטי, שמלכתחילה חיפשה הסבר הנוגע למרכיבי ידע C ו-P1, תיקנה את תשובתה בהתאם למרכיב ידע E:

- 481 שלי: כי יש עוד תתי יחידה שם,
482 בטי: כי יש פה קשרי ואן דר וואלס. לא?
483 שלי: מה? מה? מה?
484 בטי: "כיצד ניתן להסביר את הנוכחות של מולקולות מים המרוחקות מתת היחידה "A כי אם פה יש ואן דר וואלס, ופה אין
485 שלי: מי אמר לך שיש? לא! כאילו אלה! [מצביעה על תצוגת המים ב-Jmol] ש...למה הן מרוחקות ממנה?
486 בטי: אהה,
487 שלי: נראה לי כאילו אז, כי יש
488 בטי: כי הוצאנו את כל האלה-

ב. אסטרטגיה: בדומה לאפיוזודות השייכות למרכיבי ידע אחרים הזוג SB הציג מאפיינים שטחיים של אסטרטגיה (Surface-Processing Strategies), ובמקרים מסוימים לא הציג כלל. הזוג SB הציג אסטרטגיה של קריאה שטחית של קריאת קטעי מידע המתווכים ידע אפיסטמי הקשור למענה על השאלה. הקריאה השטחית כללה דילוג על האנלוגיה שמוצגת כהסבר לקשר בין מודלים מולקולריים לבין החלבונים כפי שהם במציאות ועל כן לא הציג את שני המבנים האפיסטמיים הרלוונטיים למענה על שאלה IPNS-16. שלי קטעה את קריאתה של בטי (שורות 223-224), ומנעה ניסיון לקשר את הידע החדש לידע קודם אודות חלבונים:

- 218 בטי: [קוראת] "כל תצוגה ממחישה ומדגישה תכונה אחרת במבנה החלבון. האחת שמה דגש על המבנה השניוני של החלבון, האחרת על הנפח האטומי של החלבון וכן הלאה. תצוגות רבות יש למודל של חלבון אך עלינו לזכור שמולקולת החלבון איננה נראית במציאות כפי שהיא מוצגת במודל. המודל הוא רק תיאור סכמתי המציג את מיקומו של כל אטום ביחס לשכניו. ניתן להבין" לה לה לה "מפה אחת מדגישה את גבולות המדינה, האחרת את הטופוגרפיה"
219 שלי: מה קשור המפות, לא הבנתי...
220 בטי: לא יודעת.

כפי שתואר לעיל, מפתחי הפעילות לא הסתמכו על אנלוגיות מפות ארצות הברית בלבד, ועל כן ציינו במפורש בסוף קטע המידע שקדם לשאלה IPNS-16 את המבנים האפיסטמיים השלישי והרביעי. עם זאת בשלב זה של הפעילות הזוג SB זנח את אסטרטגיית הקריאה באופן מוחלט:

830	בטי: "סיכום" ואור, ואור וואה,
831	את רוצה לקרוא את כל זה?
832	שלי: [מזהה את שאלה 16 שמגיעה לאחר קטע המידע] בואי ננסה את זה,

הזוג לא נעזר בי בשלב זה, אף שאינן בטוחות בתשובתן. לרוב, חוסר בטחון בתשובה תוך כדי פעילות התלמידות במשימות הוביל אותן לבקש סיוע ממני או מהמורה, ולכן אפיזודה זו אינה מייצגת את אסטרטגיית הלמידה של סיוע במומחה בה הן נוקטות באפיזודות אחרות. בשאלה AFP-10 הזוג SB אינו נזקק לסיוע של מומחה מכיוון שהן מייצגות ידע מקובל אודות המבנה האפיסטמי הראשון.

ג. עניין: בנות הזוג עונות על שאלה IPNS-16 מתוך רצון לסיים את המשימה אך עדיין מראות מחויבות "לחשוב בקול" כדרך לרצות את אותי בעקבות בקשתי בתחילת המענה על המשימה. קשה לזהות תוך השיח האם עבור אחת מהתלמידות ישנם ניצנים של עניין אישי בתחום (Individual interest), אך בריאיון ההמשך שלי הציגה בפניי השקפה המלמדת על עניין אישי במבנה חלבונים. שלי חושפת את התרשמותה מההתנסות במשימות לצד החוויות האישיות שלה מהחשיפה לפרקטיקה המדעית האותנטית במסגרת הפרויקט שבו השתתפה. החשיפה לפרקטיקה וצפייה בגבישי חלבון המיועדים לקביעת מבנה, נערכה במכון מחקר יותר משנה לפני מועד הריאיון, ושלי ניסתה להשליך מהחוויה האישית על המודל המנטלי שבו החזיקה אודות מבנה חלבון:

כן, בעבודה [הביקור במכון המחקר שליווה את הפרויקט על PON1] הראו לנו את המבנה שלו [PON1]. כאילו תמיד שמדברים אתנו על מבנה תמיד מדברים אתנו על הסלילי אלפא ועל [לא משלימה]. כאילו כשאנחנו ראינו את הגבישים, זה היה נראה לי יותר נפח אטומי...

הביקור והצפייה בגבישים אשר נחרטו בזיכרונה, הובילו לבניית מודל מנטלי שגוי על מבנה חלבון (אף ששגוי מיסודו) היוצר חיבור בין תכונות מקרוסקופיות לרמה החלקיקית (Ben-Zvi, Eylon, & Silberstein, 1986). עם זאת, החיבור ששלי מייצרת בין הביקור במכון המחקר לבין תפיסתה אודות מבנה חלבון מספק הצצה על תחילתו של עניין אישי בתחום, המאפיין מדעניות לעתיד בתקופת שהייתן בלימודים בבית הספר התיכון (Maltase & Tai, 2010). לשלי היה העניין האינדיבידואלי הגבוה ביותר במידול מולקולרי של חלבונים על כל מרכיבי הידע, בהשוואה לנחקרות האחרות (ממצאים נוספים קיימים אך אינם מוצגים כאן).

סיכום: היעדר אסטרטגיה של קריאת קטעי מידע מנעה משלי ובטי רכישה של מבנה אפיסטמי כמענה לשאלה IPNS-16, וכתוצאה מכך נחשפו מודלים מנטליים של התלמידות על מבנה חלבונים. מתוך ניתוח השיח לשאלה AFP-10 ניכר שהזוג SB לא התקשה בהבחנה בין מייצג למיוצג כמצופה מהן.

הזוג MR:

א. **ידע מוקדם:** כמענה לשאלה IPNS-16, מאי הציגה ידע מוקדם מקובל עבור המבנים האפיסטמיים השלישי והרביעי העוסקים בתצוגות מודלים מולקולריים:

1006	רחל: "לפניכם שלוש תצוגות של
1007	אותו חלבון"
1008	מאי: אף אחת,
1009	רחל: "איזו מבין התצוגות מציגה את מבנה החלבון כפי שהיא במציאות"
1010	מאי: אף אחת
1011	רחל: אם לא כתוב לנמק לא צריך לנמק? נכון?
1012	חוקר: כן, תדברו על זה רק,
1013	מאי: פשוט אף אחת בגלל שאמרנו שהאלה [לא מובן, צלצול מחריש אוזניים] של מפה, אז כאילו-
1014	רחל: אני מקווה ששומעים כי עכשיו צלצול
1015	מאי: פשוט, נזכרנו במטאפורה המדהימה שאמרתם לנו על המפה, שזה לא באמת מתאר את
1016	הדרכים, יש שם בתים יש שם הרבה דברים, ש-
1017	רחל: טוב,

בריאיון ההמשך המשיכה מאי והסבירה:

מאי: אהממ. אף אחת? כאילו לדעתי.

מראיין: אף אחת. תנמק.

מאי: כאילו כי זה מציג את ה, כאילו זה רק מודל. אנחנו לא יכולים לדעת איך זה באמת במציאות, סתם כדי שנבין את המבנה.

מראיין: יש איזה משהו שגרם לך, שמוביל אותך לחשיבה הזאת?

מאי: כן, המורה אמרה את זה, ש-Jmol זה רק מודל וזה לא נותן לנו איך שזה נראה באמת במציאות. כאילו אם נראה את זה במיקרוסקופ לא נראה את זה ככה. זה פשוט שנבין איך הוא בנוי איך הוא נראה.

רחל לעומתה, לא אימצה את המבנה האפיסטמי אף שנראה על פניו שהסכימה עם מאי בשיח במשימה:

רחל: מבנה שניוני?

מראיין: ככה נראה חלבון במציאות הממשית האמתית?

רחל: אה לא... לא יודעת... האמצעי אולי?

מראיין: ככה נראה החלבון במציאות?

רחל: לא יודעת! מי מסתכל על חלבונים במציאות?

מראיין: לא יצא לך לראות חלבונים במציאות בחיים?

רחל: מאיפה אני אראה?

בשונה ממאי (ובשונה מזוג SB), רחל לא התיימרה להראות שהיא מחזיקה במבנה אפיסטמי ואף לא הציגה מודל מנטלי מסוים בנוגע לתיאור מולקולרי של חלבון במציאות.

כמענה על שאלה AFP-10 הייתה ציפייה ששתי התלמידות יסכימו עם כך שהמודל המולקולרי הוא רק מודל ואינו 'הדבר עצמו', בדומה לזוג SB, ועל כן יקבעו שמולקולות המים המרוחקות מתת-יחידה A

קשורות לתת-יחידות שהן הסתירו. עם זאת, באופן מפתיע שיח הזוג MR קיבל תפנית מעניינת וחשפה תפיסה שגויה של רחל, שאינה מקבלת את הטענה שהמודל המולקולרי הוא רק מודל ואינו 'הדבר עצמו':

- רחל: לא, עשיתי את זה כבר, שואלים אותנו את זה...תראי מה הקטע, זה תת היחידה A, עכשיו יש מולקולות מים שמרוחקות ממנה שהן לא קרובות אליה בכלל. את רואה? 648
- מאי: אולי כי הן קשורות לתת יחידה אחרת 649
- רחל: למה? אבל אין, הורדנו את כל היחידות, השארנו רק את A 650
- מאי: הם אמורים להיות שם 651
- רחל: אבל העפנו אותם 652
- מאי: אבל תראי, הם עם הצורה של ה... 653
- רחל: אני יודעת, הם גם נראים כמו צ'ורוסים [צחוק] 654
- מאי: כן, אז אולי באמת הן קשורות לתת-יחידות אחרות 655
- רחל: אבל הן לא פה! 656
- מאי: אז מה אם הן לא פה. הן קיימות! פשוט לא רואים אותן 657
- רחל: כי הוצאנו אותם 658
- מאי: נכון, אבל לא הוצאנו את המים, הוצאנו את תתי היחידה, לא הוצאנו את המים, אז זה לא הגיוני 659
- רחל: שוב גשם אני הולכת ברגל...אוהד [קוראת לחוקר]... 660
- מאי: מה את רוצה שהוא יענה לך את התשובה? 661
- רחל: לא, אני אשאל אותו אם זה הגיוני, נכון הוצאנו את תת היחידה B, C, ו-D? 662
- מאי: נכון שיש מצב שזה פשוט מים שקשורים לתתי יחידה אחרים? יופי הוא הנהן, תרשמי 663
- רחל: אבל הם לא קיימים! 664
- מאי: הם קיימים! הם פשוט לא מוראים פה כי הוצאנו אותם. 665
- רחל: נוי, אז אם הוצאנו אותם אז למה זה [מולקולות המים] יקשר?- 666
- מאי: -את הוצאת את התת יחידה אבל את המים את השארית. את הוצאת את ה...נכון שאני אומרת משהו נכון? 667
- חוקר: אני שומע, אני מקשיב לכן, זה הכול. 668
- מאי: אני חושבת שהוצאנו את המבנה עצמו אבל לא את מה שקשור אליו מסביב. 669
- חוקר: את אוהבת להשאיר את זה סטטי? או שאת אוהבת להזיז את זה? 670
- מאי: להזיז, זה ממש נחמד להזיז את זה. 671
- רחל: מה את זה? 672
- חוקר: כן, כן 673
- רחל: כן, כל הזמן לעשות ככה. 674
- חוקר: אבל להזיז את זה לאט. 675
- רחל: כן, כן, גם ככה, אתה רוצה לראות איך זה נראה כמו צ'ורוס? [צחוק] 676
- חוקר: לא...כאילו אני שואל את עצמי האם מה שמאי אומרת יכול לדבר אלייך יותר אם את תזיזי את הדברים האלה? 677
- מאי: כן כי אתה רואה ממש את הצורות שלהם, לדעתי לפחות. אז זה נכון מה שאני אומרת? 678

במהלך השיח, רחל חזרה ארבע פעמים על אותו מבנה קוגניטיבי שבו טענה "הורדנו/העפנו/הוצאנו" את תת-היחידות. פעם אחת קבעה בנחרצות "הם לא פה!" ופעם נוספת ציינה "הם לא קיימים!". השכנוע העמוק שלה לא היה מובן לי, וניסיתי לברר האם יש לה בעיה בתפיסה המרחבית שמונעת ממנה זיהוי של תת היחידות המוסתרות באמצעות תבנית מולקולות המים (רחל אישרה שהיא מזהה את הקשר בין תבנית מולקולות המים לבין תת היחידות המוסתרות ולכן בעיה בתפיסה מרחבית נשללה). כמו כן בת השיח שלה, מאי, ניסתה לשכנע אותה באמיתות המבנה האפיסטמי פעם אחר פעם, אך רחל לא השתכנעה.

הטענה של רחל כי המודל המולקולרי הוא לא המודל אלא הוא 'הדבר עצמו' הייתה חייבת להמשיך ולהיבחן בראיון ההמשך, כדי לבדוק האם באמת זהו המודל המנטלי שבו היא מחזיקה:

רחל: אהה! אוקיי אני כבר רואה. זה כאילו כל המולקולות מקיפות את המבנה.

מראיין: [קורא את השאלה]

רחל: [בהיסוס] זה כאילו סביב ה...אלה שהעפנו, נכון? כאילו כאן היה אחד, כאן היה אחד וכאן היה אחד.

מראיין: אבל שנייה אני רוצה להציג לך עכשיו שאלה¹⁴: אבל התת יחידות האלה לא קיימות?

רחל: [לוחשת] הן בדמיון שלנו [צחוק, חושבת]...למה הן עדיין מופיעות רחוק מזה? [מתת יחידה A]

מראיין: [קורא שוב את השאלה]

רחל: אהממ, לא יודעת, איך?

מראיין: אבל מה, מה אמרת לי מקודם?

רחל: מה אמרתי מקודם?

מראיין: אמרת לי מקודם איזה משהו.

רחל: אבל אין פה יותר את האלה...העפנו אותם.

מראיין: [חוזר על השאלה]

רחל: לא יודעת. הן נשארו? או שזה לא עובד ככה.

מראיין: [משתמש במחוות] מה ההסבר שאת נותנת לנוכחות של זה שנמצא רחוק מזה?

רחל: אין לי אחד כזה. [מראיין: מה?] אין לי הסבר זה ממש רחוק.

מראיין: מה היה ההסבר הראשון שנתת לי?

רחל: כאילו, זה היה, זה היה עם המבנים הקודמים, אבל הוצאנו אותם, אז אני לא יודעת מה הולך עכשיו.

עד לשלב זה, המבנה האפיסטמי נשאר זהה למבנה המקורי שהציגה בשיח עם מאי. אך באופן מעניין, בנקודת זמן זו בריאיון חל שינוי בתפיסתה של רחל:

מראיין: מה ההנחה שיש לך בראש בקשר לזה? את אומרת היו מבנים שהוצאנו אותם, אז עכשיו אני לא יודעת להסביר?

רחל: אה מה לא אני מפגרת, הן עדיין שם אנחנו פשוט הוצאנו אותם כי אנחנו...כאילו הם עדיין קיימים, לא העפנו אותם, הם עדיין שם, אנחנו פשוט בוחרים שלא לראות אותם אז אולי הם עדיין נמצאים.

מראיין: מגניב

¹⁴ כוונתי הייתה להשתמש במילה היגד או אמירה אך באופן שגוי נבחר מונח פחות מתאים והוא: "שאלה". הכוונה הייתה לצטט את רחל מתוך השיח המקורי כדי לעורר קונפליקט קוגניטיבי ולחשוף את המודל המנטלי. כפי שניתן לראות בהמשך השיח, התערבות זו הובילה לתהליך למידה מעניין.

רחל: מה מגיב, כן או לא?

מראיין: עוד מעט אני כבר אדבר אתך על זה אני רק אעבור לשאלה האחרונה,

רחל: לא! אנחנו לא יכולים להוציא את תתי-היחידות, כאילו זה חלק מ...אני לא יודעת איך קוראים לזה בערך...לא חלבון, אני לא יודעת מה זה... זה חלק מהכל, אי אפשר להוציא את זה לגמרי, אנחנו פשוט מתמקדים בזה אבל רק בתת יחידה אחת, אבל הן עדיין שם, אנחנו פשוט לא מסתכלים עליהן או הגיוני שיהיה להם מים.

ראיון ההמשך מציף בתחילה באופן מפורש את המבנה האפיסטמי המוטעה של רחל "אבל אין פה יותר את האלה [תת-יחידות]". אמירה זו אקוויוולנטית לאמירה בשיח "אבל הם לא קיימים!". בהמשך השיח, כאשר עימתי אותה עם תפיסתה אודות המודל כ'דבר האמתי' שהוא אמור לייצג, רחל שינתה באופן פתאומי את דרך החשיבה שלה, וביטאה את המבנה האפיסטמי הנכון באופן משכנע. לאחר מכן, רחל הסבירה שמה שהיא רואה ב-Jmol הוא מודל אף שלא הצליחה לשיים את המונח מודל ("אני לא יודעת איך קוראים לזה, אני לא יודעת מה זה")¹⁵.

ב. אסטרטגיה: בשונה משתי בנות הזוג SB, מאי זיהתה את האנלוגיה שניתנה כקטע מידע בתחילת משימת IPNS, כדרך משמעותית לרכישת מרכיב ידע E חדש אשר שירת אותה בהמשך, ואכן זו סייעה לה למענה על שאלה IPNS-16. להלן קטע המידע שקראה מאי אודות האנלוגיה והייצוג לאנלוגיה, ותגובתה לטקסט:

מאי: [צחק] "בהמשך משימה זו נתבונן בסוגים שונים של תצוגות, כל תצוגה ממשיכה, ממחישה

220

¹⁵ ייתכן שהתפיסה האפיסטמולוגית של רחל אודות מודלים מולקולריים עשויה להיות ייחודית ולא מייצגת בקרב בני גילה הלומדים מערכות ביוטכנולוגיות. כדי לבדוק השערה זו בחנתי תשובות תלמידים לשאלה AFP-10 שנשמרו כמאגר נתונים בשרת של Moodle המחלקה להוראת המדעים, אשר כולל מאות תשובות של תלמידים למשימות חד שלביות (משימות 6-10 בנספח 2). בחרתי שלא להציג את המאגר ואת בחינת התשובות בו כשיטה בפרק המתודולוגיה, ושלא לייחד חלק נפרד לניתוח תשובות תלמידים מהמאגר בפרק התוצאות, מכיוון שמאגר הנתונים עומד לרשותי רק עבור משימת AFP ולא עבור משימת IPNS. על כן ניתוח תשובות תלמידים לשאלות פתוחות מתאפשר רק באפיונות AFP-10 ולא עבור אפיונות מתוך משימת IPNS. שתי שאלות פתוחות נוספות במשימת AFP שעבורן יש מאגר תשובות תלמידים הן AFP-1 ו-AFP-19 (מרכיב ידע C) אך שיח התלמידות עבורן אינו מנותח במחקר זה.

מתוך סך המענים במאגר נבחרו 231 מענים לשאלה AFP-10 שבהם היו תשובות ישירות לשאלה וגם הופיעו תשובות לכל השאלות שהופיעו לפני שאלה 10 (כדי למנוע מצב של תלמידים שאינם מסתירים את תת היחידות B,C,D, שהוא תנאי חיוני למענה מדייק על השאלה). לא היו נתונים נוספים על תשובות התלמידים: לדוגמה: האם ענו בזוגות או ביחידים? האם המורה הכתיב תשובה? האם תלמידים ענו כתהליך למידה או הערכה? מניתוח המענים נמצא כי 25 מהמענים (11%) הציגו תפיסה אלטרנטיבית בדומה לזו שהוצגה על ידי רחל, ו-206 מהמענים (89%) הציגו מענה נכון לשאלה.

דוגמאות למענים שאינם נכונים לשאלה AFP-10 הן: "מולקולות מים אלה התנתקו מתת יחידה A"; "חומצות האמיניות המרכיבות את החלבון מרחיקות את המים כי הן הידרופוביות"; "קשרי מימן ידועים כקשרים חלשים ולכן המרחק בניהם לבין החלבון יש רווח" ועוד. דוגמאות אלו מייצגות מגוון של המשגות ביוכימיות אלטרנטיביות המנסות לשלב בין מרכיב ידע C ומרכיב ידע P1 והן דוחקות מהלכי חשיבה על מרכיב ידע E. ייתכן שאותם 11% של עונים ענו כך, מאותה הסיבה שמאי ציינה בראיון ההמשך: "כי זה קל מדי. כי זה קל מדי...וכנראה זה טעות", אך יש לקחת בחשבון, שבדומה לרחל, אחוז מסוים של התלמידים הקטן מ-11% מחזיק במבנים קוגניטיביים המזהים את המודל המולקולרי כחלבון ואינם מבחינים בין המודל המולקולרי ל'דבר עצמו'.

ומדגישה תכונה אחרת במבנה החלבון. האחת שמה דגש על המבנה השניוני של החלבון, האחרת	221
על הנפח האטומי של החלבון וכן הלאה. תצוגות רבות יש למבנה של חלבון אך עלינו לזכור	222
שמולקולת החלבון אינה נראית במציאות כפי שהיא מוצגת במודל. המודל הוא רק תיאור סכמתי	223
המציג את מיקומו של כל אטום ביחס לשכנו. ניתן להבין עקרון זה כאשר אנו מסתכלים על מפות	224
שונות של אותו אזור [דילוג על הפניה לאזור 2]. מפה אחת מדגישה את גבולות המדינה, האחרת את	225
הטופוגרפיה והשלישית את הכבישים באותו אזור. אך כל המפות האלה הן רק מודל למציאות והן	226
ממחישות ומדגישות תכונה מיוחדת בחלבון. במציאות כשנטייל באזור זה נבחין בבתים". אני לא	227
יודעת אם את מבינה, אני הבנתי, "בתים, עצים רחובות ופרטים נוספים שאף אחד מהם לא צוין במפות	228
השונות. כך גם הדבר לגבי מודל של חלבון. כל תצוגה היא-" טוב הבנתי את הפואנטה [דילוג על	229
טקסט]	230
רחל: סבבה, טופוגרפית	231
מאי: אהבתי את זה	232

אף שמאי החצינה הבנה של קטע המידע, ניכר מחסור בשיח בין בנות השיח המקדם את חוסר ההבנה של רחל במבנים האפיסטמיים. אסטרטגיית הקריאה חיונית לרחל. ניכר מתוך האפיזודות הרבות שנצפו, שלעיתים רחל נזקקה לקריאה נוספת להבנת הטקסט. בכל פעם שרחל לא הבינה טקסט, והחליטה להתקדם במשימה, היא קראה את הטקסט מהר וצחקקה במבוכה כאות להסכמתה עם חוסר ההבנה. כאשר רחל התעקשה על קריאת הטקסט היא אותתה למאי על הצורך בהבנתו באמצעות קריאה חוזרת והסבר מלווה לבת-הזוג. כך רחל וויסתה את מרכיבי הידע שברצותה לרכוש ואת אלה שפחות התעקשה על הבנתם. אפיזודה זו מייצגת דוגמה להתקדמות בלמידה של מאי ואי התקדמות בלמידה של רחל. בשיח זה, רחל בחרה לומר באינטונציה מאוכזבת "סבבה, טופוגרפית" כהסכמה להבנה של מאי ולחוסר ההבנה שלה. היא בחרה להמשיך לאפיזודה הבאה כפי הנראה מכיוון שחשבה שההבנה של מאי תשרת את שתיהן בהמשך המענה על המשימה שלהן כזוג. כמו כן, אפיזודה זו מייצגת הסתמכות של רחל על מאי ברכישת והצגת מרכיבי-ידע P1, C ו-E. כפי שנראה בתת-הפרק אודות מרכיב הידע P2, אופי השיח שהתפתח בין רחל למאי השתנה, ורחל התעקשה להיות מייצגת הידע העיקרית במרכיב הידע P2.

כאשר הזוג MR הגיע לקריאת שאלה IPNS-16 הוא החליט לוותר על קריאתו כתוצאה מהתנאים שנוצרו של לחץ זמן ועייפות, ורצון לסיים את המשימה. הן לא השתמשו באף אחת מהאסטרטגיות: קריאה חוזרת של טקסט, קריאה לחוקר לסיוע או שימוש בעזרים חיצוניים:

1006 רחל: סיכום משימה, מעולה לסיכום [מדלגת על קריאת הטקסט האפיסטמי בכללותו],

ייתכן שקריאה מעמיקה של הטקסט ובעיקר בקטע המסיים של הטקסט היה מסייע לרחל ברכישת המבנים האפיסטמיים, אך בשלב זה הן ממוקדות בקריאת שאלות בלבד.

אף שהזוג MR לא נעזר בי למענה על שאלה IPNS-16 מכיוון שמאי הביעה בטחון בתשובתה בעקבות רכישת ידע אפיסטמי רלוונטי מתוך האנלוגיה, רחל בחרה שלא לקיים שיח עם מאי ואין עדות לרכישת ידע אפיסטמי של רחל בעקבות מענה על שאלה זו.

שבוע לאחר מכן רחל קראה לי לסיוע לאחר שהמבנים הקוגניטיביים שלה אודות מודלים לא תאמו לאלו של מאי. מאי הביעה הסתייגות מהקריאה לסיוע:

661 רחל: ...אוהד [קוראת לחוקר]...

662 מאי: מה את רוצה שהוא יענה לך את התשובה?

663 רחל: לא, אני אשאל אותו אם זה הגיוני, נכון הוצאנו את תת היחידה D-ו B, C?

כמו כן, רחל מסבירה את השאלה למאי, וזאת במטרה להבנות לעצמה הבנה יותר מעמיקה:

647 מאי: צריך משהו עם מולקולות המים לעשות?

648 רחל: לא, עשיתי את זה כבר, שואלים אותנו את זה...תראי מה הקטע, זה תת היחידה A, עכשיו יש

649 מולקולות מים שמרוחקות ממנה שהן לא קרובות אליה בכלל. את רואה?

ניתן לזהות שבשונה ממאי, רחל מקפידה להשתמש לרב באחת משלוש אסטרטגיות הלמידה השטחיות (Surface-Processing strategies): קריאה חוזרת של טקסט, קריאה לחוקר לסיוע או שימוש בעזרים חיצוניים. מאי אינה מרוצה מכך מכיוון שהיא חותרת למהר ולסיים את המענה על המשימה.

ג. עניין: מאי השתדלה לחשוב בקול לבקשתה, על אף רצונה לסיים את משימת IPNS. כל כן היא אמרה כמענה לשאלה IPNS-16: "פשוט, נזכרנו במטאפורה המדהימה שאמרתם לנו על המפה..." כדרך להבהיר את אופן מחשבתה. לא ניתן לזהות האם השימוש בשם התואר "מדהימה" נאמר בציניות, אך עבודה נראה שיש כאן פתרון של אתגר אינטלקטואלי שנהנתה ממנו, ועל כן ניתן לזהות ידע אינדיבידואלי בהקשר לפתרון בעיות המייצר עבודה אתגר אינטלקטואלי, במקרה זה העברה בין אנלוגיה שהיא אלמנט המקור (source) לבין תופעה שהיא אלמנט המטרה (Target).

כפי שצוין בניתוח השיח של זוג SB, ניכר שהתלמידות בשני הזוגות מעורבות יותר במהלך המענה על משימת AFP. ייתכנו מספר סיבות לכך: ראשית במשימת AFP מספר השאלות הסגורות גבוה יותר ביחס למספר השאלות הפתוחות (16 סגורות מול 3 פתוחות). שנית, ייתכן שהמודל המולקולרי של החלבון AFP גירה אותן ללמידה יותר מהמודל המולקולרי של החלבון IPNS. שלישית, התפתחות השיח של הזוג MR יצר עניין תלוי סיטואציה עבורן בעקבות הוויכוח שהתעורר ביניהן. רביעית, הזוג MR ייצגו את תצוגת תת-היחידות של החלבון AFP כמאכל צ'ורוס. הייצוג שלהן לתת היחידות שעשע אותן וסיפק עבורן עניין נוסף תלוי סיטואציה:

248 מאי: או, וואה

249 רחל: אויש זה נראה כמו-

250 מאי: ארבע תולעים

251 רחל: לא, אם את ממלאה את זה ומטגנת את זה-

252 מאי: צ'יפסים

253 רחל: צ'ורוס

254 מאי: וואי נכון כן,

ובמהמשך:

333 רחל: וואי, זה נראה עדיין כמו צ'ורוס, הנה תראי, בא לי למלא פה ופה

334 מאי: אף פעם לא אכלתי, זה מאכל כל כך משמין

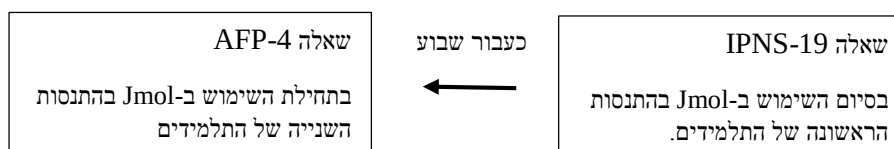
335 רחל: וואי מלא שמן, יאמאי,

סיכום: מבין בנות הזוג MR, מאי היא זו שרכשה ידע אפיסטמי. לעומתה, רחל נמנעה מרכישת ידע במענה לשאלה IPNS-16. כמענה לשאלה AFP-10 רחל הצליחה לשנות רק באופן חלקי מבנה קוגניטיבי קודם

שמנע ממנה רכישת ידע אודות הפרדה בין מייצג למיוצג בהקשר לחלבונים ומודלים מולקולריים – ידע שאותה רכשה רק בסיומו של ריאיון המשך.

מרכיב הידע P2 – הצגת ידע מדעי אודות השימוש באפשרויות התוכנה Jmol

גם עבור מרכיב הידע P2, נותחו שני אפיזודות: שאלה 19 במשימת IPNS ושאלה 4 במשימת AFP (טבלה 14). באיור 11 ניתן לראות את המענה על השאלות ביחס לפעילות התלמידים בשימוש ב-Jmol:



איור 11: מיקום השאלות העוסקות במרכיב ידע P2 במשימות IPNS ו-AFP ביחס לפעילות התלמידים בשימוש ב-Jmol

בשאלה IPNS-19 שני הזוגות התבקשו לבנות בעצמם מודל מולקולרי אשר מציג שיירים צדדיים של חומצות אמינו ציסטאין, ובאמצעות ההצגה התבקשו לציין שקשרים דיסולפידיים בין השיירים הצדדיים הללו אינם קיימים (איור בטבלה 14). בשאלה IPNS-19 מרכיב הידע P2 מועצם, מכיוון שעבור הזוגות עומד אתגר קוגניטיבי בין שני שלבים: (א) להראות שליטה באפשרויות התוכנה, ולהצליח להציג שיירים צדדיים של שתי חומצות אמיניות ציסטאין; (ב) לציין האם בין השיירים הצדדיים של חומצות האמינו קיימים קשרי גופרית. השאלה דורשת מהתלמידות מאמץ קוגניטיבי רק כדי לפענח את המידע שמופיע בשאלה הנוגע לחשיבה מנגנונית (טבלה 14): הבנה שקשרי גופרית מייצבים מבנה חלבון ← הבנה שהקשרים קיימים בין אטומי גופרית ← הבנה שאטומי גופרית נמצאים בשיירי חומצה אמינית ציסטאין. מורכבות נוספת בשאלה נוגעת למידע הכולל מרכיב ידע P1 אשר מהווה מכשול קוגניטיבי: מצוין שקשרי גופרית מופיעים בצבע צהוב. מידע P1 זה מיותר ומכשיל מכיוון שאין קשרים דיסולפידיים בחלבון IPNS ולכן אסטרטגיה של חיפוש קשרים דיסולפידיים שצבעם צהוב מיותרת. במקום, על תלמידים לחפש חומצות אמינו ציסטאין. ובמידה והתלמידים פונים לחפש את הקשרים, הם לא ימצאו קשרים כאלה במודל המולקולרי ולכן המידע מיותר. מכיוון שניתוח האפיזודה מיועד להבחין האם שני זוגות תלמידות המשתמשות ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות, רוכשות ידע P2 במהלך השיח שהן מקיימות? כיצד ומדוע? נתמקד בעיקר במרכיב P2 אשר נבנה על סמך מרכיבי הידע הבסיסיים יותר – C ו-P1.

בשאלה AFP-4 התבקשו הזוגות לענות על שאלה סגורה שבה התבקשו לפענח מידע חזותי אודות מולקולות מים. מולקולות המים מוצגות ככדורים שצבעם אדום והן נמצאות בשטח הפנים החיצוני של החלבון המוצג בתצוגת כדורים ומקלות (טבלה 14). על התלמידות להשתהות עם ציין העכבר על פני המרכיב במודל, בדוגמה זו מולקולת מים, ולזהות בחלונית מידע המופיעה כתוצאה מההשתהות את הסימול המתאים. בדוגמה זו על התלמידות היה לזהות בחלונית המידע את הסימול HOH. מכיוון שזו הפעם הראשונה שבה הזוגות התבקשו להשתמש באפשרות Jmol זו, ומכיוון שמפתחי המשימה היו מעוניינים ברכישת ידע אודות השימוש היעיל בייצוגים החזותיים, הן קיבלו קטע מידע המבהיר שיש להשתהות על פני המרכיב המולקולרי כמרכיב ידע P2. להלן ציטוט מקטע המידע, וההנחיה אשר מודגשת בקו תחתון בציטוט: "בתצוגה זו ניתן

לזהות את האטומים השונים (הכדורים) במולקולה לפי צבעם ואת הקשרים הקוולנטיים (המקלות) בין האטומים השונים. גלילה והשתתפות על פני אטום מסוים יציגו את סוג האטום, את מספרו, מידע בשאלה אם הוא חלק מחומצה אמינית מסוימת או ממולקולת מים וכן" (טבלה 14).

הזוג SB:

א. ידע מוקדם: לאחר קריאת השאלה IPNS-19, הזוג SB פעל בשלבים הבאים:

שלי הציעה לבצע בחירה של תצוגת קשרים ← בטי חיפשה באפשרויות התוכנה מה לבחור ← בטי מצאה בסרגל התפריטים פקודות Element אך שלי ביקשה לבחור קודם (אטומי) גופרית ← שלי הנחתה את בטי להציג באמצעות Bonds ברזולוציה של 0.3 אנגסטרם ולצבוע בצבע צהוב ← בטי ביצעה את ההוראות כדי להציג אך לא היה שינוי בתצוגה.

התלמידות פעלו בגישה של חיקוי סדר הפעולות שבו הציגו שיירים צדדיים של חומצות אמינו באתר הפעיל, סובסטרט ותוצר. לכאורה הגישה שלהן נכונה, אך ניתן לזהות בשיח חוסר במומחיות המוסברת על ידי ההיררכיה במרכיבי הידע (איור 4). על פי היררכיה זו שימוש בתוכנה (P2) דורשת את השימוש במרכיבי הידע C ו-P1. התלמידות בוחרות אטומי גופרית בודדים ומציגות אותם בתצוגת קשרים. הצגה של אטומים בודדים מחייבת תצוגת Atoms ולא Bonds והתלמידות לא נותנות דעתן על כך. על כן הן במבוי סתום וקריאה לחוקר היא השלב הבא שהן מבצעות. מאפיין נוסף הוא מחסור בקישור בין פקודת ה- Disulfide Bonds לבין המושג קשרי גופרית שמונע מהן שימוש בפקודה זו להצגת קשרי גופרית. יש לציין, שגם מחסום השפה, מונע מהן שימוש יעיל באפשרויות התוכנה (P2). בראיונות ההמשך, שלי חזרה לאותה דרך פעולה שננקטה במהלך השיח ולכן לא רכשה את מרכיב הידע P2, אך בטי בחרה להציג שיירים צדדיים של חומצות אמינו ציסטאין בתצוגת CPK-Space fill ונראה שרכשה את הידע.

בשאלה AFP-4 מרכיב הידע P2 מצומצם יחסית. על התלמידות להשתתפות עם ציין העכבר על פני כדורים אדומים ולזהות בחלונית המידע את הכיתוב HOH כדי לסמן את התשובה הנכונה בשאלה הסגורה (טבלה 14). הזוג SB קיימו שיח עימי, שבוע לפני כן, כאשר ענו על משימת IPNS:

376	חוקר: אז האם יש מים או אין מים?
377	בטי: אין מים
378	חוקר: איך את יודעת? תסתכלי על התמונה הסטטית. אולי-
379	שלי: רגע, אדום, מה אמרנו שזה? [4 שניות]
380	חוקר: תעקבו אחרי התצוגה הסטטית אולי היא תעזור לכם להבין, יש פה מים או אין פה מים?
381	שלי: כאילו מה זה לסמן כאילו?
382	חוקר: תעמדי על האדום הזה, אחד מהאדומים, תעצרי, אל תגעי... HOH... שזה,
383	בטי: המים

ומיד בהמשך התלמידות ייצבו את הידע באמצעות המשך השיח בינן לבין עצמן:

392	שלי: לא הבנתי
393	בטי: אויש, זה היה HOH, זה מה זה מוזר... זה H ₂ O.
394	שלי: כן H ₂ O
395	בטי: אני כזה, מים

הזוג SB השתמש בפעם השנייה באפשרויות תוכנת Jmol כשבוע לאחר ההתנסות הראשונה וכשבוע לאחר השיח עימי. בטי שולפת מהזיכרון לטווח הארוך, כשבוע לאחר המידע שהתקבל ממני, את מרכיב ידע P2. על כן התלמידות משתמשות באפשרות התוכנה המדוברת באופן יעיל כפי שמלמד השיח הבא:

שלי: זה זה [מצביעה על אחת מהתשובות]	179
בטי: בואי נראה, [מציבה את הציין על כדור בצבע ירוק וקוראת במלבן הנפתח] לא...	180
שלי: הנה "כדורים כחולים המחברים לכדורים אפורים או כדורים" מה לא? זה לא ה-H ₂ O?	181
בטי: [עוברת עם הציין לכדור כחול ולאחר מכן לכדור אפור] איך הוא עשה את זה?	182
שלי: תעשי על האדום אולי	183
בטי: זה...[מציבה את הציין על כדור בצבע אדום וקוראת במלבן הנפתח]...[HOH] הנה-	184
שלי: הנה כן אדום,	185
בטי: "אדום המחבר ל"	186
שלי: [מאחורי הכדור האדום יש כדור אפור] כדורים אפורים,	187
בטי: אה הנה, לסובב? [מסובבת את המודל] אימאלה, זה? אבל זה לא מחובר לכלום [צחוק]	188
אה כן? אז זה זה [בוחרת את אפשרות ג' הנכונה]	189
בטי: סבבה [מדלגת על קטע הקריאה של המשוב לתשובה],	190

גם ללא קריאת הטקסט המקדים, שיח בנות הזוג מספק הצצה לתרומת שיח עם מומחה לשליפת ידע קודם. בטי שולפת את מרכיב הידע P2 מיד לאחר קריאת השאלה ואומרת "בואי נראה" ומתחילה להשתוות על מרכיבים במודל המולקולרי. בהמשך, בפעמיים רצופות בטי מעלה תהייה שמאיצה לשליפת מרכיב ידע P1 של שלי, אודות תצוגת מולקולות מים. בטי שואלת "איך הוא עשה את זה?" ושלי עונה "תעשי (תשתהי) על האדום אולי". ובהמשך, כתוצאה מההשתוות על אטום חמצן של חומצה אמינית ובהמשך זיהוי של כדור אדום שאינו מחובר בקשרים לכדורים אחרים, בטי אומרת: "אבל זה לא מחובר לכלום", ובתגובה שלי שולפת ידע קודם: "אה, כן? אז, זה זה". כשנה לאחר מכן, בראיונות ההמשך, בטי שלפה את מרכיבי הידע P1 ו-P2 ללא קושי ואילו שלי לא הצליחה לשלוף את הידע מסוג P2 ונזקקה להכוונת המראיין. בנוסף התגלו בריאיון של שלי קשיים בקידוד הסמלים המייצגים את האטומים השונים בתצוגה (P1), ועל כן התגלה קושי נוסף בהבנת הייצוג של אטומי חמצן בחומצות האמינו.

ב. אסטרטגיה: הזוג SB הציג אסטרטגיה שונה לשתי השאלות. בשאלה IPNS-19 הן חיקו את מהלך הפעולה שלהן שקדם לשאלה זו על מרכיבים אחרים ולאחר מכן, כאשר הגיעו למבוי סתום, הסתייעו בי. חיקוי זה נבע מהקפדה על קריאה מעמיקה של קטעי מידע במשימה הקשורים למרכיב הידע P2. לפני מענה על שאלה AFP-4 הזוג SB לא קרא קטע מידע במשימה המתווך את מרכיבי הידע P1 ו-P2, אך שלף ידע משיח קודם עימי.

ג. עניין: מרכיב הידע P2, כפי שהשתקף מאפיונות השיח הארוכה מאוד שהתעוררה בעקבות המענה על שאלה IPNS-19 (בנספח 7 השיח מופיע במלואו), הביא את הזוג SB לידי עניין תלוי סיטואציה ברמה גבוהה. אף שבנות הזוג SB נשארו כמעט לבדן בכיתה, ולאחר שחבריהן לכיתה יצאו מהכיתה בסופו של יום לימודים, המחויבות והמעורבות של בטי ושלי לבניית מודל מולקולרי אשר מציג קשרי גופרית הייתה גבוהה. מחויבות למענה על שאלה זו הייתה גבוהה בהרבה מהמחויבות למענה על השאלות הקודמות שעסקו

במרכיבי ידע אחרים. כמו כן, מעורבותי בהכוונה המקדמת תשובה לשאלה הובילה את התלמידות לא לוותר בסופו של דבר על המענה לשאלה:

990 שלי: אה, הנה יצא לנו יפה, תביאי כסף

סיכום: בשונה משני מרכיבי הידע הקודמים שנידונו: P1 ו-E, רכישת ידע של מרכיב P2 לוותה בהשתתפות ומעורבות התלמידים במשימה. ניתן לזהות כי ברכישת ידע P2 התבקשה מעורבות של מורה בקידום פתרונות הקשורים למרכיב ידע P2. הזוג SB הסתייע בקטעי מידע מהמשימה אך גם במורה כדי לרכוש את מרכיב הידע P2. בהקשר לשאלה IPNS-19 לתלמידות היה חסר ידע מסוג C ו-P1 כדי להשתמש באופן יעיל במרכיב הידע P2, ועל כן נעזרו בי.

הזוג MR:

ידע מוקדם: לאחר קריאת השאלה IPNS-19 הזוג MR פעל לפי השלבים הבאים:

רחל תיווכה למאי את השאלה "איזה פעולות צריך לעשות כדי לבדוק אם קיימים קשרי גופרית" ← מאי הציעה "לצבוע את הגופרית או משהו" ← רחל פנתה לסרגל התפריטים לפקודת Color אך לא הצליחה לבצע שום פעולה נראית ועל כן שתי הבנות הצהירו שאין להן מושג כיצד לפעול ← מאי הציעה לכתוב בתשובה "אין לנו מושג" ורחל דרשה ממני שאנחה אותן כיצד לפעול. כתוצאה מכך התגלה קונפליקט ביניהן האם לגיטימי שאסייע בהצגת המודל באמצעות שימוש באפשרויות התוכנה.

בהמשך הבהרתי לזוג MR כי המושג קשרי גופרית זהה למושג קשרים דיסולפידים. בנוסף, הנחתי את התלמידות להציג שיירים צדדיים של חומצות אמינו ציסטאין. לאחר מכן, בנוכחותי רחל פעלה על פי השלבים הבאים: השתמשה בפקודה לצביעת קשרים דיסולפידים בצבע צהוב ← צפתה בתצוגה החזותית ← לא זיהתה שינוי בתצוגת המודל המולקולרי.

הידע המוקדם שבו רחל השתמשה כדי לנקוט בדרך פעולה זו התבסס על הצורך להתאים את התצוגה להערה המופיעה בשאלה "קשרי גופרית מופיעים בצבע צהוב" (שכאמור לעיל הייתה מיותרת מלכתחילה) ועל כן בחרה את פקודת Color כפקודה שמצליחה לצבוע מרכיבים על פי בחירת המשתמש. עם זאת, לרחל חסר ידע נוסף אודות מרכיב P2. הידע שחסר לה הוא דרך פעולה להציג קשרים דיסולפידים באמצעות שימוש בפקודה המאפשרת בשלב הראשון הצגה ורק לאחר מכן צביעה (שימוש בתפריט Style בשלב הראשון ולאחר מכן תפריט Color). שימוש נכון באפשרויות התוכנה מוביל לצביעת ברירת המחזל של קשרי הגופרית בצבע צהוב.

דרך יעילה להדגמה נכונה עבור דרך הפעולה של רחל, היא שליפה של קובץ מבני של אינסולין מהמאגר (קוד קובץ מבני: 1ZNI) והצגת קשרים דיסולפידים בין שיירי ציסטאין (שכאמור לא מוצגים עבור החלבון IPNS). כחוקר לא בחרתי לפעול כך במסגרת השיח מכיוון שידעתי שבחלבון IPNS אין קשרים דיסולפידים, ועל כן אסטרטגיה להציג קשרים דיסולפידים כדי להוכיח שהם אינם שם לא מובילה בהכרח למסקנות נכונות מכיוון שתלמידים עלולים לבחון את חוסר השינוי בתצוגה ככישלון שלהם בשימוש בידע P2. הדרך המתאימה יותר היא להציג ולהדגיש את השיירים הצדדיים של חומצות אמינו ציסטאין בחלבון

IPNS. דרך הצגה זו, שדרכה כיוונתי את בנות הזוג, הבהירה להן שבין השיירים הצדדיים אין קשרים מכיוון שהמרחק היחסי ביניהן גדול.

לפני המענה על שאלה AFP-4 הזוג MR לא קרא את קטע המידע הקודם לשאלה, ועל כן לא הצליח לזהות כי יש להשתנות על הייצוגים במודל המולקולרי וכך לקבל מידע אודות מרכיבים אלו.

רחל: טוב, הנה "תצוגת ברירת המחל של המבנה נקראת תצוגת אטומים Balls and Sticks", בתצוגה זו	273
נה נה, ני ני [צחוק], [דילוג על טקסט].	274

כתוצאה מכך נוצר מחסור בידע מוקדם מסוג P2, הנובע ישירות מהימנעות מקריאת קטע המידע. על כן, נמנע מהם פענוח מוצלח של מערכת הסימולים במענה, והוביל לשיח מתסכל וחסר תוחלת:

מאי: נראה לי המים, אה, אה, המים... מה יש פה? נראה לי הכחול	285
רחל: להגדיל?	286
מאי: כן, תגדילי לאחד כזה שנראה אותו ממש טוב,	287
רחל: הנה	288
מאי: מה את חושבת?	289
רחל: שזה כמו כדורים בג'מבורי,	290
מאי: נכון, אבל מה עוד את חושבת?	291
רחל: [צחוק]	292
מאי: מה הם רצו? את קשרי המים?	293
רחל: מולקולות מים	294
מאי: מולקולות מים [5 שניות] לדעתי באמת הכחול, כי הכחול זה מים כזה,	295
רחל: כן, אבל זה [קוראת אחת מהתשובות] כחול שמייצג את אטומי החמצן, או כחול שמחובר לאפור, ואז זה,	296
מאי: הראשון, תעשי [אפשרות] א'	297
רחל: נראה לי ש [אפשרות] ב'	298
מאי: לדעתי זה [אפשרות] א'	299
רחל: למה?	300
מאי: לא יודעת, תעני מה שאת חושבת, אני חושבת שזה [אפשרות] א', לא, לא תסמני [אפשרות] ב' כי	301
אם נטעה תאשימי אותי	302
רחל: אני לא אאשים אותך בשום דבר	303
מאי: אני פשוט חושבת כי זה כחול וחמצן מים	304
רחל: אבל שניהם כחולים	305
מאי: בסדר, לא נורא, תעשי הגש שאלה, [משוב מראה תשובה שגויה] שיט אוי איזה באסה.	306
רחל: [לוחצת על תשובה ב', משוב מראה תשובה שגויה] אוי	307
מאי: אז זה ד, [בלחש] זה ג אני מתה מצחוק [רחל לוחצת על אפשרות ד'] נו, הגש שאלה	308
רחל: [לוחצת, משוב מראה תשובה שגויה] זה [אפשרות] ג'	309
מאי: [צוחקת] סורי אוהד	310
רחל: ידעתי מהתחלה!	311
מאי: רגע בואי נראה, תעלי אני רוצה לקרוא [קוראת משוב לתשובה]	312
רחל: "כדורים" [צחוק]	313
מאי: מאיפה אני אמורה לדעת? אני באמת יכולה, כשאני רואה את זה להבין מה, איזה מולקולה זה	314
מה?	315
רחל: אין לי מושג, גם אני לא ידעתי הייתי בטוחה שזה [אפשרות] ב', טוב לא נורא. אהה	316

השיח העקר, שמציף תסכול בקרב זוג הבנות וחושף ידע מוקדם שגוי של מאי. תשובתן מסתמכת על ידע מוקדם ופרימטיבי אודות תופעות הנקרא P-prims (Smith III et al., 1993) של מאי שאמרה: "לדעתי באמת (הכדור) הכחול, כי הכחול זה מים כזה". כאן ישנה דוגמה נוספת להסתמכות רחל על מאי, אשר

מייצרת ידע מסוג P1, והיא מוותרת על הצורך להתבסס על ידע מוקדם. מאי נבוכה מחוסר היכולת שלה לענות על השאלה ומבקשת מרחל הסבר. תשובתה של רחל מעידה על ניתוק ידע מסוג P1 ממרכיב ידע C והיא עונה [שהיא חושבת] "שזה כמו כדורים בג'מבורי". כלומר בדוגמה זו ניתן לראות כיצד ידע חסר משמעות מסוג P2 המנותק ממרכיב הידע C בא לידי ביטוי בשיח של התלמידות.

בראיונות ההמשך עבור שתי הבנות, הן התבקשו לקרוא את הטקסט המקדים ומשם החל תהליך למידה עבור כל אחת בנפרד. בתהליך נחשף שורש התפיסה הנאיבית של מאי אשר לא הצליחה להבין מדוע אטומי חמצן מיוצגים ככדור אדום. מאי שהיא תלמידת מגמת ביולוגיה, התקשתה בקידוד מערכת הסמלים על פי צבעים של היסודות C, N, O, H, ומעבר לחוסר ההבנה בסימול מוסכם של צבעי האטומים, הניחה שהסימול HOH מייצג תרכובת שונה מ-H₂O, בנוסף מאי התקשתה לזהות אטומי חמצן כמרכיבים בלתי נפרדים מחומצות אמינו.

בריאיון עם רחל, תלמידת מגמת כימיה, שוב זוהה תהליך למידה אשר חשף עד כמה רכישת ידע מסוג P1, בעיקר המיומנות קוגניטיבית של קידוד, היא משימה מאתגרת עבורה. בראיון היא מתארת עד כמה חסר לה מרכיב ידע זה כדי להשתמש באופן יעיל במודלים מולקולריים. להלן החלק בריאיון המבהיר זאת:

רחל: הי זה הצ'ורוס [מספרת על המקום שבה היא אוכלת אותו; לאחר מכן היא קוראת את הטקסט שלפני השאלה]

מראיין: זאת שאלה פוטנציאלית לבגרות.

רחל: אמרו שאפשר לעמוד על זה ולראות...או נעמוד על זה ונראה. ככה? זה ממש מבלבל...אני עומדת עכשיו על כחול, זה אומר לי משהו, מה אני מחפשת? מים. אני לא יודעת, מה אני מבינה מהדברים האלה?...זה נורא מבלבל. כן.

מראיין: את יכולה להגיד מה מבלבל אותך?

רחל: עומס צבעים, וזה ממש צפוף ויש לזה צורה של צ'ורוס. לא יודעת. אני גם כן...HOH כאילו H₂O. לא מבינה מה אני רואה, כאילו אני עומדת על זה ומה המידע הזה אומר לי.

מראיין: תראי?

רחל: אהה, זה מים יש לי זה מים, או זה האדומים הבודדים. נכון? זה בפינה שם שאיבדתי אותו. אבל זה, זה נראה לי. האדומים הבודדים.

את רכישת הידע מסוג P1 רחל ביצעה רק לאחר קריאה של הטקסט ושימוש בידע מסוג P2. השימוש היעיל באפשרויות Jmol וקידוד הייצוגים החזותיים נרכש במהלך השיח בין המראיין לרחל אך היה חסר לחלוטין בשיח הבנות המקורי.

ב. אסטרטגיה: הזוג MR השתמש בסיועי עבור מענה על שאלה IPNS-19, מכיוון שרחל התעקשה על שימוש באסטרטגיה זו למורת רוחה של מאי. לפני מענה על שאלה AFP-4 הזוג MR לא קרא קטע מידע המתווך את מרכיבי הידע P1 ו-P2, ועל כן לא הצליח לענות על שאלה זו, ועל כן התפתח בין בנות הזוג שיח מתסכל וחסר תוחלת.

ג. עניין: מרכיב הידע P2, כפי שהשתקף בשאלה IPNS-19, הביא לידי עניין תלוי סיטואציה ברמה גבוהה עבור הזוג SB, אך לא מיד בתחילת השיח. בתחילתו של השיח, מאי החליטה שהיא נמנעת מביצוע פעולות ב-Jmol כתוצאה מהאתגר שנתקלה בשימוש באפשרויות התוכנה שמטרתו לבנות מודל אשר יציג קשרי גופרית. עם זאת, מחויבותה של רחל להתמודד עם האתגר שמקורו במרכיב הידע P2, הייתה גבוהה:

מאי: איך עושים את זה?	1048
רחל: אין לי מושג, אוהד.	1049
מאי: אוהד, אם אנחנו לא יודעות, אנחנו נרשום לא יודעות?	1050
חוקר: אהה	1051
מאי: פשוט אין לנו מושג-	1052
רחל: איך אני בודקת את הקשרי-	1053
חוקר: אהה, אז שאלה אחרונה, אוקיי, יש לכם קשרי גופרית שם הייתן יכולות לראות אם יש קשרי גופרית שם?	1054
מאי: לא יודעת	1055
חוקר: בתוך החלבון	1056
רחל: כן, אבל אני לא יודעת איך עושים את זה. אני לא מכירה את התוכנה מספיק טוב. לא?	1057
חוקר: אוקיי אם את חושבת שאת לא יכולה, אוקיי אז זה משהו שבא ממך	1059
רחל: לא אני יכולה למצוא, רק תסביר לי איך עושים את זה	1060
מאי: הוא לא יכול, זו השאלה.	1061
חוקר: זו הייתה השאלה, לראות	1062
מאי: אין לך מושג	1063
רחל: לא...אבל כתבו לנו איך עושים את זה?	1064
מאי: אין לך מושג! את לא מבינה שאין לנו מושג! תרשמי לא יודעת, כי אני לא יודעת איך עושים את זה.	1065
רחל: למה? "תארו מה הפקודות שעליכם לבצע על מנת לבדוק שאלה זו?"	1066
מאי: את יודעת איזה פקודות צריך לבצע כדי-	1067
חוקר: אני רוצה להראות-	1068
רחל: איך בודקים	1069
	1070

לאחר שהזוג, בסיועי, הציג את השיירים הצדדיים של הציסטאין והראה שלא קיימים קשרי גופרית, מאי שינתה את הלך הרוח שלה וסיפקה את האמירה הבאה:

מאי: [במקביל לתשובה שאותה מקלידה רחל לשאלה 19] מגניב, גם קראתי את הסיכום	1142
חוקר: כן?	1143
מאי: כן	1144

מאי שיקפה את העניין שהתפתח עבורה בשאלה האחרונה, כתוצאה מהאתגר וחווית ההצלחה, בשאלה שבה נדרשה לבנות בעצמה מודל מולקולרי כדי להציג תכונה של חלבון, וזאת בניגוד מוחלט לרצונה לסיים מוקדם וללכת הביתה. היא השתמשה במילה "מגניב" כדי לתאר את המשימה, ובחרה לספר לי שקראה קטע מידע, וזאת בניגוד לאי-קריאה של קטעי מידע קודמים עקב רצונה לסיים ולהגיש את המשימה במהירות. חווית העניין ממרכיב הידע P2 חזרה פעמים רבות (אפיזודות הנוספות אינן מוצגות כאן) לאחר קבלת משוב חיובי שאישר מימוש מוצלח של מרכיב הידע.

על אף הכישלון במענה על שאלת AFP-4 וחוסר התוחלת בשיח שהתקיים בין זוג התלמידות, במשימת AFP, השנייה במספר, ככל שרחל משתמשת יותר באפשרויות Jmol כך מתפתחת עבורה חווית הצלחה בשימוש מועיל באפשרויות התוכנה של Jmol ובכישות מרכיב ידע P2 והיא מציינת בחמש הזדמנויות שונות בשיח את שליטתה במרכיב ידע זה. באחת מהפעמים היא אומרת למאי:

ומאי עונה לה:

מאי: איזה יפה זה!	944
רחל: ואיי, הסגול מהמם,	945
מאי: כן, ממש אהבתי את התוכנה הזאת [5 שניות]	946

מאפיינים דומים של עניין תלוי סיטואציה בהקשר למרכיב הידע P2 עולים גם בשיח של בנות הזוג SB ובעיקר במשימת AFP. ממצאים אלו ואחרים מעידים על ניתוק שחל בין יכולת התלמידים להשתמש באופן מועיל בידע קודם בהקשר למרכיבי הידע C ו-P1, לבין יכולתם לחוש חווית הצלחה וליהנות מהשימוש המאפיין משחק באפשרויות התוכנה של Jmol. כלומר, על אף קטעי המידע והשאלות במשימות Jmol זוהו על ידי הקשר ההיררכי בין השימוש היעיל באפשרויות התוכנה (P2) לבין ידע קודם במרכיבי הידע C ו-P1 כפרקטיקה מדעית (איור 4), תלמידים מגלים עניין תלוי סיטואציה בשימוש באפשרויות התוכנה גם כשיש קשר חלש בין מרכיב ידע P2 למרכיבי ידע C ו-P1, ולעיתים גם שאין קשר ביניהם בכלל, והם משנים את התצוגה רק לשם המשחק. רווח צפוי עשוי להתממש, במידה ותלמידים יפיקו הנאה מאפשרויות התוכנה כך שידעו לבנות מודלים באמצעות השימוש היעיל בתוכנה וזאת בהתבסס על ידע מוקדם במרכיבי הידע C ו-P1, בדומה לאופן השימוש של המומחים בתוכנה למידול מולקולרי של חלבונים.

סיכום: רכישת ידע של מרכיב P2 מושפעת מידע מוקדם, אך גם משימוש באסטרטגיות למידה ומעניין. מחד, עניין תלוי סיטואציה בשימוש באפשרויות תוכנת Jmol מסייע לזוג MR לגלות מוטיבציה לקדם מענה לשאלה מורכבת וכנגד מהלך העניינים וכתוצאה מכך לרכוש ידע חדש כפי שניתן ללמוד משיח המענה על שאלה IPNS-19. מאידך, הימנעות מאסטרטגיה של קריאה מעמיקה של קטע מידע מובילה לתסכול מצטבר בקרב בנות הזוג כפי שניתן ללמוד משיח המענה על שאלה AFP-4.

סיכום כולל של הממצאים האיכותניים:

לסיכום המענה על שאלת מחקר 4, עולה כי ניתוח השיח של הזוג SB ושל הזוג MR על פי המודל ללמידת-תחום (MDL) של Alexander (2004), מלמד על כך שארבעת התלמידות בשני הזוגות ממקמות בסקלה כטירוניות הנמצאות בשלב ההתאקלמות, וכמעט ולא ניתן לזהות בשיח מאפיינים של שלב הכשירות בתחום הביוכימיה בהקשר לשלושת הקריטריונים המופיעים במודל של Alexander: ידע, אסטרטגיה ועניין. בחינת השיח בשאלות הממוקדות בשלושה מרכיבי ידע P1, P2 ו-E המתווספים למרכיב ידע C הממצאים הבאים:

(א) מרכיב הידע P1: השיח מתוך שאלה IPNS-1 מעיד על כך שהתלמידות נמנעו משימוש במרכיב ידע P1 על אף שייצוג חזותי של רצף חלבון במבנה ראשוני צורף לשאלה. השיח סבב אך ורק סביב תכנים של מרכיב הידע C והעיד על רכישתו. אך לא הופעלה אסטרטגיה של שימוש יעיל בייצוג החזותי. בשתי שאלות בדרגת קושי שונה אשר דרשו פענוח ופירוש של מידע חזותי מתוך מודל מולקולרי המוצג ב-Jmol, שני הזוגות השתמשו גם במרכיב ידע P1 כדי לענות על השאלות. בשאלה המורכבת יותר, IPNS-15, אשר דרשה פענוח ופירוש של ייצוגים חזותיים נצפה שיח מועיל רק עבור הזוג SB אשר השתתף בפרויקט מחקר

שעסק בחלבון PON1. כאמור, שני הזוגות הראו עניין תלוי סיטואציה ושימוש באסטרטגיות המאפיינות את שלב ההתאקלמות באפיזודות שנותחו;

(ב) מרכיב הידע E: משיח התלמידות ניתן לזהות קושי ברכישת ידע אפיסטמי חדש. להוציא את מאי אשר אימצה חשיבה אפיסטמית שהוצגה בקטעי מידע במשימות, שאר התלמידות לא השכילו לזהות את שני המבנים האפיסטמיים: תצוגות שונות מציגות תכונות שונות של מולקולות חלבון ותצוגות המודל המולקולרי אינן נראות בהכרח כפי שמולקולות חלבון נראות במציאות אלא רק מתארות תכונות שלהם. עבור התלמידות נמצא כי מחסור באסטרטגיות למידה מנע מהן לרכוש מבנה קוגניטיבי זה. בנוסף, ניתוח הממצאים הראה כי רחל לא החזיקה במבנה האפיסטמי הקובע כי המודל המולקולרי הוא רק מודל ואינו 'הדבר עצמו'. בריאיון ההמשך, וכתוצאה מהתערבות המראיון, רחל רכשה את המבנה האפיסטמי;

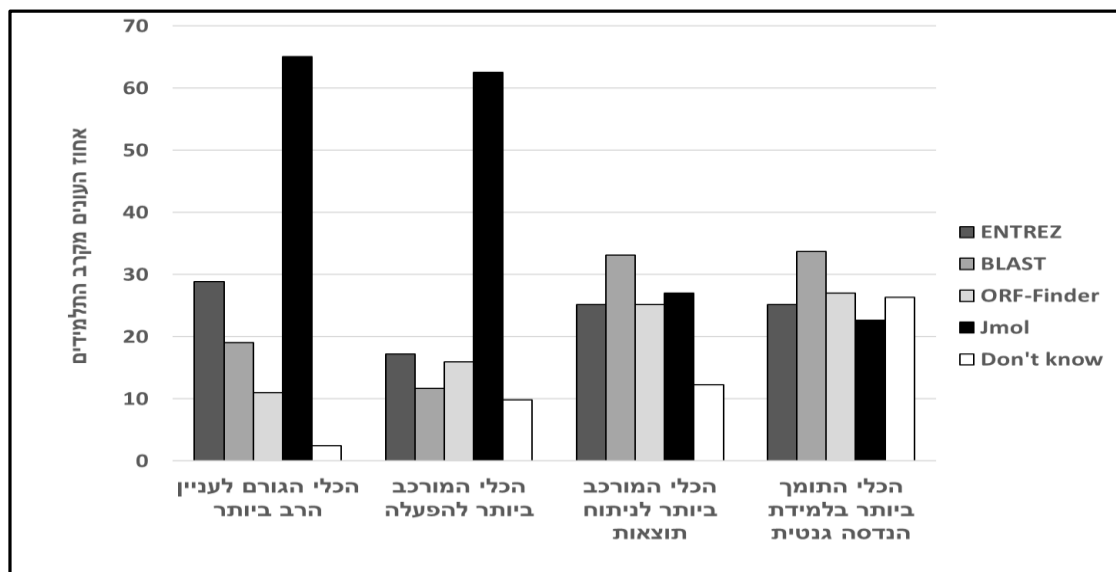
(ג) מרכיב הידע P2: אף שלא ניכר שינוי בהתקדמות בשלב שבו נמצאות התלמידות על פי הקריטריונים ללמידת תחום, ככל שפעילות התלמידות התקדמה, כך התלמידות רכשו ידע רחב יותר של מרכיב P2. לרכישת ידע זה נלווה שימוש באסטרטגיית קריאה ספציפית להוראות בשימוש באפשרויות התוכנה. באחת מהאפיזודות הזוג MR לא העמיק בקריאת קטע המידע, ולאחר מכן בחר שלא לקבל סיוע ממני וכתוצאה מכך השיח הקשור למרכיב ידע P1 הפך עקר. עניין תלוי סיטואציה, המאפיינת את שלב ההתאקלמות, זוהה בשימוש באפשרויות התוכנה, בקרב שני הזוגות. רמת העניין של התלמידות במרכיב ידע P2 הייתה גבוהה בהשוואה למרכיבי ידע אחרים. עבור רחל רמת העניין הגבוהה במרכיב ידע P2 והחתימה לרכוש ידע זה, עמדה בניגוד לכך שהתקשתה לרכוש את מרכיבי הידע P1 ו-E.

3 תפיסות תלמידים ומורים את הלמידה אודות חלבונים באמצעות שימוש במשימות Jmol

במחקר נבדקה תפיסתם של תלמידים ומורים על אופן הלמידה תוך שימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות. אף שלמידה מתוארת כאן כרכישת ידע אודות חלבונים, ההקשר שבו תלמידים משתמשים במשימות Jmol הוא במסגרת לימודי הביואינפורמטיקה המחייבים אותם להשתמש במספר כלים נוספים (ראה פרק קונטקסט למחקר). המענה על השאלון באמצעותו נבחנו תפיסות התלמידים (שאלון III בנספח 4) מורכב משלושה חלקים. כל אחד מהחלקים בשאלון בוחן את תפיסות התלמידים מנקודת מבט שונה, לאור שאלות המחקר.

שאלת מחקר 5 - כיצד תופסים התלמידים את Jmol בהשוואה לכלים ביואינפורמטיים שבהם התנסו במסגרת הלימודים במגמת מערכות ביוטכנולוגיות?

מניתוח תשובות התלמידים ($n=163$) לחלק בשאלון הנקשר לשאלת מחקר 6 (איור 12) עולה כי 65% מהתלמידים סימנו את Jmol ככלי הביואינפורמטי שסיפק להם את רמת העניין הגבוהה ביותר (אף ש-20% מהתלמידים סימנו בשאלה זו כלי אחד לפחות בנוסף ל-Jmol). יחד עם זאת, 62% מהתלמידים סימנו כי Jmol מורכב להפעלה בהשוואה לשלושת הכלים האחרים בהם התנסו. בנוסף, התלמידים לא ראו בניתוח הייצוגים החזותיים שהוצגו במודל המולקולרי מיומנות קוגניטיבית מורכבת בהשוואה לניתוח דפי התוצאה של הכלים הביואינפורמטיים האחרים, ואחוז התלמידים הנמוך ביותר קישר את הלמידה באמצעות Jmol כמסייעת להבנת הפרק הנדסה גנטית אשר היווה פרק חובה כחלק מההערכה של בחינת הבגרות. על פי המענה לחלק זה של השאלון נראה שרוב התלמידים חווים את הלמידה באמצעות Jmol כמעניינת בהשוואה ללמידה באמצעות כלים ביואינפורמטיים אחרים, אך יש לסייג ולהבהיר שתפיסות אלה אינן מעידות בהכרח על התפתחות עניין כפי שתוארו בספרות (Hidi & Renninger, 2006). העניין המדווח כאן הוא יחסי לעניין שיוצרים כלים ביואינפורמטיים אחרים. בנוסף, לא ניתן לזהות מהו מרכיב הידע המשפיע במיוחד על עניין התלמידים בשימוש בכלי: האם מדובר בשימוש בייצוגים החזותיים (P1) או השימוש באפשרויות התוכנה (P2), שכאמור דווח על ידי התלמידים כמורכב. החלק הבא במענה התלמידים על השאלון מספק לכך תשובה.



איור 12: העדפות תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות הניגשים לבחינת בגרות בביואינפורמטיקה לכלי ביואינפורמטי אחד או יותר, בהשוואה לכלים אחרים ($n=163$). העמודה הצבועה בשחור מציינת את אחוז העונים שבחרו באפשרות Jmol

שאלת מחקר 6 – מהן תפיסות התלמידים על תרומתם היחסית של מרכיבי הידע הפרוצדורלי הנדרשים ללמידה אודות חלבונים במהלך השימוש ב-Jmol?

במחקר זה מובחנים שני מרכיבי ידע פרוצדורליים המסווגים לשתי פרוצדורות שימוש ב-Jmol: (א) השימוש באפשרויות תוכנת Jmol (P2) ו-(ב) השימוש בייצוגים החזותיים שנצפים ב-Jmol (P1). בחלק השני של השאלון ($n=163$) התלמידים התבקשו לבחור האם השימוש באפשרויות התוכנה (או הפעלת

Jmol), או עצם השימוש בייצוגים חזותיים המציגים את מבנה החלבון, תרם להיבטים שונים במסגרת הלמידה שלהם. התוצאות מתוארות בטבלה 15.

בהשוואה של השכיחות הקיימת מול השכיחות האקראית של תשובות התלמידים בכל שאלה בנפרד נמצאו הבדלים מובהקים בין תפיסת התלמידים את השימוש באפשרויות תוכנת Jmol לבין תפיסת התלמידים את השימוש בייצוגים החזותיים הנצפים ב-Jmol. נמצא כי תלמידים רואים באופן מובהק את הצפייה בייצוגים החזותיים של מודלים תלת-ממדיים של חלבונים הנצפים ב-Jmol כגורם העיקרי התורם להבנת נושא החלבונים (היגד 2) $\chi^2_{(3)}=30.35$ $p<.0001$ וכן כגורם העיקרי לרצון ללמוד על חלבונים (היגד 1) $\chi^2_{(3)}=15.17$ $p<.005$. לעומת זאת, תלמידים רואים באופן מובהק את השימוש במאפייני תוכנת Jmol כגורם העיקרי בהגברת העניין שלהם בלמידה (היגד 4) $\chi^2_{(3)}=24.65$ $p<.0005$ וכן כגורם העיקרי שסייע להם להבין את העיקרון האפיסטמי שתצוגות שונות של חלבון מדגישות מאפיינים שונים של מבנה חלבון (היגד 3) $\chi^2_{(3)}=13.35$ $p<.005$.

טבלה 15: התפלגות תפיסות תלמידים (n=163) על פרוצדורות שימוש ב-Jmol התורמות להיבטים שונים במסגרת הלמידה

אחוז העונים מסך המדגם (n=163)				ההיגד המאפיין
העובדה שהפעלתי Jmol	העובדה שמבנה חלבון הוצג בפניי	שניהם במידה שווה	אף לא אחד מהם	
11	40.5	26.5	22	1. מהו המאפיין שגרם לי לרצות יותר ללמוד על חלבונים?
17.5	40.6	29.4	12.5	2. מהו המאפיין שגרם לי להבין יותר על חלבונים?
39.3	26.4	22.7	11.7	3. מהו המאפיין שסייע לי להבין את העיקרון שתצוגות שונות של חלבון מדגישות מאפיינים שונים של מבנה החלבון?
40.6	21.3	24.4	13.8	4. מהו המאפיין שגרם לי להנאה רבה יותר?

תפיסות אלו מעידות על כך שייתכן ועצם השימוש האקטיבי באפשרויות התוכנה משפיע על העניין בקרב התלמידים. ניתן להסביר את הממצא ש-Jmol מספק עניין רב בהשוואה לכלים ביואינפורמטיים אחרים (איור 12) בכך שהכלים האחרים אינם דורשים מהתלמיד להשקיע זמן ומאמצים קוגניטיביים בכלי הביואינפורמטי, אך רכישת מיומנות השימוש בתוכנה עצמה היא זו שמספקת עבורם אתגר ועל כן עניין

תלוי סיטואציה, שהוא איננו העניין האינדיבידואלי שמאפיין מומחים (Alexander, 2004). כלומר, ייתכן ועל פי תפיסות התלמידים העניין בלמידה לא נובע מעצם הצפייה במולקולות החלבון אלא מעצם המשחק באפשרויות התוכנה. אף על פי כן, תלמידים מדווחים על כך שמרכיב הידע של השימוש בייצוגים החזותיים במודל המולקולרי הוא זה שגורם להם לרצות ללמוד על חלבונים והוא זה הגורם להם להבין אודות חלבונים. ניכר שתלמידים רוצים ללמוד על חלבונים מכיוון שהם רוכשים ידע במהלך הלמידה ולא בגלל העניין שהשימוש באפשרויות התוכנה מייצר. לסיום, באופן מפתיע רבים מהתלמידים ראו את השימוש באפשרויות התוכנה כתורם יותר להבנת העיקרון האפיסטמי הקובע שתצוגות שונות של חלבון מדגישות מאפיינים שונים של מבנה החלבון. ממצא זה עומד בהלימה לתאוריה של Schwarz & White (2005) אשר הראו כי פרקטיקות של מידול (Modeling practices) מקדמות הבנה של היבטים הנוגעים למודל עצמו.

שאלת מחקר 7 - מהן תפיסות תלמידים על האתגר בלמידה אודות חלבונים לאור השימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות?

בחלק זה של השאלון התבקשו התלמידים לבטא הסכמה או חוסר הסכמה עם 14 היגדים, מתוכם ארבעה הופכיים, על פי סולם מסוג ליקרט (Likert type scale) אשר מורכב מ-4 נקודות: מ-1 (לא מסכים) ועד 4 (מסכים). טבלה 16 בעמוד הבא מציגה את טעינת הגורמים, המהימנות, הממוצעים וסטיות התקן של ההיגדים שהתקבצו לשלושת הגורמים שזוהו: (א) מרכיב הידע P2 – האתגר בשימוש באפשרויות תוכנת Jmol; (ב) מרכיב הידע P1 – האתגר בהבנת התצוגות החזותיות בהקשר לידע אודות מבנה חלבון; ו-(ג) מרכיב הידע P1 – האתגר בהבנת התצוגות החזותיות בהקשר לידע אודות תפקוד חלבון.

מהממצאים עולה תמונה מעניינת של דיווח התלמידים (n=163) בנוגע לשימוש ב-Jmol כמקור ללמידה אודות חלבונים. מדיווח התלמידים על השימוש באפשרויות התוכנה נראה שיש פעולות פרוצדורליות שנתפסות כפשוטות לתלמידים כגון הזזת התצוגה או שינויה לתצוגה אחרת, אך יש גם פעולות שנתפסות כמורכבות עבורם כגון בחירת מרכיב בתצוגת מבנה החלבון באמצעות לוח הבקרה או סרגל התפריטים. ממצאים אלה אינם מפתיעים אך הם מלמדים כי השימוש באפשרויות תוכנת Jmol אינו טריוויאלי ומעיד על מורכבות שיש לקחת בחשבון בהוראת הנושא. כמו כן, ממצאים אלה מסבירים את תפיסת התלמידים בנוגע לאתגר היחסי בשימוש ב-Jmol בהשוואה לכלים ביואינפורמטיים אחרים. יצוין, כי קשיים אלו דווחו בנקודת זמן שבה התלמידים נדרשו לשליטה בשימוש באפשרויות Jmol לצורך בחינת הבגרות ולאחר שקיבלו תמיכה ממוריהם בהקשר לשימוש יעיל באפשרויות Jmol וכן הסתייעו בעזרים מסביבת הלמידה, בהסברים מפורטים בגוף המשימות וכן בצפייה בסרטון הדרכה מלווה עבור הכנה מיטבית לבחינה.

טבלה 16: תוצאות מתוך ניתוח גורמים להיגדים הבודקים תפיסות תלמידים על האתגר בלמידה אודות חלבונים במהלך שימוש ב-Jmol בתיווך משימות למידה (n=163)

קטגוריה	ההיגד	ממוצע (Likert type scale 1-4)	סטיית תקן	טעינת הגורמים	מהימנות Cronbach's α
מרכיב הידע P2 האתגר בשימוש אפשרויות תוכנת Jmol	(1) בחירת חלק ממבנה החלבון באמצעות לוח הבקרה (Console) הצגתו וצביעתו, היא פעולה פשוטה עבורי כשאני מפעיל Jmol	2.79	1.05	.68	0.8
	(3) הבנתי את תמונות המסך שצולמו מתוך Jmol והופיעו במשימת הלמידה	3.22	0.86	.59	
	(4) סיבוב, הקטנה והגדלה של תצוגת החלבון היא פעולה פשוטה עבורי כשאני מפעיל Jmol	3.66	0.75	.51	
	(7) שינוי תצוגת חלבון אחת לתצוגת חלבון אחרת היא פעולה פשוטה עבורי כשאני מפעיל Jmol	3.26	0.91	.73	
	(13) בחירת חלק ממבנה החלבון באמצעות סרגל הכלים (ללא לוח הבקרה Console) הצגתו וצביעתו, היא פעולה פשוטה עבורי כשאני מפעיל Jmol	2.66	1.06	.63	
	(16) אני מבין את ההנחיות להפעלת Jmol אשר מופיעות במשימת הלמידה	3.15	0.92	.69	
	(17) שינוי תצוגת החלבון (לדוגמה מתצוגת כדור מקל לתצוגת מבנה שניוני) הייתה פעולה מורכבת עבורי כשהפעלתי Jmol	3.11	1.00	-.39	
מרכיב הידע P1 האתגר בהבנת התצוגות החזותיות בהקשר לידע אודות <u>מבנה</u> חלבון	(9) הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין את מאפייני המבנה השלישוני שלו	3.08	0.91	.47	0.68
	(14) הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol לא מסייעת לי להבין את מאפייני המבנה השניוני שלו	3.03	0.98	-.68	
	(18) הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין את מאפייני המבנה השניוני שלו	2.87	0.97	.61	
מרכיב הידע P1 האתגר בהבנת התצוגות החזותיות בהקשר לידע אודות <u>תפקוד</u> חלבון	(2) הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol לא מסייעת לי להבין מדוע היצור החי המבטא את החלבון מותאם לסביבתו הטבעית	2.48	1.05	-.67	0.8
	(6) הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין את פעילות החלבון ביצור החי	2.39	0.86	.67	
	(10) הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol לא מסייעת לי להבין את פעילות החלבון ביצור החי	2.54	1.04	-.69	
	(15) הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין מדוע היצור החי המבטא את החלבון מותאם לסביבתו הטבעית	2.11	0.91	.73	

תפיסות תלמידים בדבר האתגר בהבנת התצוגות החזותיות בהקשר לידע אודות מבנה חלבון בהשוואה לאתגר בהבנת התצוגות החזותיות בהקשר לידע אודות תפקוד חלבון מראות שפרוצדורת ההתבוננות בתצוגות של המודל המולקולרי תורמת יותר לרכישת ידע אודות מבנה חלבונים ופחות לרכישת ידע אודות תפקוד החלבונים. הממצא נתמך על ידי ממצאים שהתקבלו ממענה על שאלת מחקר 3 המראים כי לא חל שינוי בהישגי התלמידים מקבוצה B ברכישת תת מרכיבי הידע C, העוסקים בתפקוד חלבון ובקשר שבין מבנה חלבון לתפקודו (טבלה 12 בעמוד 77). הבנת הקשר בין מבנה לתפקוד חלבון היא מטרה חשובה של תוכנית הלימודים בביואינופורמטיקה (Israeli Ministry of Education, 2017, נספח 1). המשימות הממוחשבות עוצבו כדי לספק תמיכה עבור רכישת ידע המקשר בין מבנה לתפקוד החלבון. עם זאת, מתוך תפיסות התלמידים, וכן מתוך חוסר יכולתם לשפר את הישגיהם בתת-מרכיבי הידע הנקשרים לגורם זה, נראה כי הן ישנו פער בין הבנת התלמידים את מבנה החלבון לבין הבנת התלמידים את תפקוד החלבון, והקשר בין מבנה ותפקוד חלבון, לאחר שעושים שימוש במשימות Jmol ממוחשבות.

שאלת מחקר 8 - מהן תפיסות מורים על למידה אודות חלבונים באמצעות השימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות?

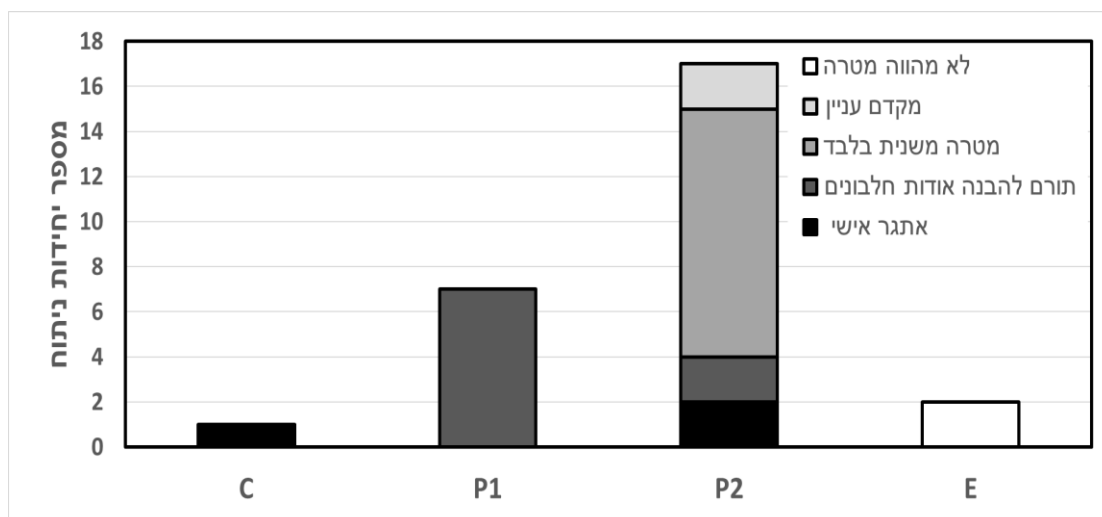
מענה לשאלה זו ניתן באמצעות ראיונות עם שני מורים ותיקים בעלי ניסיון בהוראת ביואינופורמטיקה בתיכון ובפרט בהוראה אודות חלבונים באמצעות משימות Jmol. הניתוח נערך עבור כל אחד מהמורים בנפרד. זוהו ונספרו יחידות ניתוח בעלות סכמות קידוד משותף, כמתואר באיור 4 (תת-פרק 3.4 בפרק המתודולוגיה).

ממצאים מתוך הריאיון עם מורה א':

כפי שניתן לראות באיור 13 בעמוד הבא, מספר יחידות הניתוח הגבוה מעיד על דגש מיוחד שהעניק המורה למרכיב הידע P2 בדבריו. מורה א' חזר מספר פעמים רב על כך ששימוש באפשרויות התוכנה מהווה מטרה הוראה משנית ואין צורך בהערכת התלמידים אודות היכולת שלהם להשתמש בתוכנה. המורה נימק טענה זאת בכך שתוכנות נוטות להתחלף ואופן השימוש בהן משתנה בהתאם, ועל כן מיומנות של שימוש באפשרויות התוכנה אינו יכול להיות ידע בעל משמעות עבור הלומדים. יחד עם זאת, על פי תפיסתו של המורה עצם השימוש באפשרויות התוכנה נחוות כמשחק עבור התלמידים והוא גם תורם במידה מסוימת להבנת נושא החלבונים. על כן המליץ ללמד באמצעות שימוש באפשרויות התוכנה אך לא להעריך את התלמידים על מרכיב ידע זה. לדוגמה:

"מבחינתי ה-Jmol כ-Jmol הוא לא מעניין... לכן זה לא מעניין אותי שהם ידעו להפעיל את ה-Jmol בבחינה". (מרכיב ידע P2).

בנוסף המורה העיד על כך שרמת השליטה שלו בתוכנה מוגבלת ועל כן הוא רואה בהתמקצעות אתגר אישי.



איור 13: תפיסות מורה א' את הלמידה אודות חלבונים באמצעות השימוש במשימות Jmol. מספר יחידות הניתוח הוא 27. מרכיבי הידע: C - ידע תוכני אודות חלבונים; P1 - ידע פרוצדורלי אודות השימוש בייצוגים חזותיים; P2 - ידע פרוצדורלי אודות השימוש באפשרויות התוכנה; E - ידע אפיסטמי אודות מודלים

לעומת תפיסתו המורכבת על מרכיב הידע P2, התייחסותו למרכיב הידע P1 הייתה חיובית ביותר וחד משמעית. המורה ציין מספר פעמים את תרומת הצפייה בתצוגות המודל המולקולרי כבעל תרומה חיונית להבנה אודות חלבונים. דוגמה לתמה מרכזית זו במרכיב הידע P1 ניתן למצוא בדברים הבאים:

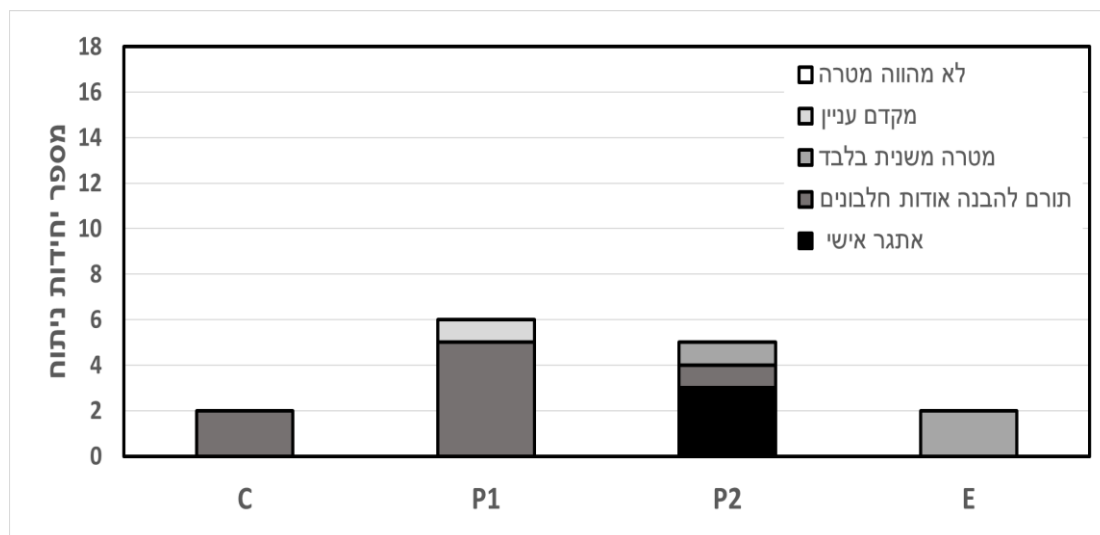
"אז אתה מבין, זה מאוד קרוב ל...לרכוש את הידע. הכי קרוב ל...לרכוש את הידע שאפשר, כי שוב אם אתה מדבר איתי על אתר פעיל או על כל הדברים שאמרתי קודם, עצם ההמחשה, מפילה את האסימונים, אז זה חלק מרכישת הידע אולי. [...] זה לא שאתה יודע לדקלם את ההגדרה, אלא שאתה באמת יודע משהו זה בגלל שנפגשת בו בכל מיני דרכים, ואז אתה מצייר איזה...יש לך תמונה קוגניטיבית שהיא רחבה שהיא אתה יכול לגשת אליה מכל מיני. אז מהבחינה הזו, זה עוזר לך לרכוש את הידע, זה עוזר לך...הביסוס זה בעצם סוג של רכישת ידע". (מרכיב ידע P1).

כאשר מורה א' נחשף לכרטיסיה שבה מופיעה הפרקטיקה השנייה מתוך מסמך ה-NRC (2012) שבה כתוב "פיתוח ושימוש במודלים" הוא אומר בהקשר להוראת נושא החלבונים באמצעות Jmol ובתיווך המשימות הממוחשבות ובנוגע למרכיב הידע האפיסטמי אודות מודלים:

"אני חושב שזה מטה-קוגניציה יחסית לתלמיד שהיא פחות חשובה לתלמיד. לא רק לעשות את זה, אבל רב התלמידים לא שם. מעט מאוד תלמידים כבר הבינו מה אתה רוצה, רצו על זה, ועכשיו אתה מדבר איתם על מטה-קוגניציה, בא נראה מה...הלוואי וזה היה המצב. אני לא חושב שזה לא חשוב, אני חושב שהחשיבות שלו היא נמוכה יותר, כי רב התלמידים לא שם. רב התלמידים עדיין בלא לפחד מזה שכל הדבר הזה הוא באנגלית, אז אתה מדבר אתנו עכשיו על לחשוב על החשיבה של כמה הדבר הזה עוזר לך להבין מודלים? יותר מדי לתלמיד תיכון לטעמי לרב התלמידים, לא שזה לא חשוב, אבל הם לא שם לטעמי". (מרכיב הידע E).

לסיכום נראה שמורה א' נלהב משפע האפשרויות לרכישת ידע באמצעות שימוש בייצוגים חזותיים (P1), אך באשר לשימוש באפשרויות התוכנה (P2) הוא מתאר תפיסה מורכבת יותר שמצביעה על הצורך בוויסות למידה שיעביר את מרכז הכובד למרכיב הידע P1. כמו כן הוא מציין שרכישת ידע אפיסטמי אודות מודלים חשובה לדעתו, אך היא אינה נדרשת עבור תלמידי תיכון.

ממצאים מתוך הריאיון עם מורה ב':



איור 14: תפיסות מורה ב' את הלמידה אודות חלבוניים באמצעות השימוש במשימות Jmol. מספר יחידות הניתוח הוא 15. מרכיבי הידע: C - ידע תוכני אודות חלבוניים; P1 - ידע פרוצדורלי אודות השימוש בייצוגים חזותיים; P2 - ידע פרוצדורלי אודות השימוש באפשרויות התוכנה; E - ידע אפיסטמי אודות מודלים.

בשונה ממספר יחידות הניתוח הגבוה של מורה א' ($n=27$), מספר יחידות הניתוח הנמוך של מורה ב' ($n=15$) מעיד על עושר מידע פחות גדול בנוגע לתפיסותיה על למידה אודות חלבוניים בהקשר לשימוש ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות כמקור ללמידה אודות חלבוניים. מורה ב' מעניקה משקל גדול יחסית בדבריה למרכיב הידע P1 ותפיסותיה בנוגע לשימוש בייצוגים חזותיים חיובית (איור 14). היא מעידה על עצמה שכלומדת ייצוגים חזותיים מהווים עבורה דרך מועילה ללמידה וכך היא פועלת אל מול התלמידים שלה. לעומת זאת כאשר היא עוברת לדבר על מרכיב הידע P2, היא מציינת פעם אחת את השימוש באפשרויות התוכנה כגורם המשפיע באופן חיובי על הלמידה אודות חלבוניים, אך עם זאת היא מעלה שלש פעמים חששות כמורה הנדרשת לידע נרחב בשימוש באפשרויות התוכנה. לדוגמה:

"יש את הפחד מהחלק הטכני, של עניין ההוראות, הסדר של ההוראות, זה שאי אפשר, כלומר צריך להתחיל מהתחלה אם עשינו, אי אפשר לחזור אחורה, ולפעמים, משנה לשנה, אני לא זוכרת לגמרי את העניין של ההוראות, אז זה כל פעם להיזכר בזה מחדש, זהו, זה כלומר זה היופי יחד עם העניין של הפחד".

דוגמה זו המתארת חששות מורים, מודגמת בממצאים האיכותניים של שאלת המחקר 4. הממצאים שם מלמדים על המורכבות בתמיכת המורה ביישום מרכיב הידע P2 על ידי תלמידים. לא ניתן לשלול את

ההשערה כי מורים רבים מציגים בפני תלמידים אסטרטגיות לא יעילות בדומה לזו שהצגתי בשיח שהתפתח ביני לבין הזוג MR לשימוש באפשרויות תוכנת Jmol (התערבותי במענה לשאלה IPNS-19, בעמוד 110). ייתכן שגם מורים אינם מזהים את הקשרים המחייבים בין מרכיבי הידע C ו-P1 למרכיבי הידע P2 ומתקשים לספק סיוע לתלמידים המתבקשים להתמחות בשימוש מועיל באפשרויות התוכנה של Jmol.

כאשר מורה ב' מציינת "יופי" היא מתכוונת לשימוש בייצוגים החזותיים, כפי שהיא מציינת בריאיון:

"במבט אחורה, זה לא רק מבט אחורה זה גם במבט עכשווי, בסך הכול הכלי הוא ויזואלי יפה. יחד עם היופי הוויזואלי, יחד עם היופי של לראות את הדברים".

בדומה למורה א', גם מורה ב' מסתייגת מעצם רכישתו של מרכיב הידע האפיסטמי אודות מודלים על ידי תלמידים:

"אהה, תראה ברגע שהם עוברים מ [תצוגת] Cartoon לתצוגה אחרת הם רואים שאתה לא יכול לראות את מה שאתה ראת קודם, אז אתה יכול לראות דברים אחרים, זאת אומרת, אבל אם אני רוצה, שוב אם אני סתם נתפסת לאותה דוגמה של סימון החומצות האמיניות ההידרופיליות או ההידרופוביות מתוך [תצוגת] Cartoon, אתה לא יכול לראות את זה, זאת אומרת תצוגה אחת לא מאפשרת לך לראות דברים מסוימים, אתה מעביר את זה לתצוגות אחרות אז אתה חייב לעשות את זה. האם הם באמת יודעים? ומפנימים את זה ככה? אני חושבת שהאינטליגנטים שבניהם או הבוגרים שבניהם אולי כן. אלה שפחות, אז שוב כל דבר הם מבינים ברמה האלמנטרית".

אך היא לא בהכרח טוענת שזו לא יכולה להיות מטרת הוראה מכיוון שהיא מבינה שידע אפיסטמי הוא עומד בבסיס ההמחשה:

"כלומר העניין של המודלים יכול, חשוב אולי להבין את החשיבות, אין, זה שאין הרבה הבדל בין אלה שמבינים את חשיבותם ומגבולותיהם, זה עדיין לא אומר ש, כלומר העניין של השימוש באופן יעיל במודלים הוא מאפשר לי את הדבר הזה של ההמחשה".

לסיכום נראה שמורה ב' מייחסת חשיבות רבה לרכישת ידע באמצעות שימוש בייצוגים חזותיים, ומלווה את טיעוניה באמצעות דוגמאות, אך כאשר לשימוש באפשרויות התוכנה היא מזהה את רכישת הידע כאתגר אישי עבורה במקביל עם האתגר שעמו מתמודדים התלמידים אף שלטענתה גם למרכיב ידע זה יש חשיבות לרכישת ידע אודות חלבונים. היא מציינת כי ידע אפיסטמי אודות מודלים נקשר למרכיב הידע P1 אך טוענת כי תלמידים רבים אינם נותנים דעתם למרכיב ידע זה.

-דיון-

במחקר זה פותחה מסגרת מושגית לניתוח מידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון. המסגרת מסייעת להבהיר את אופי רכישת הידע המדעי אודות חלבונים בקרב תלמידים המשתמשים ב-Jmol כתוכנה למידול מולקולרי בליווי משימות מבוססות-חקר. המסגרת המושגית מאפשרת להבחין בין ארבעה מרכיבי ידע מדעי המאפשרים שימוש יעיל בתוכנה למידול מולקולרי של חלבונים: ידע תוכני (C) אודות מבנה ותפקוד חלבון, ידע פרוצדורלי אודות שימוש בייצוגים חזותיים (P1), ידע פרוצדורלי אודות שימוש באפשרויות תוכנה למידול מולקולרי (P2), וידע אפיסטמי (E) אודות מודל מולקולרי ככלי מדעי. תוכנת Jmol היא תוכנה שבאמצעותה נבחנה המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים. משימות Jmol אודות החלבונים IPNS ו-AFP, הנמצאות בסביבת הלמידה "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה", שימשו כמשימות למידה שבאמצעותן נבחן שימוש תלמידים במשימות Jmol במסגרת לימודי הביואינפורמטיקה שלהם. בנוסף נבחנו תפיסות התלמידים והמורים על השימוש במשימות.

ניתוח התכנים במשימות Jmol אשר מתמקדות במבנה ותפקוד של חלבוני IPNS ו-AFP הראה כי השאלות וקטעי המידע כוללים מרכיבי ידע המקושרים זה לזה. בתכני המשימות, מרכיב ידע אחד נבנה על גבי מרכיב ידע אחר. המודל שהוצע בפרק התוצאות (איור 4) מציג את הידע התוכני (C) כמרכיב הבסיסי ביותר. על גבי מרכיב ידע זה על התלמיד לרכוש את הידע הפרוצדורלי P1 ולאחר שימוש יעיל בשניהם על התלמיד לרכוש את הידע הפרוצדורלי P2 ואת הידע האפיסטמי E. ברבים מקטעי המידע שעל התלמידים לקרוא במשימות מודגש הידע הפרוצדורלי P2 ואילו הידע הפרוצדורלי P1 ניתן כמידע משלים ל-P2. לכן, ישנו מספר קטן יותר של קטעי מידע העוסקים בידע הפרוצדורלי P1. מספר קטעי המידע העוסקים בידע תוכני (C) בלבד הוא הקטן ביותר. בשונה מההתפלגות מרכיבי הידע בקטעי המידע, רבות מהשאלות שניתנות לתלמידים במשימות מיועדות לרכישת הידע הפרוצדורלי P1, והאחוז הגבוה שלהן במשימות מעיד על המטרה העיקרית של המשימות שהיא הבניית ידע אודות מבנה ותפקוד של חלבונים באמצעות שימוש במגוון ייצוגים חזותיים של מבני חלבונים (טבלה 11).

הממצאים שהתקבלו בהקשר לשימוש התלמידים במשימות Jmol מתבססים על גישות כמותיות ואיכותניות. הממצאים הכמותיים מעידים על כך ששימוש במשימות משפר באופן מובהק את הבנתם של תלמידי תיכון בהקשר לחלבונים. התלמידים רוכשים ידע תוכני C וידע פרוצדורלי P1 בעקבות השימוש בתוכנת Jmol ובליווי המשימות. מסקנה נוספת היא שבקבוצת תלמידים אחת המגיעה עם ידע מצומצם אודות חלבונים (קבוצה A) נצפה שיפור רב בהישגים לאחר השימוש במשימות Jmol, בהשוואה לקבוצה שנייה שלה ידע נרחב יותר אודות מבנה ותפקוד חלבון (קבוצה B, בעקבות השתתפות בפרויקט מחקר). עדיין, ציוני התלמידים בשתי הקבוצות נמוכים ומעידים על רמת ידע נמוכה (טבלאות 12 ו-13).

הממצאים האיכותניים שנותרו לאור המודל ללמידת-תחום (MDL) של Alexander (2004), מלמדים על כך שארבע תלמידות, בשני הזוגות שנבחנו ממוקמות בסקלה כטירונות הנמצאות בשלב ההתאקלמות, וכמעט ולא ניתן לזהות בשיח שלהן מאפיינים של שלב הכשירות בתחום הביוכימיה בהקשר לשלושת הקריטריונים המופיעים במודל של Alexander: ידע, אסטרטגיה ועניין. זוג התלמידות שהשתתפו בפרויקט

חקר אודות מבנה ותפקוד חלבון הראו ידע נרחב יותר בידע הפרוצדורלי P1 ובעיקר בהקשר לתפקוד החלבון, והציגו שימוש יעיל יותר בידע פרוצדורלי P2. עם זאת הן לא הראו ידע נרחב יותר בידע האפיסטמי E בהשוואה לזוג השני שלא השתתף בפרויקט מחקר אודות חלבונים.

הממצאים שהתקבלו מתוך בחינת תפיסות התלמידים על השימוש במשימות Jmol מצביעים על כך שעבור תלמידים, השימוש באפשרויות התוכנה של Jmol (P2), בהשוואה לשימוש בכלים ביואינפורמטיים אחרים שבהם הם משתמשים ובהשוואה לצפייה במודלים מולקולריים של חלבונים (P1), הוא מקור עיקרי לעניין בלמידה (איור 12). יחד עם זאת, ידע פרוצדורלי P2 נתפס על ידם כמורכב, ואת ההבנה אודות מבנה ותפקוד חלבון (C) הם כנראה רכשו באמצעות ידע פרוצדורלי P1 (טבלאות 15 ו-16). ממצא בולט נוסף שעלה מתוך דיווחי התלמידים הוא שהצגת מודלים מולקולריים באמצעות השימוש ב-Jmol קידם הבנה אודות מבנה חלבון אך פחות ידע אודות תפקוד חלבון (טבלה 16). המורים הציפו תפיסה מורכבת כלפי שימוש של תלמידים במשימות Jmol אך דומה בעיקרה לזו של התלמידים. לתפיסת המורים, על Jmol לשמש כלי להבנת מבנה ותפקוד של חלבונים מכיוון שבאמצעותו מתאפשרת הצגת מודלים מולקולריים של חלבונים. הם התייחסו לידע פרוצדורלי P2 כמקדם משחוק ועניין אך כמורכב לשימוש תלמידים. המורים לא ראו בידע הפרוצדורלי P2 גורם המוביל תלמידים למטרה העיקרית שהוא רכישת ידע תוכני C, בשונה מידע פרוצדורלי P1 שנתפס עבורם כגורם המוביל את התלמידים להבנה אודות חלבונים. ולבסוף, המורים לא ראו בידע האפיסטמי E מטרה עיקרית בהוראת הנושא במסגרת לימודי הביואינפורמטיקה (איורים 12 ו-13).

פרק הדיון מורכב מחמישה תת-פרקים: תת הפרק הראשון דן באפיון משימות Jmol; תת הפרק השני דן בשימוש תלמידים במשימות Jmol ותת הפרק השלישי דן בתפיסות תלמידים ומורים את השימוש במשימות Jmol. פירוש הממצאים, משמעותם, השלכות ומגבלות המחקר ידונו בשלושת תת-הפרקים בדיון לאור שלושת המניעים שתוארו בפרק הרציונל: (1) השאיפה לנסח מסגרת מושגית המבהירה מהו מידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון באמצעות משימות Jmol; (2) בחינת רמת המורכבות הקיימת בלמידה אודות חלבונים בהתאם להנחה המוקדמת שתוארה בספרות הטוענת שמבנה ותפקוד חלבון הוא נושא מורכב ללמידה בתיכון; ו-(3) גישור הפער הקיים בין השימוש ב-Jmol על ידי תלמידים בתיכון לבין השימוש בו בפרקטיקה המדעית-אותנטית. את הדיון יסגרו שני תת-פרקים נוספים העוסקים בהשלכות ובמגבלות המחקר.

1. אפיון משימות Jmol ממוחשבות על פי המסגרת המושגית

למידה באמצעות משימות Jmol ממוחשבות היא הדרך שבה מתבקשים מורים לקדם שימוש של תלמידים בתוכנת המידול המולקולרי Jmol. תכנית הלימודים בביואינפורמטיקה כוללת חלקים העוסקים במבנה ותפקוד חלבונים, ושימוש ב-Jmol מתחייב גם הוא מתוך תכנית הלימודים הרשמית (נספח 1) של מגמת מערכות ביוטכנולוגיות בישראל (Israeli Ministry of Education, 2017). לאחר השתלמות וחשיפה למשימות ביואינפורמטיות מבוססות חקר, המורים למערכות ביוטכנולוגיות בבתי-הספר בישראל מעודדים

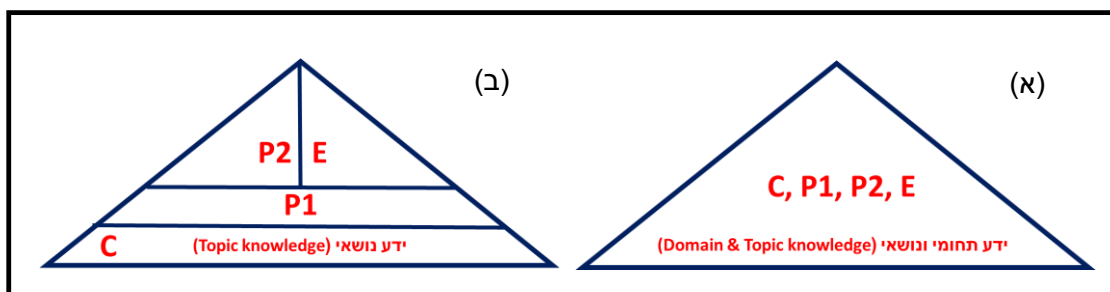
את תלמידיהם להשתמש במשימות Jmol מסביבת "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה", אשר כוללים את התכנים המופיעים בתכנית הלימודים.

במחקר גישוש שנערך בראשית הדרך נערכו התצפיות הראשונות בתלמידים הלומדים באמצעות משימות Jmol (מחקר הגישוש אינו מדווח בעבודה זו). באותם שלבים ראשוניים של מחקר, הכלי התיאורטי היחיד שהתאים לתיקוף שאלות במשימות היתה מסגרת תיאורטית המתארת אוריינות חזותית בביוכימיה כמערך של שמונה מיומנויות קוגניטיביות (Schönborn, & Anderson, 2010). ככל שהמחקר התקדם, נדרשה מסגרת ניתוחית מעמיקה יותר, זאת מכיוון שנתוני המחקר כגון תכני המשימות, שיח התלמידים וכן תפיסות תלמידים ומורים הציפו מורכבות נוספת שאינה מוסברת רק על ידי השימוש במיומנויות הקוגניטיביות שתוארו על ידי Schönborn & Anderson (2010). השימוש בסיווג הגנרי של Osborne (2014a) לשלושה סוגים של ידע מדעי המותאם להמלצות ה-NRC (2012), תוכני, פרוצדורלי ואפיסטמי, קידם את התובנה שהועלתה בהקשר למחקר הנוכחי הסוברת כי בהתייחס לשימוש במשימות Jmol, יש להבחין בין ארבעה מרכיבי ידע שונים בתכני המשימות (איור 1). כתוצאה מניתוחים חוזרים ונשנים של הנתונים עלה הצורך להפריד את הידע הפרוצדורלי לשני סוגים: הראשון הוא הידע הפרוצדורלי המאפשר שימוש יעיל בייצוגים חזותיים (P1). ידע זה נרכש בין השאר באמצעות שימוש במשימות IPNS ו-AFP המקדמים תרגול של מיומנויות קוגניטיביות הנדרשות עבור אוריינות חזותית ומתוארים במסגרת התיאורטית של Schönborn, & Anderson (2010). לעומת זאת, סוג שני של ידע פרוצדורלי שאינו מודגש בספרות, הוא ידע העוסק בשימוש באפשרויות תוכנה למידול מולקולרי כדוגמת Jmol (P2). ידע זה קיים במדריכים אינטרנטיים המלמדים כיצד למדל מבנה של חלבון המוצג ב-Jmol באמצעות שימוש באפשרויות תוכנה כדוגמת תסרוט (Scripting) עבור שינויי תצוגה (ראה תת פרק 5 בפרק הקרע התיאורטי). סיווג נוסף של Osborne (2014a) לידע הוא הידע האפיסטמי העוסק במהות הפעילות המדעית. על פי השקפתו, וכן על פי השקפות רבים אחרים (e.g., Duschl, 2008) המטרה העיקרית של החינוך המדעי היא יצירת בוגרים חושבים, אזרחי עתיד ביקורתיים אשר מבססים את החלטותיהם על עדויות מדעיות. ניתן להשיג מטרה זו באמצעות חשיפה של תלמידים לאופי הפעילות המדעית-אותנטית ולמקורותיה. על כן, לדידם, יש לשלב בחומרי הלימוד היבטים אפיסטמולוגיים ובכללם ידע אודות מודלים מולקולריים. במשימות IPNS ו-AFP מופיעים קטעי מידע ושאלות הדורשים שימוש בידע אפיסטמי אודות מודלים מולקולריים (E). שילוב מרכיב ידע זה במשימות נמצא בהלימה לטענה כי יש להקנות ידע אפיסטמי אודות העשייה המדעית (Schwarz & White, 2005; NRC, 2012).

המסגרת המושגית שפותחה במחקר זה מאפשרת לסווג את הידע המדעי לארבעה מרכיבי ידע מדעי (C, P1, P2, E) הנוכחים בתכנים ובלמידה הדורשת שימוש בתוכנות של מידול מולקולרי ובכללן Jmol. שילוב כל ארבעת המרכיבים לידע מדעי אחד משותף מאפיין את הוראות שימוש של תוכנת Jmol במדריכים כתובים כדוגמת המדריך של Cohlberg (2017) שטקסט מייצג ממנו צוטט בתת-פרק 5 ברקע התיאורטי.

ניתוח הטקסטים הנמצאים בתכני משימות Jmol, IPNS ו-AFP (נספח 3), מלמד על שאיפתם של מחברי המשימות להקנות לתלמידי תיכון ידע מדעי נרחב באמצעות הדרכה מקיפה וזאת בדומה למדריך של Cohlberg. ניתוח קטעי מידע מתוך שתי משימות Jmol אלה מראה כי בשונה מהמדריך של Cohlberg,

ידע מרוזם אודות ידע תוכני C ואודות ידע פרוצדורלי P1 מופיע בכל פסקה שבה נמסר מידע אודות ידע פרוצדורלי P2. ניתן לזהות את הניסיון של מחברי משימות Jmol לגשר בין ידע מדעי המוחזק על ידי מומחים בביוכימיה לבין הדרכת התלמידים במטרה להפיק שימוש יעיל ב-Jmol באמצעות שילוב הדרגתי של מרכיבי הידע במשימות. הגדרתה של Alexander (2004) לידע נושאי (Topic knowledge) ולידע תחומי (Domain knowledge) מאפשרת לתאר את ההבדל בין תכני משימות Jmol לבין ידע של מומחי ביוכימיה המשתמשים בתוכנות למידול מולקולרי (איור 15). ידע מדעי של מומחים בביוכימיה כולל את ארבעת מרכיבי הידע (איור 15א) והייצוג שלו במודל מתבסס על תיאור הידע המדעי הנושאי והתחומי כפי שהוא מוצג בספרות על פי מומחים בביוכימיה (Richardson & Richardson, 2002; Herraiez, 2006; Dries et al, 2017) ומייצג את העשייה המדעית האותנטית (Chinn & Malhotra, 2002). הידע המדעי של המומחים (איור 15א) מושווה למידע הניתן לתלמידים בתכנים הטקסטואליים הקיימים במשימות Jmol מסביבת הלמידה "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה" (איור 15ב). הממצאים, שמקורם בניתוח קטעי מידע ושאלות ממשימות IPNS ו-AFP, מראים כי המשימות עוצבו כך שקטעי המידע מספקים בעיקר מידע אודות ידע פרוצדורלי P2 ובאופן יחסי מספקים מידע גם אודות ידע אפיסטמי E. לעומת זאת, השאלות מעודדות תלמידים להחצין בעיקר ידע פרוצדורלי P1 ובמידה פחותה את שאר מרכיבי הידע (טבלה 11). המשמעות של ממצא זה היא שקיימת מידה מסוימת של חוסר איזון בין הנטייה של מפתחי משימות Jmol לעזור לתלמידים להשתמש בידע פרוצדורלי P2 לבין הנטייה שלהם להעריך את התלמידים על ידע פרוצדורלי P1. בתת-הפרק הבא ייערך דיון על השפעת השימוש במשימות Jmol על רכישת ידע מדעי בקרב התלמידים.



איור 15: השוואה בין ידע מדעי של מומחים בביוכימיה המוצג במודל (א) לבין המידע המופיע בתכנים הטקסטואליים הקיימים במשימות Jmol מסביבת הלמידה "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה" המוצג במודל (ב)

2. שימוש של תלמידים במשימות Jmol ממוחשבות

אחד המניעים אשר הוגדרו כבסיס לביצוע המחקר הוא השאיפה לנסח מסגרת מושגית המבהירה מהו מידול מולקולרי של חלבונים בהקשר לשימוש תלמידי תיכון במשימות Jmol. מניע זה קיבל מענה בתת-פרק קודם, זאת באמצעות תיאור המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים. המניע השני הוא הצורך בתיקוף ההנחה הטוענת כי מבנה ותפקוד חלבונים הוא נושא מורכב ללמידה בחטיבת ביניים ובתיכון (Duncan, Rogat & Yarden, 2009; van Mil, Boerwinkel, & Waarlo, 2013). מניע נוסף שואף לגשר על הפער הקיים בין השימוש ב-Jmol על ידי תלמידים בתיכון לבין השימוש בהם

בפרקטיקה המדעית-אותנטית. ניתוח המשימות לא הבהיר די הצורך האם מידול מולקולרי של חלבונים מציב אתגר בפני התלמידים והאם המשימות אכן מגשרות על הפער. לצורך כך, נבדק השינוי בידע הלומדים אודות חלבונים בעקבות השימוש של התלמידים במשימות Jmol וכן נבדק אופי השימוש ורכישת הידע המדעי של שני זוגות תלמידות.

2.1 דיון בממצאים הכמותיים: השפעת השימוש של תלמידים במשימות Jmol על רכישת ידע מדעי

הממצאים הכמותיים (33 תלמידים בקבוצה A ו-37 תלמידים בקבוצה B) הראו כי השתתפות במענה על משימות Jmol המתמקד במבנה ותפקוד של שני חלבונים, IPNS ו-AFP, עשוי לשמש כגורם בעל משמעות בהתפתחות ידע תוכני אודות חלבונים (C). בשאלה שעסקה באופן ישיר במבנה החלבון ("ממה מורכב אתר פעיל?") לומדים משתי קבוצות הראו רמה שונה של ידע מוקדם אודות חלבונים. בנוסף, התלמידים השתפרו באופן מובהק בתשובות שסיפקו לשאלה כתוצאה משימוש במשימות Jmol. התלמידים שינו את התיאורים המבניים לתיאור מבני מקובל יותר של אתר פעיל. התרומה של השימוש ב-Jmol נבעה מהעיסוק המוגבר של התלמידים בהצגת מודלים מולקולריים של חלבונים, וכן מהצלחת המשימות למקד את התלמידים בבחינת ההיבטים המבניים של החלבונים. בקרב תלמידים מקבוצה A ניכר שיפור במענה על שאלות הקשורות לתפקוד חלבון ("מהי החשיבות של אתר פעיל בחלבון?") וכן "ישנה חומצה אמינית X הממוקמת באתר הפעיל של חלבון כלשהו. האם מוטציה אשר מובילה לשינוי של חומצה אמינית X לחומצה אמינית אחרת בחלבון זה, תגרום בהכרח לירידה בפעילותו?". עם זאת, ממצא מעניין היה שלא היה שיפור בקרב תלמידים מקבוצה שבצעה פרויקט חקר שבו תלמידים נדרשו להבין את מנגנון הפעילות של חלבון PON1 מנקודת הפתיחה הגבוהה שלהם בהבנה אודות תפקוד החלבון (טבלה 12).

ניתן לפרש את הממצאים באופן הבא: משימות Jmol סיפקו לתלמידי קבוצה A הזדמנות לעסוק בחשיבה מנגנונית אודות חלבונים. עידוד החשיבה בא לידי ביטוי בשאלות הקשורות לתפקודו, כדוגמת החצנת מנגנון פעילות האנזים. עם זאת, הזדמנויות אלה לחשיבה מנגנונית לא סיפקו ידע חדש עבור תלמידי קבוצה B אשר השתתפו בפרויקט אודות מבנה ותפקוד חלבון PON1 וזאת מעבר לידע התוכני שרכשו בפרויקט. אפשרות נוספת להסביר את התוצאות היא חוסר האתגר של תלמידים רבים מקבוצה B להציג ידע נוסף מעבר לזה שהראו בהתייחסותם לחלבון PON1. ניכר שתלמידים רבים מקבוצה B חיברו בין הידע אודות PON1 לבין תשובות שנתנו לשאלונים שבאמצעותם הידע נבדק ועל כן התלמידים הפגינו את אותם מבנים מחשבתיים שהיו להם בשני המבדקים. התלמידים חשבו על תפקודי החלבונים IPNS ו-AFP שעמדו במרכז המשימות שבהם השתמשו ב-Jmol לאור הידע שלהם על PON1 (לדוגמה איור 5 בפרק התוצאות). דוגמה נוספת מתוארת בתשובות תלמיד אשר התבקש לענות על השאלה "ממה מורכב אתר פעיל?" לאחר השימוש במשימות Jmol. תשובתו הייתה: "האתר הפעיל בחלבון מורכב מיון סידן קטליטי האחראי על פעילות החלבון ויון סידן מבני האחראי על יציבות החלבון". תשובה זו מתארת את היונים בליבת האתר הפעיל של החלבון PON1. תשובה זו דומה לתשובה שנתן במבדק שנערך לפני השימוש במשימות Jmol. מחקרים אחרונים הבוחנים ידע של תלמידים אודות חלבונים, מראים כי תלמידים שאינם מציגים חשיבה מנגנונית בהקשר לחלבונים מתקשים להבין את העקרונות של הגנטיקה המולקולרית (Haskel-Ittah &)

(Yarden, 2018). לעומת זאת, כאשר תלמידי תיכון לומדים אודות פעילויות תאיות מורכבות, חוזים בפעילות חלבונים דרך אנימציות המציגות התנגשויות, קישור ושינויים מבניים של חלבונים, החשיבה המנגנונית שלהם, הנוגעת לפעילויות תאיות שיש בהם מורכבות ביולוגית הקשורה לחלבונים, משתפרת (van Mil, Postma, Boerwinkel, Klaassen, & Waarlo, 2016). בנוסף, בקרב תלמידי חטיבת ביניים הנחשפים למשימות המקדמות חשיבה מנגנונית בסביבת הלמידה "עפים על גנטיקה" שבאמצעותה הם מקבלים מידע על פעילויות של חלבונים כגון קישור של חלבונים באתר הפעיל, ניכר שיפור בחשיבה מנגנונית בגנטיקה (Haskel-Ittah, Duncan, Vasquez Ben & Yarden, under review). במחקר הנוכחי הממצאים מראים שיפור בהבנה אודות תפקוד חלבונים בקרב תלמידי תיכון שענו על משימות בהם משתמשים ב-Jmol כתוכנה למידול מולקולרי של מבני חלבונים (טבלה 12). השיפור מושג על אף שהמודלים המולקולריים אינם מציגים מאפיינים תלויי-זמן (transient) כגון התנגשויות בין מולקולות, קישור לחלבון או שינויי מבנה וזאת בשונה מהצגת החלבונים בסביבות הלמידה המתוארות בעבודות האחרות (van Mil et al, 2016; Haskel-Ittah et al, under review).

בנוסף, הממצאים הכמותיים הראו כי מענה על משימות Jmol עשוי להוביל להתפתחות ידע פרוצדורלי P1 אודות פענוח ייצוגים חזותיים של מבני חלבונים בקרב שתי הקבוצות, וכן להתפתחות ידע פרוצדורלי אודות בניית ייצוגים חזותיים של מבני חלבונים בקרב קבוצה A (טבלה 12). ניתן להסביר את היעדרה של השתפרות מובהקת לאחר שימוש במשימות Jmol בקרב תלמידי קבוצה B וכן את הידע המוקדם שהציגו בציורי המודל המולקולרי של החלבון, בדומה להסבר אודות חוסר השיפור שלהם בהקשר לידע אודות תפקוד חלבון. ידע מוקדם ומפורט אודות PON1 הושג באמצעות חשיפת התלמידים למודל מולקולרי של PON1 טרם השימוש במשימות ובעקבות השתתפות בפרויקט. לפני ולאחר השימוש ב-Jmol, תלמידים מקבוצה B שלפו את הידע החזותי שהחזיקו כמודל מנטלי המותאם למודל מולקולרי של החלבון PON1 תוך כדי ציור של מולקולת חלבון. חלק מהתלמידים ציירו העתק של המודל המולקולרי שבו חזו במבדקים שנערכו טרם השימוש במשימות (ראה איור 5 בפרק התוצאות).

לעומת תלמידי קבוצה B לתלמידי קבוצה A לא היה מודל מנטלי ברור על מבנה חלבון טרם השימוש במשימות Jmol (ואף שלמדו בכיתה אודות מבנה ותפקוד חלבון). יתכן ששיפור מובהק בציור ייצוג חזותי של מולקולת חלבון ניכר כתוצאה משימוש במשימות Jmol.

בשונה ממיומנות של בניית ייצוגים חזותיים (באמצעות ציור), ממצאי ההשוואה בין הקבוצות בהקשר לרכישת מיומנויות של פענוח ייצוגים חזותיים הראו תוצאה שונה. בשתי הקבוצות הובחנה רמת ידע דומה טרם השימוש במשימות Jmol ולאחריו ניכר שיפור במידה דומה (טבלה 12). השיפור הושג בפענוח ייצוגים חזותיים והיה דומה לממצאי מחקרים מתחום הוראת הכימיה שעסקו בייצוגים של מולקולות פשוטות (Dori & Kaberman, 2012; Stieff et al., 2011). על אף העיסוק המקדים של קבוצה B בפרויקט החקר במבנה ותפקוד החלבון PON1, התלמידים התקשו בפענוח מבנים שהוצגו להם במבדקים שאינם מציגים את החלבון PON1. על כן, ייתכן שהשימוש ב-Jmol תרם לשיפור מובהק בהיבטים הקשורים לפענוח ייצוגים חזותיים כדוגמת מבנים שניוניים בתצוגת Cartoon או תיאור של קשרים קוולנטים או אטומים בתצוגת כדורים ומקלות (טבלה 6 וטבלה 12). מכאן סביר להניח כי השימוש של תלמידים בתוכנת Jmol

למידול מולקולרי של חלבונים IPNS ו-AFP המלווה במשימות תרם לשיפור ההבנה של תלמידים במבנה החלבון ושיפר את היכולת של הלומדים לזהות או לבנות ייצוגים חזותיים של מבני חלבונים המופיעים במודלים מולקולריים.

2.2 דיון בממצאים האיכותניים: אפיון רכישת ידע מדעי של תלמידים המשתמשים ב-Jmol

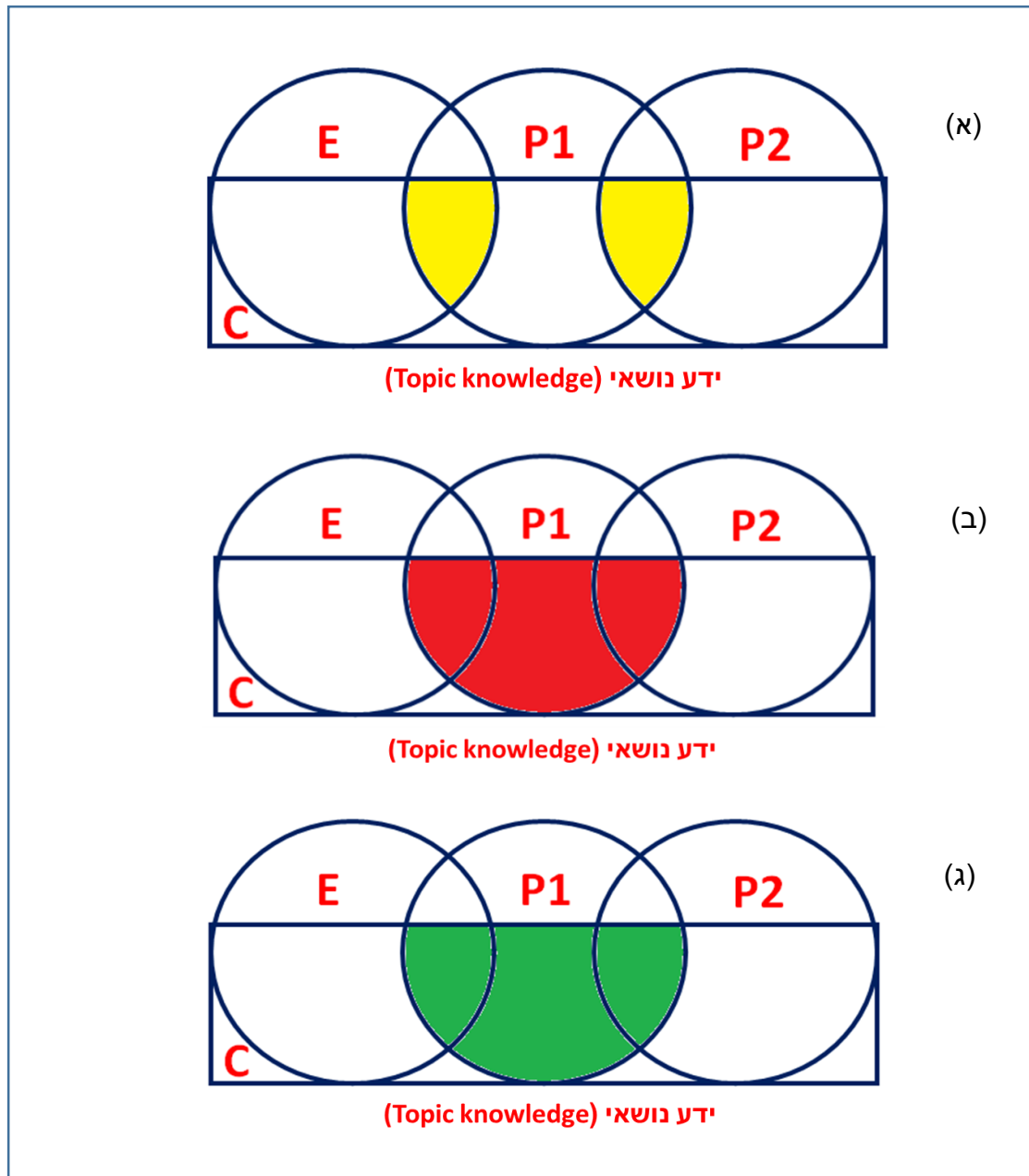
הממצאים האיכותניים התקבלו מתוך תצפיות וראיונות עוקבים אחר ארבע תלמידות הלומדות במגמת מערכות ביוטכנולוגיות בכיתה י"א בשני בתי ספר: הזוג האחד מקבוצה A (מאי ורחל, זוג MR) והזוג השני מקבוצה B (שלי ובטי, זוג SB). נותחו אפיזודות שמטרתן הייתה לבדוק האם שני זוגות תלמידות המשתמשות ב-Jmol בתיווך משימות ממוחשבות, רוכשות ידע מדעי אודות חלבונים במהלך השיח שהן מקיימות? כיצד ומדוע? (שאלת מחקר 4). ניתוח על פי המודל ללמידת-תחום של Alexander (2004) המתבסס על קריטריונים של ידע מוקדם, אסטרטגיה ועניין הציג תמונה מורכבת המלמדת כי ארבעת התלמידות בשני הזוגות ממוקמות בסקלה כטירונות הנמצאות בשלב ההתאקלמות, זאת מכיוון שכמעט ולא ניתן היה לזהות בשיח שלהן מאפיינים של שלב הכשירות בתחום הביוכימיה בהקשר לשלושת הקריטריונים המופיעים במודל של Alexander: ידע, אסטרטגיה ועניין (תת-פרק 2.2.2 בפרק התוצאות).

ממצא זה אינו סותר את ממצאי הניתוח הכמותי שהצביע על רכישת ידע אודות חלבונים כתוצאה משימוש במשימות Jmol (תת-פרק 2.2.1 בפרק התוצאות) מהסיבות הבאות: (1) הממצא האיכותני המראה כי התלמידות מקיימות שיח של טירונות במהלך מידול מולקולרי של חלבונים נמצא בהלימה לממוצעי המבדקים הנמוכים שהתקבלו לאחר השימוש במשימות Jmol בהשוואה לציון המקסימלי המוערך על ידי המחוננים (טבלה 12) (2) שאלת המחקר האיכותנית אינה מתיימרת לבדוק התקדמות בלמידה, אלא להראות תמונת מצב של רכישת ידע אודות חלבונים תוך שימוש במשימות Jmol. ואכן הממצאים מאמתים את ההנחה הטוענת כי מבנה ותפקוד חלבונים הוא נושא מורכב ללמידה בחטיבת ביניים ובתיכון (Duncan, 2013; Rogat & Yarden, 2009; van Mil, Boerwinkel, & Waarlo, 2013). כמו כן, הממצאים האיכותניים מלמדים על המרחק הגדול הקיים בידיע שמציגים מומחים המשתמשים בייצוגים חזותיים בכימיה לבין הידע השטחי שמציגים טירונים (Kozma & Russell, 1997).

ניתוח השיח הלימודי של התלמידות מציף שני סוגי בעיות ברכישת ידע מדעי: הבעיה הראשונה היא שימוש חלקי במרכיבי ידע ובשילוב בין מרכיבי ידע שונים, כאסטרטגיה לא מודעת להתמודד עם המשימה הלימודית. הבעיה השנייה ברכישת ידע מדעי היא תפיסה שגויה של מרכיב ידע אחד או יותר (דוגמאות בטבלה 17 בעמוד הבא). בעיות אלו ברכישת ידע מדעי מלמדות על פער בין התכנים הטקסטואליים של המשימות המציגים קשר היררכי בין מרכיבי הידע השונים לבין אופן השימוש של התלמידים במרכיבי הידע.

שימוש חלקי במרכיבי ידע	החצנת תפיסה שגויה במרכיב/י ידע
• אפיזודה IPNS-16: הזוג SB לא החזיק במבנים אפיסטמיים שהודגשו בתכני המשימה (E), על כן השתמש במרכיבי ידע C+P1 בלבד ושגה בתשובה הדורשת מרכיבי ידע C+P1+E. • אפיזודה AFP-4: הזוג MR לא זיהה כי יש להשתנות על הייצוגים במודל המולקולרי (P2) על כן לא קיבל מידע אודות ייצוגים חזותיים. כלומר, זוג התלמידות השתמש בידע נאיבי אודות C+P1 ושגה בתשובה הדורשת מרכיבי ידע C+P1+P2.	• אפיזודה IPNS-15: מאי הובילה את השיח של הזוג MR. השתמשה בידע שגוי אודות מטען של יונים ("ברזל הוא הידרופובי") וידע שגוי אודות ייצוגים חזותיים ("הריבוע שנוצר זה נראה לי יון מתכת ברזל") ושוגה בתשובה הדורשת שימוש יעיל במרכיבי ידע C+P1. • אפיזודה IPNS-19: שני הזוגות ובעיקר הזוג MR, החצינו ידע שגוי מסוג P2 ו-P1, שמנע מהם הצגה של שני שיירים צדדיים של ציסטאין וזיהוי היעדרו של קשר די-סולפידי בין שני השיירים הצדדיים. רק לאחר התערבות החוקר ניתן מענה לשאלה שתשובתה דרשה שימוש יעיל בידע C+P1+P2. • אפיזודה AFP-10: רחל החצינה ידע אפיסטמי שגוי אודות מודלים מולקולריים בהשוואה ל'דבר האמיתי' ושגתה בתשובה הדורשת מרכיבי ידע C+P1+E.

המודל המתואר באיור 16 בעמוד הבא, מתאר את שתי סוגי הבעיות ברכישת ידע מדעי של תלמידים בתיכון: בעיות הנובעות משימוש בידע מדעי חלקי, כאשר לא כל שלושת מרכיבי הידע נלקחים בחשבון (איור 16 א' – האזורים המודגשים בצהוב); וכן בעיות הנובעות משימוש בידע שגוי אודות חלבונים (איור 16 ב' – האזורים המודגשים באדום). כפי שראינו משיח הזוגות (תת-פרק 2.2 בפרק התוצאות) בעיות אלו נובעות כפי הנראה מהשפעת קריטריונים שתוארו במודל-ללמידת תחום, אשר משפיעים על הידע המדעי: ידע מוקדם נאיבי או מוטעה, וויסות לא יעיל של אסטרטגיות שטחיות וחסרונן של אסטרטגיות העמקה או חוסר עניין מופגן במרכיב ידע אחד (למשל ידע אפיסטמי E) המוחלף בעניין תלוי-סיטואציה במרכיב ידע אחר (למשל ידע פרוצדורלי P2), וזאת במקום עניין אישי בתחום המאפיין מומחים (Alexander, 2004). ראוי לציין, כי תוארו אפיזודות שבהן התלמידות שנצפו במהלך הלמידה השתמשו באופן יעיל במרכיבי הידע יחדיו (איור 16 ג' – האזורים המודגשים בירוק). על כן לא ניתן לטעון שתלמידות לא רכשו ידע מדעי על כל מרכיביו באופן גורף במהלך המענה על המשימות. אף על פי כן זוהו תרחישי למידה רבים (שחלקם הוצגו בפרק התוצאות) אשר דרשו מהתלמידות להשתמש בידע תוכני מורכב, כגון תפקוד חלבון או התמקדות בסוגי קשרים שונים תוך מולקולריים, להשתמש בידע אודות ייצוגים חזותיים בעוד הן צופות בפרטים חזותיים מרובים ובמערכות סמלים שונות, וכן להשתמש באפשרויות התוכנה ובמבנים אפיסטמיים אודות מודלים שאינם טריוויאליים בלמידה בבית הספר התיכון. לסיכומו של דבר, שימוש במספר מרכיבי ידע ובמורכבות רבה, הוביל אותן (א) לשימוש בידע מדעי חלקי או (ב) לשימוש בידע שגוי אודות חלבונים.



איור 16: השוואה בין שתי סוגי בעיות ברכישת ידע מדעי של תלמידים בתיכון תוך כדי שימוש במשימות Jmol. האזורים המודגשים בצבע צהוב ב-(א) מייצגים שימוש חלקי של תלמידים בידע מדעי בשאלות הדורשות שלושה מרכיבי ידע; האזורים המודגשים בצבע אדום ב-(ב) מייצגים שימוש בידע שגוי אודות חלבונים. האזורים המודגשים בצבע ירוק ב-(ג) מייצגים שימוש יעיל במרכיבי הידע אודות חלבונים.

השיח בקבוצות קטנות של לומדים שונה בהכרח מהדיאלוג הטריאדי (נקרא גם: Initiation-Response-Evaluation) אשר נפוץ בשיח של מורה ותלמידים במליאה שבה מורה שואל, תלמידים עונים והמורה מגיב לתלמידים (Lemke, 1990). הרעיונות שתלמידים מעלים בשיח בקבוצות קטנות (לדוגמה זוג תלמידות) עשויים ללמד על הזהות האישית של התלמידים ועל הדרכים שבהם הם מנווטים את היחסים הבין-אישיים שלהם בקבוצה (Kelly, 2007). מכיוון שתלמידים מקיימים ביניהם אינטראקציה כאשר הם ישובים זה לצד זה בכיתת המחשבים בבית הספר ומולם פעילות ממוחשבת, נחשפים גורמים נוספים ושונים

בשיח שאותם ניתן להגדיר כחברתיים. גורמים אלה משפיעים על רכישת הידע ולא רק גורמים המוחצנים מהשיח הלימודי (הגורמים מופיעים באיור 6).

בתצפית שנערכה במחקר של Gelbart, Brill, & Yarden (2009), התמקדו החוקרות בשני זוגות תלמידים, בן ובת בכל זוג, שהשתתפו במענה על סימולציה מחקרית ממוחשבת בגנטיקה ובביואינפורמטיקה. הסימולציה המחקרית הותאמה לתלמידי תיכון והתבססה על ידע מחקרי-אותנטי הנוגע לאפיון גן הקשור לחירשות וכן אפיון של תורשת הגן. התצפיות נערכו בתנאי מעבדה ולא בבית הספר שבו התלמידים למדו. הסימולציה המחקרית חשפה שני סוגי לומדים העונים על המשימות בפעילות: זוג אחד זוהה כמוכוון-מחקר (Research-oriented) ואילו זוג שני אופיין כמוכוון-משימה (Task-oriented). בעוד שבשיח של הזוג הראשון הן זיהו כיצד הידע הגנטי והמולקולרי מתפתח וכן נצפתה רכישה של פרקטיקות מחקריות העומדות בבסיס האפיסטמולוגיה של הגנטיקאים וחוקרי הביולוגיה-המולקולרית, בשיח של הזוג השני הן זיהו שהתפתחות הידע הגנטי והמולקולרי היתה חלקית, ונעשה שימוש לא יעיל בפרקטיקות המחקריות. בעוד שהזוג הראשון החצין חשיבה מנגנונית, הפעיל אסטרטגיות העמקה וכן הפגין מעורבות רבה ועניין בסימולציית החקר האותנטי, הזוג השני התמקד במאפיינים פרוצדורליים של המשימה ובחר "לחפש מתחת לפנס" תשובות "מספיק טובות" בדרך להגשת המשימות בסימולציה. שני הזוגות ענו על המשימות בתנאי מעבדה, אך המורות שהפעילו את הסימולצייה המחקרית בכיתה דיווחו שרבים מהתלמידים לא הפגינו מעורבות בפעילות ובמקום התמקדו במציאת תשובות מספקות לשאלות (Gelbart, Brill, & Yarden, 2009). ממצאים אלו מחזקים מאוד את הטענה שעולה מתוך המחקר הנוכחי כי שני הזוגות אשר ממוקמים בסקלה של המודל ללמידת-תחום כטירונים ואשר נמצאות בשלב ההתאקלמות, מציגים באופן בולט מאפיינים של זוגות מוכוונים-משימה.

בשונה ממחקרן של Gelbart, Brill, & Yarden (2009), איסוף הנתונים במחקר הנוכחי נערך בכיתות, והלמידה התרחשה במקומה הטבעי (*In-situ*). ניתוח השיח כלל גורמים חברתיים רבים אשר השפיעו על הלמידה. אף שתכני משימות Jmol, קטעי מידע ושאלות, נוסחו כך שהתלמידים קיבלו תמיכה מספקת לרכישת ידע מדעי-אותנטי (Chinn & Malhotra, 2002), השיח הלימודי והחברתי בקרב שני הזוגות, SB ו-MR, העיד על רצונם לסיים את המשימה עם תשובות "מספיק טובות" ובאמצעות מענה שטחי על השאלות.

הזוג SB הגיעו עם ידע מוקדם אודות מבנה ותפקוד של חלבונים מתוך צפייה מוקדמת במודלים מולקולריים במסגרת השתתפותן בפרויקט מחקר שנושאו מבנה ותפקוד של חלבון PON1. זוג התלמידות ענו נכונה על רב השאלות, אך השיח שלהן היה מוכוון-משימה. בנוסף, לא נצפה בשיח של זוג SB ניסיון לקדם הבנה של היבטים אפיסטמולוגיים אודות מודלים מולקולריים וחלבונים, וכן לא זוהה שיח המחצין יצירת קשר בין מאפיינים מבניים בחלבונים הנדונים במשימות לבין התפקוד שלהם. יוצאת מהכלל היתה העברת הידע שהן עשו מחלבון PON1 שבו התמקדו בפרויקט המחקר בהקשר להיבטים תיפקודיים של החלבונים.

השיח של הזוג MR כלל 66 אפיזודות חברתיות בהשוואה לזוג SB שבשיח שלו נצפו 47 אפיזודות חברתיות. הזוג MR הושפע מלחץ הזמן בכיתה ומסיטואציות חברתיות-כיתתיות שאינן קשורות למשימה. הזוג הקדיש זמן רב למענה על המשימה בהשוואה לזוג SB. אף על פי כן, זוג התלמידות ענו נכונה על פחות

שאלות בהשוואה לזוג SB. אף שרחל הראתה בחלקים של השיח מאפיינים של מוכוונות-מחקר, מאי, שניתן לזהותה בבירור כמוכוונות-משימה, שלטה על קצב ההתקדמות במשימה ועל כן בת-השיח רחל ניתבה את המאמץ הקוגניטיבי שלה כדי לחקור את הידע הפרוצדורלי P2 בלבד. לעיתים נדמה היה כאילו רחל החצינה עניין אינדיבידואלי בשימוש באפשרויות התוכנה, אך מכיוון שהתפתחות הידע בשימוש בתוכנה לא סייע לה לרכוש מרכיבי ידע אחרים שבהם לא התמקדה, העניין הכללי שלה ב-Jmol זוהה כעניין תלוי סיטואציה. לסיכומו של דבר, בשאלות ובקטעי מידע אחרים רחל וויתרה בשלב מוקדם על גישה חוקרת. על כן, בדומה לזוג השני, הזוג MR זוהה אף הוא כמוכוון-משימה.

משחק ותסרוט (Scripting) בקרב תלמידים, הן טכניקות שמעצבי סביבות למידה טכנולוגיות מעוניינים לשלב בפעילויות מדעיות כדרך לקדם עניין ומעורבות בלמידה (Holbert & Wilensky, 2018; Wagh et al, 2018; Langbeheim & Levy, 2018). על אף ששני הזוגות הראו מעורבות גבוהה ברכישת מרכיב הידע P2, הכוללת משחק ותסרוט, עדיין הן לא הראו שימוש יעיל במרכיבי ידע P1 ו-C, במהלך השימוש שלהם ב-Jmol, כפי שהודגם באופן שבו למדו (איור 16). על כן, טענה עיקרית אחת שעולה ממחקר זה היא שהשימוש באפשרויות התוכנה של Jmol (P2) אינו בהכרח גורם המשפיע באופן חיובי על היכולת של התלמידים לשפר את ההבנה המושגית אודות מבנה ותפקוד חלבון (C) תוך שימוש יעיל בייצוגים במודלים המולקולריים (P1). טענה נוספת העולה מהמחקר היא שרק למידה הכוללת קריטריונים המאפיינים שלב מתקדם בשלב ההתאקלמות והתקדמות לשלב הכשירות או לחילופין אימוץ של גישה מוכוונת-מחקר בקרב הלומדים, עשויה לפתח שימוש יעיל ועצמאי בשני מרכיבי הידע הפרוצדורלי P1 ו-P2 וכן לפתח חשיבה אפיסטמית אודות מודלים מולקולריים של חלבונים. לצורך כך ייתכן ונדרש שינוי במבנה המשימות ובתכנים שלהם, וכן יש לקדם מעורבות של המורה בכיתה המעודדת רכישת ידע מדעי אודות חלבונים בקרב התלמידים (ראה בהמשך בתת הפרק העוסק בהשלכות המחקר).

3. תפיסות של תלמידים ומורים את השימוש במשימות Jmol ממוחשבות

3.1 תפיסות תלמידים את השימוש במשימות Jmol

במחקר הנוכחי זיהוי תפיסות התלמידים היווה גישה משלימה לאפיון הלמידה שלהם וכאמצעי לטריאנגולציה למטרות המחקר האחרות. ניסוח שאלוני תפיסות החצין הבחנה בין שני מרכיבי הידע P1 ו-P2 אשר הוצגו כשני פרוצדורות נפרדות שבהם עשו שימוש.

מסקנה ראשונה העולה משלושת חלקי השאלון מראה כי על פי תפיסותיהם, תלמידים נתרמו מהשימוש בייצוגים החזותיים של תוכנת Jmol בהקשר לרכישת ידע אודות חלבונים. מסקנה זו נתמכת על ידי השוואת השימוש ב-Jmol לשימוש בכלי ביורמטיקה אחרים, השוואה מול השימוש באפשרויות התוכנה ובהסכמה או חוסר הסכמה עם היגדים על פי סולם מסוג ליקרט (Likert type scale). תפיסות חיוביות כלפי הצפייה במודלים המולקולריים בהקשר לידע תוכני אודות חלבונים נמצאות בהלימה לממצאים שהראו שיפור מובהק בהישגי מבדקים שהתמקדו במרכיבי ידע C ו-P1. תפיסת התלמידים בנוגע לתרומת השימוש בייצוגים החזותיים על הבנה של **תפקוד חלבון** הייתה פחות חיובית בהשוואה ל**מבנה חלבון**. אף שהממצאים הכמותיים הראו שיפור מובהק בהישגי מבדקים שהתמקדו בתפקוד חלבון בקבוצת תלמידים שהגיעו עם

פחות ידע מוקדם אודות חלבונים בהשוואה לקבוצה אחרת, הממצאים האיכותניים הראו כי תלמידים התקשו לרכוש ידע תוכני אודות תפקוד חלבון כאשר הם נדרשו להשתמש במרכיב אחד נוסף או שניים. תפיסות התלמידים מספקות טריאנגולציה לכך.

מסקנה שנייה העולה משלושת חלקי השאלון מראה כי על פי תפיסותיהם, תלמידים זיהו את השימוש באפשרויות תוכנת Jmol (P2) ובאופן ספציפי יותר, את השימוש בסרגל התפריטים וכן יצירת תסריטים באמצעות לוח הבקרה כפעולות מורכבות. גם מסקנה זו נתמכת מתוך ניתוח איכותני של השיח שהראה כי השימוש באפשרויות התוכנה לעיתים מסיט את השיח מתכונות החלבונים, לעבר שיח פרוצדורלי ושטחי.

מסקנה שלישית העולה משני החלקים הראשונים בשאלון מראה כי על פי תפיסותיהם, תלמידים זיהו את השימוש באפשרויות תוכנת Jmol (P2) כפרוצדורה המספקת להם עניין. ההבחנה שנערכה בין שתי פרוצדורות השימוש (P1 ו-P2) אפשרה להבחין שעבור תלמידים הצגת המודלים המולקולריים הובילה להבנה ועצם היותם פעילים בתוכנה סיפקה להם עניין. מסקנה זו נתמכת על ידי שיח התלמידות אשר הביעו עניין תלוי סיטואציה מהשימוש בתוכנה וכן על ידי עבודתם של Wagh et al (2017), אשר זיהו כיצד תלמידים מגלים עניין בשימוש פרוצדורלי בתוכנת NetLogo במהלך מידול של תופעה ביולוגית-טבעית. על פי Wagh et al. (2017), התלמידים פיתחו מעורבות חיובית, אשר תרמה להבנת התופעה ולזיהוי הגורמים המשפיעים עליה. בניגוד לכך, במחקר הנוכחי לא נצפה קשר כזה. על אף שהייצוגים החזותיים נתפסו כגורמים מעוררי הבנה עבור תלמידים אשר רכשו ידע תוכני אודות חלבונים, השימוש באפשרויות התוכנה נתפס על ידי תלמידים כפרוצדורה המקדמת עניין אך לא בהכרח כתורמת להבנה אודות חלבונים. בנוסף, בשיח הזוגות לא היו עדויות לתיאור השימוש בתוכנה כפרוצדורה מעודדת הבנה.

חוסר ההלימה בין ממצאי מחקרה של Wagh et al (2017) לבין המחקר הנוכחי יכול להיות מוסבר באמצעות ההבנה שהגישה ל-NetLogo מצד התלמידים והמורה הייתה חיובית והיא התבססה על Tinkering, כלומר על שינוי ועיצוב המודל מתוך משחק. לעומת זאת במחקר הנוכחי, תלמידים רבים זיהו את השימוש באפשרויות התוכנה כמעודד משחק, אך המשימות לא עודדו את התלמידים ל-Tinkering. התלמידים (ומוריהם) חיפשו מתחת לפנס את הפעולות שעליהם לבצע באפשרויות התוכנה כדי להגיע לתוצאה הרצויה¹⁶, וכל ניסיון ל-Tinkering הסיט את התלמידים מרכישת ידע אודות מבנה ותפקוד חלבון והוביל אותם לתסכול.

3.2 תפיסות מורים את השימוש במשימות Jmol

המחקר הנוכחי לא התמקד במורים כאוכלוסייה הנחקרת העיקרית, אך ניתוח הממצאים מתוך שני ראיונות מבוססי תוצר שנערכו עם מורים ותיקים אשר לימדו מספר שנים באמצעות משימות Jmol הציף את אותן שלושת המסקנות שעלו מתוך תפיסות התלמידים: (א) תלמידים רוכשים ידע אודות חלבונים כאשר הם צופים במודלים מולקולריים; (ב) שימוש באפשרויות התוכנה של Jmol היא פרוצדורה מורכבת; ו-(ג) שימוש באפשרויות התוכנה של Jmol מעניינת ומעודדת משחק. ראיונות המורים לא הציפו תפיסות

¹⁶ התוצאה הרצויה היא הבנת תפקוד חלבון מתוך המאפיינים המבניים המוצגים במודלים המולקולריים.

הטוענות כי מרכיב הידע P2 תורם להבנה אודות חלבונים, להוציא שני אמירות של מורה א' ואמירה אחת של מורה ב' אשר לא הוצדקו. מורה א' טען מספר פעמים שהדרישה מהתלמידים להציג מבנה חלבון בעצמם באמצעות השימוש בתוכנה בחלק מההערכה המסכמת בבחינת הבגרות עושה עימם עוול ומעמיסה עליהם חששות מיותרים. תפיסה מורכבת זו מלמדת על אמביוולנטיות של המורה כלפי השימוש בתוכנה. לטענתו השימוש בתוכנה מקדם עניין ומשחוק ואף תורם להבנה אודות חלבונים אך השימוש בתוכנה היא מטרה משנית בלבד בשונה מהתבוננות במודלים מולקולריים שהיא מטרה עיקרית עבורו. מכאן ניתן לזהות את תפיסת מורה א' כתומך בשילוב של מרכיבי הידע C ו-P1, כמטרה העיקרית שלשמה יש ללמד באמצעות השימוש במשימות. בנוסף, מורה א' תפס את הוראת העקרונות האפיסטמיים אודות המודלים המדעיים כמיותרת ומורה ב' תפסה את מטרה זו כמשנית בלבד.

מסגרת תיאורטית שמציבה את השימוש בטכנולוגיות למידה במרכז וכמרכיב פרופסיונלי ראשון במעלה עבור מורים, היא ה-TPACK (Koehler & Mishra, 2009). מסגרת זו מתבססת על המסגרת שקדמה לה, ולא כללה היבט טכנולוגי (Shulman, 1986). על פי המסגרת המושגית של Shulman (1986) ושל Koehler & Mishra (2009) ידע תוכני של מורה כולל את כל מרכיבי הידע המדעי (Osborne, 2014a), מכיוון שידע תוכני דיסציפלינרי אינו כולל רק ידע אודות מושגים הנדונים בתחום הדעת אלא גם ידע אודות מרכיבים נוספים הנוגעים ליצירת והערכת הידע.

על פי מסגרת זו, ידע טכנולוגי (TK) כולל שימוש מעשי בטכנולוגיות דיגיטליות (כדוגמת Jmol) אך גם כולל ידע המאפשר לחשוב על הטכנולוגיות (גם אם באופן גנרי ולא דיסציפלינרי). ניכר שמורה א' מחזיק בידע טכנולוגי נרחב יותר בהשוואה למורה ב', ועל כן מעלה תפיסות מורכבות יותר בנוגע למרכיב ידע P2. לדוגמה, מורה א' טוען כי טכנולוגיות מטבען משתנות באופן תדיר. ידע טכנולוגי זה מעודד אותו לחשוב באמצעות חיבור בין ידע טכנולוגי וידע פדגוגי (TPK), ועל כן הוא טוען, ששימוש בתוכנה בקרב תלמידים היא אמצעי לרכישת ידע תוכני אך לא מטרה שעומדת בפני עצמה שיש להעריך באמצעותה. מכיוון שמורה א' מעלה את הטענה בהקשר לשימוש בתוכנה למידול מולקולרי ולא אמירה גנרית ניתן להרחיב את הטענה להיבטים תוכניים (TPACK). מורה א' גם מעלה את החשש מפני הוראה של תכנים בביכימיה שבהם אינו שולט (מכיוון שהוא מורה לביולוגיה), ועל כן הוא מציין שהיא מתאימה יותר למורי כימיה אשר שולטים בתוכן (CK). מכאן ניתן להבין את יחסו האמביוולנטי לתוכנה. בנוסף, מורה א' אינו חושש מפני השימוש בתוכנה, אך הוא חושש שהשימוש יהפוך לפרוצדורלי מכיוון שתלמידים אינם רוכשים בקלות את מרכיב הידע התוכני אודות מבנה ותפקוד חלבון באמצעות מודלים מולקולריים. שימוש בידע אפיסטמי (E) אודות מודלים מולקולריים משויך על פי Shulman (1986) לידע התוכני של המורה. מורה א' אינו חושב שכדאי שהתלמידים ילמדו אודות מודלים מולקולריים במדע, אלא יתמקדו בידע אודות חלבונים ולכן רואה את הידע המדעי-אותנטי כפחות חשוב עבור תלמידי תיכון. לעומתו, מורה ב' מחצינה את האתגר האישי בהתמודדות עם מרכיב ידע P2 ובניגוד למורה א' אינה מחצינה תפיסה מורכבת אודותיו. מכאן ניתן להבין שהמורה אינה חשה שהיא שולטת בידע הטכנולוגי (TK) בהשוואה למורה א' ומכאן ניתן להבין שגם לא בידע מסוג TCK וגם לא בידע מסוג TPACK. ייתכן וישנם מורים רבים נוספים המחזיקים בתפיסות דומות לאלה של מורה ב' ורואים ב-TK אתגר, ואילו ישנם מורים כדוגמת מורה א' אשר מצליחים לשלב

את ה-TK אך חוששים מפני השילוב של הידע התוכני ב-TPACK. יש לתת למורים בעלי חששות שונים מענה בהשתלמויות עתידיות.

4 השלכות המחקר

4.1 פיתוח עתידי של משימות המערבות שימוש במידול מולקולרי

אף שהמחקר הנוכחי מוגדר כמחקר הערכה (Johnson & Christensen, 2000) אשר אינו מתעד לערוך שינוי במשימות Jmol שבהם משתמשים תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות במסגרת לימודי הביואינפורמטיקה, בעתיד ניתן יהיה לפתח משימות המתבססות על עקרונות עיצוב (Design Principles) השואבים השראה מהמסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים ולבחון את המשימות באמצעות מחקר מבוסס עיצוב (Design Based Research, DBR). החוקרות (Kali & Linn (2008) מגדירות ארבעה עקרונות-על אשר תומכים בפיתוח סביבות למידה טכנולוגיות (Technology-Enhanced Learning Environment, TELE). שלושה מתוך ארבעת העקרונות שתיארו עשויות להיות מיושמות במסגרת המושגית שתוארה עבור מידול של חלבונים על ידי תלמידי תיכון (איור 1): עקרון-על אחד הוא להפוך את המדע לנגיש. המסגרת המושגית מפרקת את המורכבות של הידע המדעי ומספקת למפתח ולמורה דרך לתווך את המדע האותנטי באמצעות המשימות. עקרון-על שני הוא להפוך את החשיבה לנראית. גם עקרון זה מוסבר באמצעות המסגרת המושגית: תיווך מרכיבי הידע המוצגים במשימה ומועברים לתלמיד במסגרתה יכולים לשמש כמטרות נפרדות ועשויים להקל על התלמיד ליצור חיבורים חזקים בין המרכיבים השונים ורכישת ידע מדעי אודות חלבונים, תוך שימוש בתוכנות מידול מולקולרי כדוגמת Jmol. עקרון-על שלישי הוא קידום למידה עצמאית של התלמיד. שימוש במרכיב ידע מסוג P2 עשוי לקדם למידה שבה התלמיד הוא סוכן הבונה בעצמו את הידע המושגי, וזאת על ידי הפעלה של תוכנת Jmol שהוא אחראי עליה. על כן מומלץ להדגיש את מרכיב הידע P2, בפיתוח משימות, בדרך שלא תפריע לתלמיד לרכוש מרכיבי ידע אחרים.

לסיכום, המסגרת המושגית עשויה לשמש כבסיס תיאורטי לפיתוח משימות ביואינפורמטיות עתידיות ובהם משימות Jmol, על ידי מפתחים שהתמחו בשימוש באותם כלים ומבינים את החשיבה הפדגוגית העומדת מאחוריהם. משימות המשלבות באופן מושכל את ארבעת מרכיבי הידע כדרך למידול מולקולרי של חלבונים עשויות להיות יעילות ברכישת ידע מדעי אודות חלבונים.

4.2 למידה עתידית באמצעות משימות Jmol

רב תלמידי מגמת מערכות ביוטכנולוגיות בישראל אינם משתתפים בפרויקט מחקר שבו הם מתמקדים במבנה ותפקוד חלבון. בנוסף אין חובה ללמוד במגמת כימיה בנוסף למגמת מערכות ביוטכנולוגיות. לכן, סביר להניח כי הידע המוקדם שאתו הגיעו תלמידים מבתי ספר A1-3 והידע של הזוג MR מבית ספר A2, מייצג את הידע של תלמידים רבים אשר חוזים לראשונה במודלים מולקולריים של מבני חלבונים במטרה לחקור את המבנה והתפקוד שלהם באמצעות משימות Jmol. על אף שלמדו קודם לכן בכיתה על מבנה ותפקוד חלבון, ואף צפו בסרט מקדים על אפשרויות השימוש ב-Jmol, הפעם הראשונה שהזוג MR ותלמידי

בתי ספר A1-3 האחרים השתמשו באפשרויות Jmol (P2), צפו בייצוגים חזותיים רבים של מבני חלבונים (P1), ואף חשבו על מודל מולקולרי ככלי מדעי (E) הייתה בעת איסוף הנתונים. אחד ממניעי המחקר בחן את רמת המורכבות הקיימת בלמידה אודת חלבונים. כפי שניתן היה להסיק מתוך ממצאי המחקר, אוסף מרכיבי הידע המתאחדים לכדי ידע מדעי אודות חלבונים (איור 1) אינו נרכש בקלות בקרב תלמידי-תיכון (איור 16). מניע נוסף למחקר הוא לזהות דרכים המסייעות בגישור הפער הקיים בין השימוש ב-Jmol בכיתת המדעים בבית התיכון לבין השימוש בפרקטיקה המדעית-אותנטית. פתרון אחד שהוצע בעבר ויושם הוא פיתוח פעילויות בסביבת "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה" אשר כלל הקשר מדעי אותנטי שיהיה קרוב לעולמם של התלמידים באמצעות חשיפתם לסוגיות מחקריות שהתלמידים עשויים למצוא בהם עניין רב (Gelbart et al., 2009; Machluf & Yarden, 2013). פתרון נוסף שהוצע הוא לעודד את המורים להלהיב תלמידים באמצעות סיפורי-המחקר (Gelbart et al., 2009), בהנחה שדרכי פעולה אלו יעודדו יותר תלמידים לגשת למשימות ביואינפורמטיות ובכללן משימות Jmol בגישה מוכוונת-מחקר. בפועל, כפי שניתן היה לזהות בממצאים הכמותיים והאיכותניים שעלו מתוך המחקר הנוכחי, השיפור בידע המדעי של התלמידים היה מוגבל, וחוקרי המקרה הראו לעיתים שימוש חלקי במרכיבי ידע ולעיתים תפיסה שגויה של מרכיב ידע אחד או יותר. לדוגמה, הזוג MR לא הצליח לקבוע את סדר השלבים שבהן מעורב החלבון AFP במניעת קיפאון תאי ובכך הראה שחקר מבנה החלבון לא התקשר עבורו כלל לתפקוד החלבון (תוצאות אינן מוצגות כאן). התלמידות החזיקו בידע אודות רמות שונות של מבנה חלבון ופענחו מידע חזותי קשור (P1), וכן השתמשו באפשרויות התוכנה באופן יעיל (P2). למרות זאת הן לא קישרו את שני מרכיבי הידע הפרוצדורלי P1 ו-P2 עם ידע תוכני (C) אודות תפקוד החלבון נוגד הקיפאון (המידע לא מוצג). בנוסף, מורים רבים טוענים כי השימוש במשימות ביואינפורמטיות בקרב תלמידים אינן מקדמות מעורבות שלהם בסוגיות-חקר. לטענתם, תלמידים עסוקים במאפיינים פרוצדורליים הכוללים שימוש בכלים וניתוח תוצאות אך אינם משלבים את העיסוק הפרוצדורלי עם ידע ביולוגי רב ערך. על כן, יש לקדם המלצות להוראת הנושא מתוך השקפה רחבה יותר אשר מעמידה את הלומד במרכז. הטי (2012) טוען כי על המורים לתכנן את ההוראה שלהם מבעד עיני תלמידיהם:

"נראות של הוראה ולמידה היא עניין חיוני. אין סוד כמוס שנקרא "הוראה ולמידה": הוראה ולמידה ניכרות לעין בכיתות של מורים ותלמידים מצליחים; הוראה ולמידה ניכרות לעין בלהט שמפגינים המורה והלומד במקרים של הוראה ולמידה מוצלחות; והוראה ולמידה דורשות מיומנות רבה וידע רב גם מצד המורה וגם מצד התלמיד (בתחילה מצד המורה ומאוחר יותר מצד התלמיד). על המורה לדעת מתי למידה מתרחשת או לא מתרחשת, מתי לערוך ניסויים ומתי ללמוד מהניסיון, ללמוד לעקוב, לבקש ולתת משוב, וללמוד מתי עליו לספק אסטרטגיות למידה חלופיות כשאסטרטגיות אחרות נכשלות. חשוב ביותר שההוראה תהיה ניכרת לעיני התלמיד ושהלמידה תהיה ניכרת לעיני המורה. ככל שהתלמיד נעשה למורה וככל שהמורה נעשה ללומד, כך מתקבלות תוצאות מוצלחות יותר"

(הטי, 2012, עמודים 35-36)

מכיוון שהטי טוען שהמורה רואה רק חלק קטן ממה שתלמידים עושים כשהוא נוכח בכיתה, ניתן להסיק מהמחקר הנוכחי שלמידה של תלמידים באמצעות מידול מולקולרי של חלבונים היא אתגר מורכב. הוראה ולמידה על פי המסגרת המושגית שפותחה במחקר זה לאפיון מידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון (איור 1) עשויה להתיר את הקשרים ולהפוך את המסובך לפשוט. בעיני תלמידים, ובהן ארבעת התלמידות שהמחקר התמקד בהן, עצם השימוש ב-Jmol אינו בהכרח גורם המקדם הבנה אף שמייצר עבורן עניין. מכיוון שראוי לסייע להן להתקדם משלב ההתאקלמות לשלב הכשירות (Alexander, 2004) על המשימות ועל המורה המלווה לסייע להן לרכוש ידע מדעי אותנטי. לעיתים, כפי שנידון בתת-פרק 3.2 בדיון, גם המורים חשים כטירונים במהלך השימוש ב-Jmol ונדרשים להכוונה נוספת. כמו כן, המורים אינם יודעים לסווג ולהבחין בארבעת מרכיבי הידע המשתלבים זה עם זה לידע מדעי. המלצות להוראה המקדמת מידול של חלבונים על ידי תלמידים, יינתנו בהמשך תת-פרק זה.

4.3 המלצות להוראה, למידה והערכה של תלמידים המשתמשים במשימות Jmol

הפיתוח והשימוש של תלמידים במודלים קונספטואליים, היא אחת מהמטרות המוצהרות של קובעי מדיניות המשפיעים על פיתוח תכניות לימודים במאה ה-21 (NRC, 2012; NGSS, 2013). השימוש במודלים ופיתוחם נועד כדי לקדם הבנה של מבנים, מנגנונים ותופעות וגם כדי להבין את אופי החשיבה של הפרקטיקה המדעית (Gilbert & Justi, 2016b; Gouvea & Passmore, 2017; Osborne et al., 2018). כיום ישנה הסכמה נרחבת כי גישה משלבת שמעודדת חשיפת תלמידים לידע תוכני בד בבד עם חשיבה כללית (גנרית) עדיפה על פני גישה שנייה הגורסת כי יש ללמד חשיבה כללית במנותק מידע תוכני, או על פני גישה שלישית המשתמשת במודל המסורתי של למידה והוראה שבה התלמידים משננים ידע מוצהר שאינו משמעותי עבורם (זוהר, 2013). ממצאי המחקר הנוכחי מלמדים על כך שמשימות Jmol אשר פותחו בהתאם לתפיסה הרואה בשימוש של תלמידים במודלים מולקולריים מטרה עיקרית בהוראה, אינה מקדמת בהכרח את הרכישה וההתפתחות של הידע המושגי-מדעי של תלמידים אודות חלבונים. התלמידים עלולים שלא להבין את המשמעות של תפקוד החלבון מתוך מאפיינים מבניים מכיוון שהם חשים כטירונים בשימוש באפשרויות התוכנה, ומבולבלים משפע הייצוגים החזותיים. חשיפת המורים למסגרת המושגית המתארת מידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים, עשויה להיות צעד ראשון וחשוב לשיפור ההוראה. כאשר מורה מזהה את מרכיבי הידע המדעי בתוך המשימות ומבחין ביניהם הוא עשוי להשפיע על התלמידים ולהראות להם כיצד ידע תוכני משתלב עם מרכיבי ידע נוספים אשר כוללים שימוש יעיל בייצוגים חזותיים, שימוש באפשרויות תוכנה למידול מולקולרי וכן שימוש בידע אפיסטמי אודות מודלים מולקולריים (איור 1). ניתן ליישם את השימוש במרכיבי המסגרת המושגית באמצעות שילובם עם מסגרות נבחרות להוראה, למידה והערכה. להלן המלצות לשימוש במשימות Jmol למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון, על פי שלוש מסגרות שונות להוראה, למידה והערכה:

- **הוראה:** יישום של הוראה על פי המודל לשוליינות קוגניטיבית (Cognitive apprenticeship) בכיתה (Collins, Brown, & Newman, 1988). על פי המודל קיימים שלושה שלבים להוראה. בשלב הראשון המורה משמש כמדגים עבור התלמידים (Modeling); בשלב השני התלמידים בשיתוף המורה

עוסקים באימון (Coaching); בשלב השלישי התלמידים לומדים בעצמם כשהמורה משמש בעיקר רק כמתקן ותומך אך לא כמעביר ידע (Fading). מידול מולקולרי של חלבונים נעשה בשלב הראשון על ידי המורה, כאשר המורה מציג ומדגיש רק שלושה מרכיבי הידע, קודם ידע תוכני C אחר כך ידע פרוצדורלי P1 ובהמשך ידע אפיסטמי E (איור 4). בשלב השני, האחריות עוברת לתלמידים, ואלה מתנסים בפעילויות קצרות דומות לאלה שהודגמו על ידי המורה וללא הידע הפרוצדורלי P2. כאן, המורה עשוי לזהות קשיים ובלבול הנובע מפגמים ברכישת מרכיבי הידע או במחסור באחד מהם. בשלב האחרון התלמידים עשויים לגשת למשימות Jmol הכוללות את מרכיבי הידע הפרוצדורלי P2 כאשר הם מוכנים יותר בהשוואה ללמידה שזוהתה ותוארה במחקר הנוכחי. בתרחיש כזה, החשיפה בשלב האחרון למרכיבי ידע P2 הכולל משחוק ותסרוט עשויה להגדיל את רמת המומחיות שלהם גם בשאר מרכיבי הידע.

- **למידה:** שימוש באסטרטגיות למידה יעילות הוא אחד הקריטריונים ללמידת-תחום מוצלחת (Alexander, 2004). מורה המקדם את תלמידיו להשתמש במגוון של אסטרטגיות למידה עשוי להביא את תלמידיו לתוצאות המצופות במשימות למידה אם יקדם את התלמידים להשתמש בשיטות למידה בוויסות-עצמי (Self-regulated learning methods) בעיקר ברמות חשיבה של זיכרון והבנה (Weinstein & Mayer, 1986, as cited in Schunk, 2012). במחקר הנוכחי ניתן היה לזהות שתלמידים פועלים כמוכווני-משימה ולכן כמעט ואינם משתמשים בשיטות למידה (כלומר באסטרטגיות למידה שטחיות) כגון חזרה, הרחבה, ארגון, שאלות-עצמיות, ניטור וויסות רגשי, ובוודאי שלא באסטרטגיות העמקה כדוגמת הכנת מפת מושגים. במידה ותלמיד מבחין בין מרכיבי ידע על פי המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים, הוא עשוי להיתרם מכך ולהשתמש באסטרטגיות למידה באופן יעיל יותר מתלמיד שאינו מבין מהם מרכיבי הידע שאותם עליו לרכוש.

- **הערכה:** הערכת תלמידים עשויה להתקיים בכיתה בכל רגע נתון תוך כדי אינטראקציה של מורה ותלמיד. כאן מוצעת הערכה מעצבת לא פורמלית, על פי מסגרת ESRU (Elicit, Students response, Recognize, Use) שפותחה על ידי Ruiz-Primo & Furtak (2007) כדרך להעריך למידה במסגרת מעבדות חקר בפיזיקה. על פי המסגרת שפיתחו, כאשר מורה נמצא באינטראקציה עם תלמיד או עם תלמידים בודדים הוא מעלה שאלה (Elicit), לאחר מכן התלמיד מגיב (Student response), המורה מזהה (Recognize) את הרעיון של התלמיד ומעמת אותו מול הרעיון המדעי המקובל. השלב האחרון של ההערכה המעצבת הלא-פורמלית אשר שונה מדיאלוג טריאדי (IRE) הוא השימוש (Using) של המורה ברעיונות שהועלו על ידי התלמיד. שלב זה נדרש כדי לקדם את התלמיד בלמידה על פי המטרות שהמורה הציב. מורה שתלמידיו משתמשים במשימות Jmol ומבחין במרכיבי הידע המדעי המוצגים במסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים, עשוי להשתמש באופן יעיל יותר בהערכה מעצבת לא-פורמלית (Ruiz-Primo & Furtak, 2007) כאשר תלמידיו עונים על המשימות.

המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון משתלבת בהמלצות שניתנו כאן כך שמורים ותלמידים יוכלו להבחין ולהשתמש בארבעת מרכיבי הידע בהוראה, בלמידה ובהערכה. ההמלצות עשויות להפחית את המורכבות של רכישת ידע מדעי אודות מבנה ותפקוד חלבונים, וכך להשיג את המטרה לגישור הפער בין הפרקטיקה האוטנטית לחקר חלבונים לבין רכישת הידע בבית הספר התיכון (Chinn & Malhotra, 2002).

5 מגבלות המחקר

5.1 המגבלות הקיימות במסגרת המושגית ובתכני המשימות המתבססות עליה

משימות Jmol ממוחשבות כוללות ארבעה מרכיבי ידע המאוגדים לכדי ידע מדעי (איורים 1, 4 ו-14). עדיין, המסגרת המושגית למידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידים אינה לוקחת בחשבון היבטים נוספים כגון סיווג של רמות חשיבה שעבורן פותחו מסגרות תיאורטיות שונות כדוגמת הטקסונומיה של Bloom (1956). כמו כן, אין מענה לשאלה האם המשימות מדרבנות את התלמידים להשתמש במיומנויות חשיבה מסדר גבוה (Resnick, 1987). על פי זוהר (2013), על פעילויות כיתתיות הדורשות מענה על משימות למידה להיות עתירות חשיבה. מכיוון שאין הבחנה במסגרת המושגית בין רמות חשיבה נדרשות למענה על שאלות אזי לא ניתן לדעת מהי רמת החשיבה הנדרשת מתלמיד כאשר הוא משתמש במיומנות קוגניטיבית אחת או אחרת (כגון פענוח או הערכת ייצוגים חזותיים). אין זה אומר שמשימות IPNS ו-AFP המתווכות שימוש ב-Jmol אינן משימות עתירות חשיבה, אך ייתכן והמסגרת המושגית אינה עונה על צרכים של מפתחי פעילויות הרואים את רמות החשיבה כגורם המרכזי במענה על משימות. על כן, בעתיד יש לקחת בחשבון את רמת החשיבה הנדרשת מתלמידים ואת השלב ההתפתחותי שבו הם נמצאים ואת רמתם הקוגניטיבית (Piaget, 1964).

5.2 המגבלות בעריכת המחקר על תלמידים המשתמשים ב-Jmol בתיווך משימות

המחקר והממצאים הכמותיים: מגבלה אחת היא באיסוף הנתונים הכמותי שהוביל לממצאים. במחקר זה נערכה השוואה כמותית בין שתי קבוצות לומדים אשר משתמשים במשימות Jmol מסביבת הלמידה "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה". יחד עם זאת, בולט היעדרה של קבוצה הלומדת אודות חלבונים ללא שימוש במשימות Jmol, ובמקום זאת משתמשת במשימות שבהן מוטמעים מודלים מולקולריים ללא שימוש באפשרויות תוכנה כלל. על כן התקפות הפנימית במערך המחקר הכמותי, שעניינה הוא הבחנה ברורה בין משתנים, חלשה יחסית (Johnson & Christensen, 2000). הביטוי לכך נמצא בממצאים עצמם. הטי (2012) אשר ביצע עם קבוצתו מטה-אנליזה של מחקרים כמותיים הנערכים על מדגמים גדולים של תלמידים טוען כי כמעט כל אירוע למידה אשר מתרחש בכותלי בית הספר או מחוצה לו מספק תוצאות חיוביות, ועל כן יש לבחון את גודל ההשפעה של כל התערבות לימודית, בהשוואה ללמידה אשר מתרחשת לאורך שנת לימודים אחת. כפי שצוין לעיל, במחקר זה לא הוסקו מסקנות על יעילות השימוש ב-Jmol בהשוואה לאי-שימוש בתוכנה בלמידה של תלמידי תיכון אודות חלבונים. ייתכן וגודל ההשפעה של שימוש במודלים מולקולריים גדול מגודל ההשפעה של שימוש ב-Jmol. ההחלטה לעצב את המחקר עם משתנה

בלתי תלוי של שימוש במשימות Jmol וללא קבוצת בקרה נבעה משיקול מוסרי המבקש לאפשר לתלמידים שהשתתפו במחקר ללמוד באופן המותאם לדרישות תכנית הלימודים הכוללת שימוש ב-Jmol. מסיבה זו, מסקנות המחקר הוגבלו להשוואה בין מבחני הקדם והמבחנים לאחר השימוש במשימות Jmol, וכן להשוואה בין שתי קבוצות לומדים שלהם רמות מומחיות שונות. לסיכום, על מחקרים עתידיים, המותנים באישורי ועדות אתיות המאפשרים איסוף נתונים מקבוצת ביקורת, להיות בעלי תיקוף פנימי גבוה ולהשתמש במדגמים גדולים. מחקרים כאלה יכולים להגדיל את תקפות הטענה שקיימים רווחים לימודיים בשימוש בתוכנות למידול מולקולרי בהשוואה לשימוש בשיטות מסורתיות של הוראה אודות מבנה ותפקוד חלבונים. *המחקר והממצאים האיכותניים:* מחקרים איכותניים המתבססים על חקרי מקרה מרובים עשויים לייצג תופעה רחבה יותר בהשוואה למחקרים איכותניים שבהם יש מספר נמוך של חקרי מקרה. בנוסף, חקרי מקרה מרובים עשויים להגביר את התקפות החיצונית, שעניינה הוא אפשרות להכליל למקרים נוספים. כך לדוגמה, במחקרם של (Wefer & Anderson, 2008) אשר בדקו את היכולות הקוגניטיביות, את התגובות הרגשיות, ואת מומחיות התוכן של תלמידי תיכון בעקבות ובמהלך מענה על משימות ביואינופורמטיות, נבחרו עשרה חקרי מקרה שונים. לכן, מגבלה אחת של המחקר האיכותני היא מיעוט חקרי המקרה שנדגמו כמקרים מייצגים. לדוגמה, אין חקר מקרה הבוחן זוג תלמידים בנים או חקר מקרה של זוג שניתן לזהותם כמכווני-מחקר, בשונה מהזוגות שנבחרו כחקרי מקרה שזוהו כמכוונות-משימה.

עם זאת, לאור שתי המסגרות שבהן נעשה שימוש, האחת לאפיון מידול מולקולרי של חלבונים על ידי תלמידי תיכון (ראה תת-פרק 5 ברקע התיאורטי) והשנייה היא המודל ללמידת-תחום (Alexander, 2004), ולאור הניתוח המעמיק שנערך לשיח שני זוגות התלמידות שמנע ניתוחי שיח של זוגות נוספים, קיימת לגיטימציה לנתח שני חקרי מקרה ולא יותר (Yin, 1994; Tellis, 1997). מגבלה שנייה של עיצוב המחקר האיכותני הנוכחי היא שהמקרים נחקרו בנקודת זמן מסוימת בלמידה ולא נבדקה ההתפתחות בלמידה. אך מגבלה זו מאפיינת רבים מהמחקרים המשתמשים במודל ללמידת-תחום (Lawless, 2017). אף שהתקיים עם התלמידות ראיון שהתקיים כשנה לאחר קיום השיח ביניהן במהלך השימוש במשימות Jmol, לא ניתן להגדיר את המחקר המתמקד בחקרי המקרה כמחקר אורך, זאת מכיוון שלא נבדקה ההתפתחות של התלמידות ברכישת הידע במשימות Jmol נוספות. על כן, מסקנות המחקר והדיון בהן אינן מתיימרות לטעון שנצפתה התפתחות בידע שבו התלמידות מחזיקות בעקבות ההתקדמות במשימות (אף שסביר להניח שזו אכן התרחשה). כמובן שניתן היה לצפות בהתקדמות התלמידות ברכישת מרכיב הידע P2 ככל שהן השתמשו ב-Jmol (לדוגמה רחל הכריזה במהלך המענה על המשימה השנייה "אני מלכת ה-Jmol"), וגם במהלך הראיונות נצפתה התקדמות בידע שנרכש במהלכו, אך כאמור לעיל שאלת המחקר לא עוסקת בהתפתחות ושינוי ייצוגי הידע של הלומדות במהלך ההשתתפות במשימות ובראיונות. השאלה בודקת את אופי רכישת הידע מדעי בנקודות זמן שונות בלמידה. לסיכום, על מחקרים עתידיים לשאוף לזהות גורמים נוספים המשפיעים על רכישת ידע של תלמידים באמצעות שימוש בחקרי מקרה מרובים וכן להתמקד בהתפתחות הידע לאורך זמן.

5.3 המגבלות בשאלוני התפיסות ובראיונות המורים

שאלון התפיסות של התלמידים הועבר במשך שנתיים רצופות, ובין השנה הראשונה לשנייה נערכו בו שינויים שהתבססו על המסגרת המושגית ועל הערות תלמידים ועמיתים שנועדו לשפר את מהימנותו. אף על פי כן, לא היו היגדים בשאלון שבאמצעותם היה ניתן לזהות את תפיסת התלמידים בהקשר למבנים האפיסטמיים אשר נידונו בעבודה זו. על כן יש לשפר את השאלון כך שניתן יהיה לזהות באמצעותו מה תלמידים יודעים אודות מודלים מולקולריים וכיצד הם תופסים אותם.

מגבלה נוספת היא במיעוט ראיונות המורים. הראיונות נערכו על מדגם קטן מאוד של מורים וכדי להציג תפיסות שונות של מורים יש לדגום מורים נוספים. למרות המדגם המזערי, עדיין ניתן היה לזהות נטיות של מורים שעמדו במרכז העשייה של קהילת מורי מערכות ביוטכנולוגיות ולנתח באמצעות מסגרת ה-TPACK (Koehler & Mishra, 2009) את התפיסות המייצגות של חלק מהמורים לפחות.

- Ainsworth, S. (2006). Deft: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183-198.
- Alexander, P. A. (2004). A model of domain learning: Reinterpreting expertise as a multidimensional, multistage process. *Motivation, emotion, and cognition: Integrative perspectives on intellectual functioning and development* (pp. 273-298). Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Alexander, P. A., Schallert, D. L., & Hare, V. C. (1991). Coming to terms: How researchers in learning and literacy talk about knowledge. *Review of Educational Research*, 61(3), 315-343.
- Ausubel, D. P. (1969). A cognitive theory of school learning. *Psychology in the Schools*, 6(4), 331-335.
- Azevedo, R. (2005). Computer environments as metacognitive tools for enhancing learning. *Educational Psychologist*, 40(4), 193-197.
- Barrow, L. H. (2006). A brief history of inquiry: From dewey to standards. *Journal of Science Teacher Education*, 17(3), 265-278.
- Bateman, R., & Craig, P. (2010). A proficiency rubric for biomacromolecular 3D literacy, research collaboratory for structural bioinformatics protein data bank. *Protein Data Bank Newsletter*, 5-7.
- Ben-Zvi, R., Eylon, B.-S., & Silberstein, J. (1986). Is an atom of copper malleable? *Journal of Chemical Education*, 63(1), 64.
- Bivall, P., Ainsworth, S., & Tibell, L. A. E. (2011). Do haptic representations help complex molecular learning? *Science Education*, 95(4), 700-719.
- Bloom, B. S. (1956). *Taxonomy of educational objectives: The classification of education goals. Cognitive domain. Handbook 1*. New York, NY: Longman.
- Brown, J. S., Collins, A., & Duguid, P. (1989). Situated cognition and the culture of learning. *Educational Researcher*, 18(1), 32-42.
- Bruner, J. (1986). *A study of thinking*. New York: Routledge.
- Burgin, S. R., Oramous, J., Kaminski, M., Stocker, L., & Moradi, M. (2018). High school biology students use of visual molecular dynamics as an authentic tool for learning about modeling as a professional scientific practice. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 46(3), 230-236.
- Burzlaff, N. I., Rutledge, P. J., Clifton, I. J., Hensgens, C. M., Pickford, M., Adlington, R. M., . . . Baldwin, J. E. (1999). The reaction cycle of isopenicillin n synthase observed by x-ray diffraction. *Nature*, 401(6754), 721-724.
- 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.
- Cohlberg, J. A. (2017). *Exploring proteins and nucleic acids with jmol*. New York: WH Freeman.
- Collins, A., Brown, J. S., & Newman, S. E. (1988). Cognitive apprenticeship: Teaching the craft of reading, writing and mathematics. *Thinking: The Journal of Philosophy for Children*, 8(1), 2-10.
- Cook, M. P. (2006). Visual representations in science education: The influence of prior knowledge and cognitive load theory on instructional design principles. *Science Education*, 90(6), 1073-1091.

- Cooper, M. M., Grove, N., Underwood, S. M., & Klymkowsky, M. W. (2010). Lost in lewis structures: An investigation of student difficulties in developing representational competence. *Journal of Chemical Education*, 87(8), 869-874.
- Craig, P. A., Michel, L. V., & Bateman, R. C. (2013). A survey of educational uses of molecular visualization freeware. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 41(3), 193-205.
- Darden, L. (2008). Thinking again about biological mechanisms. *Philosophy of Science*, 75(5), 958-969.
- De Jong, T., & Ferguson-Hessler, M. G. (1996). Types and qualities of knowledge. *Educational Psychologist*, 31(2), 105-113.
- de Saussure, F. (2011). *Course in general linguistics*. New York: Columbia University Press.
- Dewey, J. (1938). *Logic: The theory of inquiry*. Chicago: Henry Holt Co.
- Dicheva, D., Dichev, C., Agre, G., & Angelova, G. (2015). Gamification in education: A systematic mapping study. *Journal of Educational Technology & Society*, 18(3).
- Disessa, A. A., & Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155-1191.
- Dori, Y. J., & Barak, M. (2001). Virtual and physical molecular modeling: Fostering model perception and spatial understanding. *Educational Technology & Society*, 4(1), 61-74.
- 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.
- Dries, D. R., Dean, D. M., Listenberger, L. L., Novak, W. R. P., Franzen, M. A., & Craig, P. A. (2017). An expanded framework for biomolecular visualization in the classroom: Learning goals and competencies. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 45(1), 69-75.
- Driver, R., Asoko, H., Leach, J., Scott, P., & Mortimer, E. (1994). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational Researcher*, 23(7), 5-12.
- Duit, R., & Glynn, S. (1995). Mental modelling. In G. Welford, J. Osborne, & P. Scott (Eds.), *Research in science education in europe* (pp. 166-176). London: The Falmer Press.
- Duncan, R. G. (2007). The role of domain-specific knowledge in generative reasoning about complicated multileveled phenomena. *Cognition and Instruction*, 25(4), 271-336.
- Duncan, R. G., Chinn, C. A., & Barzilai, S. (2018). Grasp of evidence: Problematizing and expanding the next generation science standards' conceptualization of evidence. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(7), 907-937.
- Duncan, R. G., & Reiser, B. J. (2007). Reasoning across ontologically distinct levels: Students' understandings of molecular genetics. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(7), 938-959.
- Duncan, R. G., Rogat, A. D., & Yarden, A. (2009). A learning progression for deepening students' understandings of modern genetics across the 5th–10th grades. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 655-674.
- Duschl, R. (2008). Science education in three-part harmony: Balancing conceptual, epistemic, and social learning goals. *Review of Research in Education*, 32(1), 268-291.
- Edelson, D. C., & Reiser, B. (2006). Making authentic practices accessible to learners. In R. K. Sawyer (Ed.), *Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 335-354). New York: Cambridge University Press.
- Eilam, B., & Gilbert, J. K. (2014). The significance of visual representations in the teaching of science. In B. Eilam & J. K. Gilbert (Eds.), *Science teachers' use of visual representations* (pp. 3-28). Cham: Springer.

- Erduran, S., & Duschl, R. A. (2004). Interdisciplinary characterizations of models and the nature of chemical knowledge in the classroom. *Studies in Science Education*, 40, 105-138.
- Evagorou, M., Erduran, S., & Mäntylä, T. (2015). The role of visual representations in scientific practices: From conceptual understanding and knowledge generation to 'seeing' how science works. *International Journal of STEM Education*, 2(1), 1-13.
- Fransecky, R. B., & Debes, J. L. (1972). Visual literacy: A way to learn - a way to teach. Washington, DC: Association for Educational Communications and Technology.
- Furtak, E. M., Seidel, T., Iverson, H., & Briggs, D. C. (2012). Experimental and quasi-experimental studies of inquiry-based science teaching: A meta-analysis. *Review of Educational Research*, 83, 300-329, (3)2
- Gallagher, S. R., Coon, W., Donley, K., Scott, A., & Goldberg, D. S. (2011). A first attempt to bring computational biology into advanced high school biology classrooms. *PLoS Comput Biol*, 7(10), e1002244.
- Garnham, C. P., Campbell, R. L., & Davies, P. L. (2011). Anchored clathrate waters bind antifreeze proteins to ice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(18), 7363-7367.
- Gelbart, H., Brill, G., & Yarden, A. (2009). The impact of a web-based research simulation in bioinformatics on students' understanding of genetics. *Research in Science Education*, 39(5), 725-751.
- Giere, Ronald N. (2004). How models are used to represent reality. *Philosophy of Science*, 71(5), 742-752.
- Gilbert, J. K. (2005). Visualization: A metacognitive skill in science and science education. In J. K. Gilbert (Ed.), *Visualization in science education* (pp. 9-27). Dordrecht: Springer.
- Gilbert, J. K., Boulter, C., & Rutherford, M. (1998). Models in explanations, part 1: Horses for courses? *International Journal of Science Education*, 20(1), 83-97.
- Gilbert, J. K., & Justi, R. (2016a). Facing the challenges to science education in schools: The contribution of modelling *Modelling-based teaching in science education* (Vol. 9, pp. 1-15). Cham: Springer.
- Gilbert, J. K. & Justi, R. (2016b). Towards authentic learning in science education *Modelling-based teaching in science education* (Vol. 9, pp. 41-56). Cham: Springer.
- Gilbert, J. K., & Treagust, D. F. (2009). Towards a coherent model for macro, submicro and symbolic representations in chemical education. In J. K. Gilbert & D. Treagust (Eds.), *Multiple representations in chemical education* (pp. 333-350). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Gobert, J. D., O'Dwyer, L., Horwitz, P., Buckley, B. C., Levy, S. T., & Wilensky, U. (2011). Examining the relationship between students' understanding of the nature of models and conceptual learning in biology, physics, and chemistry. *International Journal of Science Education*, 33(5), 653-684.
- Gogolin, S., & Krüger, D. (2018). Students' understanding of the nature and purpose of models. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(9), 1313-1338.
- 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.
- Gott, R., Duggan, S., & Roberts, R. (2008). Concepts of evidence. *School of Education: University of Durham*.
- Gouvea, J., & Passmore, C. (2017). 'Models of' versus 'models for'. *Science & Education*, 26 (1-2)49-63
- Greca, I. M., & Moreira, M. A. (2000). Mental models, conceptual models, and modelling. *International Journal of Science Education*, 22(1), 1-11.

- Greene, J. C., Caracelli, V. J., & Graham, W. F. (1989). Toward a conceptual framework for mixed-method evaluation designs. *Educational Evaluation and Policy Analysis*, 11(3), 255-274.
- Greeno, J. G., Collins, A. M., & Resnick, L. B. (1996). Cognition and learning. In D. C. Berliner & R. C. Calfee (Eds.), *Handbook of educational psychology* (pp. 15-46). New York: Macmillan.
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E., & Smith, C. L. (1991). Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 799-822.
- Grünkorn, J., zu Belzen, A. U., & Krüger, D. (2014). Assessing students' understandings of biological models and their use in science to evaluate a theoretical framework. *International Journal of Science Education*, 36(10), 1651-1684.
- Hagen, J. B. (2000). The origins of bioinformatics. *Nature Reviews Genetics*, 1, 231.
- Halverson, K. L., Abell, S. K., Friedrichsen, P. M., & Pires, J. C. (2009). *Testing a model of representational competence applied to phylogenetic tree thinking*. Paper presented at the National Association of Research in Science Teaching (NARST) Annual Conference, Garden Grove, CA.
- Harle, M., & Towns, M. H. (2013). Students' understanding of primary and secondary protein structure: Drawing secondary protein structure reveals student understanding better than simple recognition of structures. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 41(6), 369-376.
- Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2002). The particulate nature of matter: Challenges in understanding the submicroscopic world. In J. K. Gilbert, O. De Jong, R. Justi, D. F. Treagust, & J. H. Van Driel (Eds.), *Chemical education: Towards research-based practice* (pp. 189-212). Dordrecht: Springer.
- Haskel-Ittah, M., Duncan, R. G., Vazques Ben, L., & Yarden, A. (under review) reasoning about genetic mechanisms: Affordances and constraints for learning. *Journal of Research in Science Teaching*.
- Haskel-Ittah, M., & Yarden, A. (2018). Students' conception of genetic phenomena and its effect on their ability to understand the underlying mechanism. *CBE—Life Sciences Education*, 17(3), ar36.
- 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: Procedures for measurement and analysis. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 3(2), 1-12.
- Herraez, A. (2006). Biomolecules in the computer: Jmol to the rescue. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 34(4), 255-261.
- Herráez, A., & Costa, M. J. (2013). Biochemical visual literacy with constructive alignment: Outcomes, assessment, and activities. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 41(2), 67-69.
- Hesse, M. B. (1966). *Models and analogies in science* (Vol. 36): University of Notre Dame Press Notre Dame.
- Hidi, S., & Renninger, K. A. (2006) The four-phase model of interest development. *Educational Psychologist*, 41(2), 111-127.
- Hmelo-Silver, C. E., Duncan, R. G., & Chinn, C. A. (2007). Scaffolding and achievement in problem-based and inquiry learning: A response to kirschner, sweller, and clark (2006). *Educational Psychologist*, 42(2), 99-107.
- Hodis, E., Prilusky, J., Martz, E., Silman, I., Moul, J., & Sussman, J. L. (2008). Proteopedia-a scientific 'wiki' bridging the rift between three-dimensional structure and function of biomacromolecules. *Genome Biology*, 9(8), 1.

- Holbert, N., & Wilensky, U. (2018). Designing educational video games to be objects-to-think-with. *Journal of the Learning Sciences*, 28(1), 32-72.
- Huerta, M., Downing, G., Haseltine, F., Seto, B., & Liu, Y. (2000). NIH working definition of bioinformatics and computational biology. *US National Institute of Health*. https://cse.sc.edu/~buell/References/Misc/NIH_definitions.pdf
- Husserl, E. (2002). *The shorter logical investigations*: Routledge.
- Israeli Ministry of Education .(2017) .Syllabus of biotechnological studies (10th-12th grade). Jerusalem, Israel: State of Israel Ministry of Education Curriculum Center.
- Jaswal, S. S., O'Hara, P. B., Williamson, P. L., & Springer, A. L. (2013). Teaching structure: Student use of software tools for understanding macromolecular structure in an undergraduate biochemistry course. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 41(5), 351-359.
- Johnson, B., & Christensen, L. (2000). *Educational research: Quantitative and qualitative approaches* (2 ed.). Boston: Pearson Education, Inc.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75-83.
- Justi, R., & Gilbert, J. (2002). Models and modelling in chemical education. In J. K. Gilbert, O. De Jong, R. Justi, D. F. Treagust, & J. H. Van Driel (Eds.), *Chemical education: Towards research-based practice* (pp. 47-68). Dordrecht: Springer.
- Kali, Y., & Linn, M. C. (2008). Technology-enhanced support strategies for inquiry learning. In D. Jonassen, M. J. Spector, M. D. Driscoll, M. Merrill, & J. van Merriënboer (Eds.), *Handbook of research on educational communications and technology* (pp. 145-161). New York: Routledge.
- Kelly, G. J. (2007). Discourse in science classrooms. In S. K. Abell & N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education* (pp. 443-469). New York: Routledge.
- Kendrew, J. C. (1962). The structure of globular proteins. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 4(2), 249-252.
- Kendrew, J. C. ,Dickerson, R. E., Strandberg, B. E., Hart, R. G., Davies, D. R., Phillips, D. C., & Shore, V. C. (1960). Structure of myoglobin: A three-dimensional fourier synthesis at 2 a. Resolution. *Nature*, 185(4711), 422-427.
- Kessel, A., & Ben-Tal, N. (2010). *Introduction to proteins: Structure, function, and motion*. London: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Khersonsky, O., & Tawfik, D. S. (2005). Structure–reactivity studies of serum paraoxonase pon1 suggest that its native activity is lactonase. *Biochemistry*, (16)44, 6371-6382.
- Kindfield, A. C. (1994). Understanding a basic biological process: Expert and novice models of meiosis. *Science Education*, 78(3), 255-283.
- Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. *Educational Psychologist*, 41(2), 75-86.
- Koehler, M., & Mishra, P. (2009). What is technological pedagogical content knowledge (tpack)? *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, 9(1), 60-70.
- Kozma, R., & Russell, J. (2005). Students becoming chemists: Developing representational competence. In J. K. Gilbert (Ed.), *Visualization in science education* (pp. 121-145): Springer.
- Kozma, R. B., & Russell, J. (1997). Multimedia and understanding: Expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 34(9), 949-968.
- Kuhn, D. (2007). Is direct instruction an answer to the right question? *Educational Psychologist*, 42(2), 109-113.
- Kuhn, T. (1962). *The structure of scientific revolutions*: Chicago: The University of Chicago Press.

- Langbeheim, E., & Levy, S. T. (2018). Feeling the forces within materials: Bringing inter-molecular bonding to the fore using embodied modelling. *International Journal of Science Education*, 40(13), 1567-1586.
- Lave, J., & Wenger, E. (1991). *Situated learning: Legitimate peripheral participation*. Cambridge Cambridge university press.
- Lawless, K. A. (2017). Exploring the model of domain learning as a guide to understanding learning with, in and through technology. In H. Fives & D. L. Dinsmore (Eds.), *The model of domain learning* (pp. 132-148). New York: Routledge.
- Lee, S. W.-Y. (2018). Identifying the item hierarchy and charting the progression across grade levels: Surveying taiwanese students' understanding of scientific models and modeling. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 16(8), 1409-1430.
- Lemke, J. L. (1990). *Talking science: Language, learning, and values*. New Jersey: Norwood.
- Leu, D. J., Kinzer, C. K., Coiro, J., Castek, J., & Henry, L. A. (2017). New literacies: A dual-level theory of the changing nature of literacy, instruction, and assessment. *Journal of Education*, 197(2), 1-18.
- Levitt, M. (2001). The birth of computational structural biology. *Nature Structural Biology*, 8, 392-393.
- Lewitter, F., & Bourne, P. E. (2011). Teaching bioinformatics at the secondary school level. *PLoS Comput Biol*, 7(10), e1002242.
- Likert, R. (1932). *A technique for the measurement of attitudes*. New York: Columbia University Press.
- Linenberger, K. J., & Holme, T. A. (2014). Biochemistry instructors' views toward developing and assessing visual literacy in their courses. *Journal of Chemical Education*, 92(1), 23-31.
- Linn, M. C., & Eylon, B.-S. (2011). *Science learning and instruction: Taking advantage of technology to promote knowledge integration*. New York: Routledge.
- Luscombe, N. M., Greenbaum, D., & Gerstein, M. (2001). What is bioinformatics? A proposed definition and overview of the field. *Methods of information in medicine*, 40(04), 346-358.
- Machamer, P., Darden, L., & Craver, C. F. (2000). Thinking about mechanisms. *Philosophy of Science*, 67(1), 1-25.
- Machluf, Y., Gelbart, H., Ben-Dor, S., & Yarden, A. (2017). Making authentic science accessible—the benefits and challenges of integrating bioinformatics into a high-school science curriculum. *Briefings in bioinformatics*, 18(1), 145-159.
- Machluf, Y., & Yarden, A. (2013). Integrating bioinformatics into senior high school: Design principles and implications. *Briefings in Bioinformatics*, 14(5), 648-660.
- Magana, A. J., Taleyarkhan, M., Alvarado, D. R., Kane, M., Springer, J., & Clase, K. (2014). A survey of scholarly literature describing the field of bioinformatics education and bioinformatics educational research. *CBE-Life Sciences Education*, 13(4), 607-623.
- Maltese, A. V., & Tai, R. H. (2010). Eyeballs in the fridge: Sources of early interest in science. *International Journal of Science Education*, 32(5), 669-685.
- Marques, I., Almeida, P., Alves, R., Dias, M. J., Godinho, A., & Pereira-Leal, J. B. (2014). Bioinformatics projects supporting life-sciences learning in high schools. *PLoS Comput Biol*, 10(1), 1-6.
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (2002) Aids to computer-based multimedia learning. *Learning and Instruction*, 12(1), 107-119.
- McCloskey, M. (1983). Naive theories of motion. *Mental models*, 299-324.
- McElhaney, K. W., Chang, H.-Y., Chiu, J. L., & Linn, M. C. (2015). Evidence for effective uses of dynamic visualisations in science curriculum materials. *Studies in Science Education*, 51(1), 49-85.

- Mishra, P., Yadav, A., & Group, D.-P. R. (2013). Rethinking technology & creativity in the 21st century. *TechTrends*, 57(3), 10-14.
- Mnguni, L., Schönborn, K., & Anderson, T. (2016). Assessment of visualisation skills in biochemistry students. *South African Journal of Science*, 112, 1-8.
- National Research Council. (1996). *National science education standards*. Washington, DC: National Academies Press.
- National Research Council. (2000). *Inquiry and the national science education standards*. Washington, DC: National Academies Press.
- National Research Council. (2012). *A framework for k-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Washington, DC: National Academies Press.
- Newcombe, N. S., & Stieff, M. (2012). Six myths about spatial thinking. *International Journal of Science Education*, 34(6), 955-971.
- NGSS. (2013). *Developing assessments for the next generation science standards*. Washington, DC: National Academies Press.
- Norman, D. A. (1983). Some observations on mental models. In D. Gentner & A. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 7-14). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- O'Donoghue, S. I., Goodsell, D. S., Frangakis, A. S., Jossinet, F., Laskowski, R. A., Nilges, M., . . . Olson, A. J. (2010). Visualization of macromolecular structures. *Nature Methods*, 7, S42.
- OECD. (2016). Pisa 2015 science framework. In pisa 2015 assessment and analytical framework: Science, reading, mathematic and financial literacy, oecd publishing, paris.
- Osborne, J. (2014a). Scientific practices and inquiry in the science classroom. In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of research on science education* (Vol. 2, pp. 579-599). New York: Routledge.
- Osborne, J. (2014b). Teaching scientific practices: Meeting the challenge of change. *Journal of Science Teacher Education*, 25(2), 177-196.
- Osborne, J., Rafanelli, S., & Kind, P. (2018). Toward a more coherent model for science education than the crosscutting concepts of the next generation science standards: The affordances of styles of reasoning. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(7), 962-981.
- Papert, S. (1980). *Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas*. New York: Basic Books, Inc.
- Patton, M. Q. (2005). Qualitative research. *Encyclopedia of statistics in behavioral science*.
- PDB. (2019). Macromolecular structures enabling breakthroughs in research and education. <https://www.rcsb.org/>
- Pea, R. D. (1985). Beyond amplification: Using the computer to reorganize mental functioning. *Educational Psychologist*, 20(4), 167-182.
- Pellegrino, J. W., & Hilton, M. L. (2012). *Education for life and work: Developing transferable knowledge and skills in the 21st century*. Washington DC: National Academies Press.
- Piaget, J. (1964). Part i: Cognitive development in children: Piaget development and learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 2(3), 176-186.
- Quillin, K., & Thomas, S. (2015). Drawing-to-learn: A framework for using drawings to promote model-based reasoning in biology. *CBE-Life Sciences Education*, 14(1), es2.
- Resnick, L. B. (1987). *Education and learning to think*. Washington D.C.: National Academies.
- Richardson, D. C., & Richardson, J. S. (2002). Teaching molecular 3-d literacy. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 30(1), 21-26.
- Ruiz-Primo, M. A., & Furtak, E. M. (2007). Exploring teachers' informal formative assessment practices and students' understanding in the context of scientific inquiry. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(1)57-84 .

- Rutten, N., van Joolingen, W. R., & van der Veen, J. T. (2012). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58(1), 136-153.
- Ryle, G. (2009). *The concept of mind*. New-York: Routledge.
- Ryoo, K., & Linn, M. C. (2012). Can dynamic visualizations improve middle school students' understanding of energy in photosynthesis? *Journal of Research in Science Teaching*, 49(2), 218-243.
- Sanders Peirce, C. S. (1906). Prolegomena to an apology for pragmatism. *The Monist*, 16(4), 492-546.
- Schönborn, K. J., & Anderson, T. R. (2006). The importance of visual literacy in the education of biochemists. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 34(2), 94-102.
- Schönborn, K. J., & Anderson, T. R. (2010). Bridging the educational research-teaching practice gap. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 38(5), 347-354.
- Schunk, D. H. (2012). *Learning theories an educational perspective* (6 ed.). Boston: Pearson.
- Schwarz, C. V., & White, B. Y. (2005). Metamodeling knowledge: Developing students' understanding of scientific modeling. *Cognition and Instruction*, 23(2), 165-205.
- Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4-14.
- Siemens, G. (2005). Connectivism: A learning theory for the digital age. *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*.
http://www.itdl.org/Journal/Jan_05/article01.htm
- Smith III, J. P., Disessa, A. A., & Roschelle, J. (1993). Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of knowledge in transition. *The Journal of the Learning Sciences*, 3(2), 115-163.
- Spradley, J. P. (1980). *Participant observation*. Long Grove: Waveland Press.
- Stieff, M., Hegarty, M., & Deslongchamps, G. (2011). Identifying representational competence with multi-representational displays. *Cognition and Instruction*, 29(1), 123-145.
- Stull, A. T., Gainer, M., Padalkar, S., & Hegarty, M. (2016). Promoting representational competence with molecular models in organic chemistry. *Journal of Chemical Education*, 93(6), 994-1001.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4(4), 295-312.
- Tellis, W. M. (1997). Introduction to case study. *The Qualitative Report*, 3(2), 1-14.
- Towns, M. H., Raker, J. R., Becker, N., Harle, M., & Sutcliffe, J. (2012). The biochemistry tetrahedron and the development of the taxonomy of biochemistry external representations (tober). *Chemistry Education Research and Practice*, 13(3), 296-306.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G., & Mamiala, T. L. (2002). Students' understanding of the role of scientific models in learning science. *International Journal of Science Education*, 24(4), 357-368.
- Tsui, C.-Y., & Treagust, D. F. (2013). Introduction to multiple representations: Their importance in biology and biological education *Multiple representations in biological education* (pp. 3-18). Dordrecht: Springer.
- van Mil, M. H., Boerwinkel, D. J., & Waarlo, A. J. (2013). Modelling molecular mechanisms: A framework of scientific reasoning to construct molecular-level explanations for cellular behaviour. *Science & Education*, 22(1), 93-118.
- van Mil, M. H., Postma, P. A., Boerwinkel, D. J., Klaassen, K., & Waarlo, A. J. (2016). Molecular mechanistic reasoning: Toward bridging the gap between the molecular and cellular levels in life science education. *Science Education*, 100(3), 517-585.
- Van Noorden, R., Maher, B., & Nuzzo, R. (2014). The top 100 papers. *Nature*, 514(7524), 550.
- Wagh, A., Cook-Whitt, K., & Wilensky, U. (2017). Bridging inquiry-based science and constructionism: Exploring the alignment between students tinkering with code of

- computational models and goals of inquiry. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(5), 615-641.
- Wefer, S. H., & Anderson, O. R. (2008). Identification of students' content mastery and cognitive and affective percepts of a bioinformatics miniunit: A case study with recommendations for teacher education. *Journal of Science Teacher Education*, 19(4), 355-373.
- White, R., & Gunstone, R. (2014). *Probing understanding*. London: Routledge.
- Wu, H.-K., & Shah, P. (2004). Exploring visuospatial thinking in chemistry learning. *Science Education*, 88(3), 465-492.
- Xie, C., Tinker, R., Tinker, B., Pallant, A., Damelin, D., & Berenfeld, B. (2011). Computational experiments for science education. *Science*, 332(6037), 1516-1517.
- Yarden, H., & Yarden, A. (2010). Learning using dynamic and static visualizations: Students' comprehension, prior knowledge and conceptual status of a biotechnological method. *Research in Science Education*, 40(3), 375-402.
- Yin, R. K. (1994). *Case study research: Design and methods*. Thousand Oaks: SAGE Publications.
- Yonath, A. (2012). Ribosomes: Ribozymes that survived evolution pressures but is paralyzed by tiny antibiotics. In A. Carrondo & P. Spadon (Eds.), *Macromolecular crystallography: Deciphering the structure, function and dynamics of biological molecules*. (pp. 195-208). Dordrecht: Springer
- Zhang, J. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive Science*, 21(2), 179-217.
- Zhang, J., & Norman, D. A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18(1), 87-122.

זוהר, ע' (2013). ציונים זה לא הכול: לקראת שיקומו של השיח הפדגוגי. תל-אביב: ספרית פועלים.

הטי, ג' (2012). למידה נראית למורים: כיצד מורים יכולים להעצים את הוראתם. (תרגום: א' צוקרמן). תל אביב: משכל - הוצאה לאור מיסודן של ידיעות אחרונות וספרי חמד.

מחלוף י', אברהם א', ירדן ע' (2013). שילוב נושא הביואינפורמטיקה בתוכנית הלימודים בביוטכנולוגיה. מור-טק – כתב העת של מרכז המורים הארצי למקצועות הטכנולוגיים בישראל 8: 22-34.

נוסבוים, י', יחיאלי, ת' (1995). תפיסות שגויות ושינוי תפיסתי בהוראת המדעים. תל-אביב: מכון מופ"ת

תמיר, פ' (2006). "החקר בהוראת המדעים והשתקפותו בהוראת הביוטכנולוגיה בישראל", ע' זוהר (עורכת), למידה בדרך החקר: אתגר מתמשך, ירושלים: מאגנס.

-נספחים -

נספח 1: התכנים בתוכנית לימודים "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה".
הפיקוח על הביוטכנולוגיה (2014), המינהל למדע וטכנולוגיה, משרד החינוך, ישראל

V. ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה - חקר מתקשב	
(ראה נספח 3)	
הלימוד יתמקד בשימוש מושכל בכלים ביואינפורמטיים אותנטיים זמינים ברשת האינטרנט לצורך פתרון בעיות ביוטכנולוגיות עכשוויות.	
5 ש'	1. מבוא לביואינפורמטיקה
	1.1 מהי ביואינפורמטיקה?
	1.1.1 רקע היסטורי, הגדרה, מטרת, אבני בניין
	1.1.2 תחומים ושילבים במחקר ביואינפורמטי
	1.2 תרומת וחשיבות הביואינפורמטיקה
	1.2.1 במחקר בסיסי בביולוגיה
	1.2.2 במחקר יישומי בביוטכנולוגיה
10 ש'	2. אחסון וארגון מידע
	2.1 מאגרי מידע ורשומות
	2.2 מאגרי מידע של מולקולות ביולוגיות
	2.2.1 סוג המידע, אופן ארגונו ודרך הצגתו
	2.2.2 מגוון ואיכות מאגרי המידע
	2.2.3 חיפוש והתמצאות במאגרי מידע
	2.2.4 דוגמאות למאגרים: PDB, SwissProt, Refseq, GenBank
10 ש'	3. הבנת המידע האצור ברצפי חומצות גרעין וחלבונים
	3.1 חומצות גרעין
	3.1.1 העברת המידע מ-DNA לחלבון בפרוקריוטים ואאוקריוטים
	3.1.2 בקרה על ביטוי גנים ברמת ה-DNA, ברמת ה-RNA וברמת החלבון

3.1.3	רצפי הסכמה וחשיבותם בתהליכים שונים של בקרת ביטוי
3.2	חלבונים : מרצף ראשוני למבנה שניוני, שלישוני ורבעוני
3.2.1	מרצף ראשוני למבנה שניוני, שלישוני ורבעוני
3.2.2	מוטיבים משותפים ואתרים שמורים ברצף או במבנה של חלבונים וחשיבותם לתפקוד או פעילות החלבון
3.2.3	משפחות חלבונים
4.	גישות, מאגרים וכלים בסיסיים לאחסון, ארגון, הצגה וניתוח רצפים ומבנים
4.1	שימוש וחיפוש במסדי נתונים :
4.1.1	חיפוש על פי שאילתת טקסט (כלי החיפוש Entrez)
4.1.2	חיפוש על פי שאילתת רצף (כלי החיפוש BLASTn ו-BLASTp)
4.2	השוואת רצפים : מדוע משווים, מה משווים, איך משווים וכיצד מנתחים את תוצאת השוואת הרצפים (כלי ClustalW)
4.3	תכנון תחלים ל-PCR לצורכי הגברה ואבחון (כלי Primer3+)
4.4	חיפוש מסגרת קריאה פתוחה ברצף נוקלאוטידים וחיזוי רצף החלבון הצפוי (כלי ORF Finder)
4.5	אפיון מוטיבים בעלי חשיבות מבנית או תפקודית בחלבון ושיוך למשפחות חלבונים (כלי Prosite)
4.6	הצגה של מבנים מרחביים של חלבונים ותצמידים (כלי Jmol)
5.	סוגיות חקר
20 ש'	Case Study Problems שפתרון מתבסס על שימוש בכלים הביואינפורמטיים והחומר הנלמד שהוזכרו לעיל
	- מוטציות מצילות חיים - חיפוש מוטציות בגן להמוגלובין בטא המקנה עמידות בפני מלריה - מרוץ החימוש - אפיון גן המקודד לחלבון אנטיביוטי, משלב בידוד רצף הנוקליאוטידים ועד חקר מבנה החלבון - מרבח מוטציות - מרבח דאגה? - ניבוי המאפיינים וחומרת מחלת CF בהתבסס על זיהוי מוטציות בגן ל-CFTR - על רעלנים ותרופות - פיתוח מעכב תחרותי למניעת הקישור בין אנטיגן המגן לבין גורם האלימות (הבצקת/הממית), בבסיס מחלת הגחלת - לא כל הזוהר זהב! - התחקות אחר מחקר היסטורי – גילוי GFP והפיכתו לכלי מרכזי במחקר, החל משיבוט הגן ועד קביעת המבנה
	פירוט הכלים הביואינפורמטיים הנלמדים בכל פעילות :

משרד החינוך
המינהל למדע ולטכנולוגיה
הפיקוח על ביוטכנולוגיה

מוטציות מצילות חיים	מרוץ החימוש	מרבח מוטציות - מרבח דאגה?	על רעלנים ותרופות	לא כל הזהר זהב!
☒			☒	
	☒		☒	
	☒			
☒			☒	☒
		☒		☒
	☒			☒
		☒		
	☒		☒	☒

6. תרגול ופעילויות העשרה

15 ש'

מסרד החינוד

המניחל למדע ולטכנולוגיה
הפיקוח על ביוטכנולוגיה

נספח 3 : מפרט תכנים לביואינומטרקיה

פירוט מושגים		נושא	מיון מנחם
היקף והעמקה			
אחר ביואינומטרקיה- מבוא לבולוגיה	בני מנקולאטורדים: מבנה של סליל כפול, כוונות הנדולים והשלמת נקולאטורדים: סוגים שונים של DNA- גנומי, משלים: כרומוזום: גן, אלל; מבנה של גן בפרוקריוטים ואאוקריוטים כולל מושגים כמו אינטרון, אקסון, מקדם, קצה 5', קצה 3', מוטציות: סוגים (הוספה/החסרה/החלפה – של נוקלאוטיד אחד או יותר) השפעה (על רצף, מבנה והפקוד חוצרי הביטוי ברמת RNA וחלבון). הומולוגיה ושיתור ברמת DNA – לדוגמא: רצפי הסמטה ב-DNA.	DNA	אנדר
אחר ביואינומטרקיה- מבוא לבולוגיה	בני מנקולאטורדים: מבנה- סליל יחיד בעל כוונות: שיתור של RNA שיתור סוגים שונים של RNA שיתור, מעבר, ריבוזומלי: מבנה RNA שיתור כולל מושגים כמו CDS, UTR, קצה 5', קצה 3', הקוד הגנטי- מטברות קריאה, קידון, קידון החמלה המרגום וסיום החמלה. הומולוגיה ושיתור ברמת RNA – לדוגמא: רצפי הסמטה ב-RNA.	RNA	
הספר פרוקים בביולוגיה: עמ' 7-23 הספר פרוקים בביולוגיה: עמ' 73-81 (עוד בינוטרופסין). ללא נסמאות. הספר תהליכים ביוטכנולוגיים: עמ' 112-116. אחר ביואינומטרקיה – אחר תהליכים ל-Proside	אמיני מטען חובי/שילילי, ארומטיות (וכ'), קשר פפטידי וכוונות החלבון (קצה אמיני וקרבוקסילי): מבנה ראשוני, שניוני (סליל אלפא, משטח בטא, לולאה), שלישיני, רביעוני והקשר לרצף ולמבנה מרחבי. אמינים: מבנה (אחר פעיל ואחר קישור לסובסטרט, וכן התאמה מרחבית ביניהם) ופעילות. סוגי קשרים (קוולנטי, יוני, מינן, קשר דו מולפדי, ון דר וולס, אינטראקציה הידרופובית). התאמה מרחבית וקישור בין לדוגמא גורד-אנטיגן. הומולוגיה ושיתור ברמת החלבון – לדוגמא: מוטציות (מבניות, תפקודיים).	חלבון	אנדר
אחר ביואינומטרקיה- מבוא לבולוגיה	ברמת DNA – תהליך השכפול: תהליך חתחתון. ברמת RNA – תהליך ה"הכשלה" של מולקולות ה RNA שיתור: תהליך השתכור ושתכור החלוף; תהליך המרגום; פירוק מבוקר של מולקולת RNA. ברמת החלבון –שנינים בחלבון שלאחר חמגום; פירוק חלבון. עבור כל תהליך יש לדעת ברמה התקדונית: מיקום כחא, פי הטולקולות המעורבות, וכן חוטרי המוצא והמוצרים של התהליך.	התהליכים והבקרה עליהם	
אחר ביואינומטרקיה- מיון מנחם	שכבות: מחדר; נשא (פלטמיד, גוף וכ'); אוזים: הגבלה; מוטמגן; ספריות DNA) גנומי ונשינים); PCR, אלקטרופורוזן בולל; שיטה לקביעת רצף והנקולאטורדים – חידע המורש הוא המרה העקבנית של הממרת, השימוש והחשיבות.	מושגי יסוד ושיתור בהרגמה גנטית	

המניחל למדע ולטכנולוגיה
הפיקוח על ביוטכנולוגיה

מאגרי מידע		מאגרי מידע	
מאגרי מידע (סוגים שונים, קריטריונים לאיכות המאגר, מובנה, דומה ושונה בין מאגרים שונים): רשימות (מבנה, פורמט FASTA, דומה ושונה בין רשימות באותו מאגר ובין מאגרים): שדות, פרטי מידע.	מאגרי מידע	מאגרי מידע	מאגרי מידע
	כללי	כללי	כללי
• מטרת השימוש בכלי • עקרון פעולת הכלי • התנאים לשימוש בכלי (שקול דעת במוזרות כללי והתאמתו לצרכים ולמטרות שברשות המשתמש) • אופן השימוש בכלי והפעלתו • אופן ניתוח דף התוצאה על חלקיו השונים • תמיכה מעמדה/דואר נכונות המסמך המתקבל • מבט על משימה על דומה ושונה בין כלים שונים.		מטע חופשי: שאילתת טקסט; שימוש באופרטורים (OR AND); הגבלת חופשי לשימוש מפורשי (J); שימוש במסך ה-Limits (הגבלת לסאגר, לסוג מולקולה, לפרמקום מולקולה ברא): שלוש מידע ראשוני מזה התוצאה (מספר רשימות, שם המולקולה, מקור, קוד זיהוי): נדרשו רשימות נבחרת ושליפת מידע רלוונטי – הכרת שדות מזה שונים (Definition, Locus, Accession, Organism, Origin, Comments, וכן בשדה Features תת-שדות כגון Gene, Exon, Intron, UTR, CDS, Site, Region, Protein, וכן בשדה Features תת-שדות חלבוניים). מטע חופשי: שאילתת רצף בפורמט FASTA; בחירת מאגר מידע בו יבוצע חיפוש; הכרת החלקים השונים של דף התוצאה, מרכיביהם, משימות התוצאה, סדר הרשימות, והקשר בין החלקים השונים; חשיבות להבנת התצורה ופיקוד הקווים בחלק הגרפי; משימות המעורבות בשירות כלומר לצורך השאלות, הציונים והמספרים וה-Accession בהעמדת הרצפים וכן התוצאות במספרי המזהות ברצפים המיושמים. השוואה של מספר רצפים מבוקשים (בפורמט FASTA) בפעולה המקראת המזהות רצפים: בחירת סוג המולקולה המיושמת; הבנת ה-Accession בהעמדת הרצפים וכן התוצאות במספרי המזהות ברצפים המיושמים.	
Entrez		אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁴¹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁴² אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁴³ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁴⁴ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁴⁵ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁴⁶ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁴⁷ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁴⁸ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁴⁹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁵⁰ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁵¹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁵² אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁵³ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁵⁴ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁵⁵ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁵⁶ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁵⁷ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁵⁸ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁵⁹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁶⁰ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁶¹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁶² אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁶³ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁶⁴ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁶⁵ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁶⁶ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁶⁷ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁶⁸ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁶⁹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁷⁰ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁷¹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁷² אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁷³ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁷⁴ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁷⁵ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁷⁶ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁷⁷ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁷⁸ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁷⁹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁸⁰ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁸¹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁸² אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁸³ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁸⁴ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁸⁵ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁸⁶ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁸⁷ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁸⁸ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁸⁹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁹⁰ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁹¹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁹² אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁹³ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁹⁴ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁹⁵ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁹⁶ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁹⁷ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁹⁸ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות⁹⁹ אחר ביאונפארמטריקה- מבוא לביאונפארמטריקה, ארגון הכלים ופעילויות¹⁰⁰	

מאגרי מידע (סוגים שונים, קריטריונים לאיכות המאגר, מובנה, דומה ושונה בין מאגרים שונים): רשימות (מבנה, פורמט FASTA, דומה ושונה בין רשימות באותו מאגר ובין מאגרים): שדות, פרטי מידע.

מאגרי מידע (סוגים שונים, קריטריונים לאיכות המאגר, מובנה, דומה ושונה בין מאגרים שונים): רשימות (מבנה, פורמט FASTA, דומה ושונה בין רשימות באותו מאגר ובין מאגרים): שדות, פרטי מידע.

משרד החינוך
ממונהל למדע ולטכנולוגיה
תפוקה על ביטכנולוגיה

המיון במאגר, ה-max, שבו מיון הרצף, וטאפייט ברצף (Features).			
כלי להצגת מנתים חלל-ממדים של מולקולות: במק נמוי החלבוים ופורטט PDB ; הכרת ממשק הכלי אוב המקדוד בשורת המפריטים והפריט אפסרודות; הצגת החלבו: סוגי הצגות, משמעותן, רשעי הצגת דרך הפריט Structure → Style או Scheme → Style ; הזות הצגת וקורום/ריווק באמצעות עכבר ו/או הפריט Zoom ; בחירת מרכיבים בקיבן באמצעות Select דרך המפריט (ח"א מטיעות, אטומים מטיעים, יון, סובסטט וכו') או ה- Console (שירות מטיעות, ח"א בעודות מטיעות וכו') רשעי צבע (Color) עיצוב (Style) וכו'.	Imol		
החוויה והערכת של אסטרטגיה מחקרית			
- לראות את שלבי המחקר באופן רציונאלי - לקבוע את הנישה (בולולות או ביאונפורמטית) בכל שלב - לבחור כלי או להסביר את השקולים בבחירת כלי ביאונפורמטט בכל שלב מחקר - להעריך את התאמת החרות הכלי (מראש או בדיעבד) לכל שלב.			
מיוענות חקר כלליות			
- מיוענות מחקר - מיוענות מחקר / ניסוי: משמעות, חזות, בקורות, מרכיבים קבועים - הצגת ממצאים וניתוח תוצאות עפ"י גרף/טבלה - הסקת מסקנות.			

1 פערלות "מועצות מועלות חיים", 2 פערלות "מורידן החיפוש", 3 פערלות "מרכה מועצות מרכה דאגה", 4 פערלות "על רעלנים והרופות", 5 פערלות "לא כל הזוהר זהב

נספח 2: רשימת המשימות בסביבת "ביואינפורמטיקה בשירות הביוטכנולוגיה".

בטבלה מפורטות משימות מבוססות-חקר אותנטי בכל אחת מהפעילויות, סיווגן לרב- או חד-שלביות, והכלים הביואינפורמטיים שבהם התלמידים משתמשים תוך ביצוע החקר

מספר המשימה	שם המשימה	הבעיה	סיווג המשימה לרב שלבית/חד שלבית	כלי/כלים ביואינפורמטיים בשימוש במסגרת החקר
1	מוטציות מצילות חיים	אילו מוטציות בחלבון ההמוגלובין יכולות להקנות עמידות בפני מחלת המלריה?	רב-שלבית: 2 תתי-משימות	- ENTREZ - Clustal Omega
2	מרוץ החימוש	כיצד ניתן לאתר סוגים חדשים של תרופות אנטיביוטיות?	רב-שלבית: 4 תתי-משימות	- BLAST nucleotide - ORF-Finder - BLAST protein - Jmol
3	מרבח מוטציות – מרבח דאגה?	איך שינוי בגנוטיפ מתבטא בפנוטיפ במחלת הציסטיק פיברוזיס?	רב-שלבית: 2 תתי-משימות	- Primer 3+ - Prosite
4	על רעלנים ותרופות	איך נתכנן מעכב תחורתי לרעלם האנטרקס?	רב-שלבית: 4 תתי-משימות	- ENTREZ - BLAST nucleotide - Clustal Omega - Jmol
5	לא כל הזוהר זהב	כיצד החלבון GFP מתפקד כגן מדווח?	רב-שלבית: 4 תתי-משימות	- Clustal Omega - Primer 3+ - ORF-Finder - Jmol
6	DNA מיטוכונדריאלי ותעלומת שושלת המלוכה	מה עלה בגורלו של בית המלוכה הרוסי והנסיכה אנאסטסיה?	רב-שלבית: 2 תתי-משימות	- ENTREZ - Clustal Omega
7	עכברים חכמים	כיצד ניתן לשאוב מידע על גן שלו חשיבות בזיכרון ולמידה?	חד שלבית: משימה אחת	ENTREZ
8	תוחלת חיים מוארכת	כיצד ניתן לאפיין גן המעורב בהארכת תוחלת החיים מידיעת הרצף בלבד?	חד שלבית: משימה אחת	BLAST protein
9	חלבונים נוגדי קיפאון	כיצד קשור מבנה חלבון לתפקודו ולהתאמת חיידק אנטרקטי לסביבה הקיצונית שבה הוא חי?	חד שלבית: משימה אחת	Jmol
10	דיס-אוטונומיה משפחתית	איך שינוי בגנוטיפ מתבטא בפנוטיפ במחלת הדיסאוטונומיה משפחתית?	חד שלבית: משימה אחת	ORF-Finder

מרוץ החימוש

מידע

בסוף שנות התשעים קבעו צוות חוקרים מאוניברסיטת אוקספורד באנגליה את המבנה של האנזים Isopenicillin N synthase הנקרא בקיצור IPNS שמקורו בפטריה אֶסְפֵּרְגִילוס נִידולֵנְס (Aspergillus Nidulans). החוקרים זיהו כי האתר הפעיל של האנזים מורכב משלוש חומצות אמינו: שתי חומצות היסטידין (שמשומנות באות H) וחומצה גלוטמית (שמשומנות באות D). חומצות אמינו אלו ממוקמות באזורים שונים ברצף החלבון בעמדות 214, 216 ו-270 כפי שניתן לראות באיור 1.

MASTLKANVPKIDVSP¹LGDNMEEKMKVARAIDAASRD²TGF³YAVNHGVD⁴VKRLSNKTR⁵RFHSITDEEKWD⁶
LAIRAYNKEHQD⁷QIRAGY⁸YLSIPGKAVES⁹FCYLNPNFKDPH¹⁰LQISK¹¹TP¹²THEVNVW¹³PD¹⁴EKKH¹⁵GP¹⁶REF¹⁷AEQ¹⁸
YYWDV¹⁹FLG²⁰SSALLRGYALAKGE²¹DF²²FSR²³HFKDD²⁴ALLSSV²⁵LYR²⁶YFP²⁷LD²⁸IP²⁹PA³⁰IK³¹TAED³²GT³³LS³⁴FW³⁵ED³⁶
VSLIT³⁷LV³⁸QSNV³⁹Q⁴⁰LQV⁴¹ET⁴²PG⁴³LYDIE⁴⁴AND⁴⁵TG⁴⁶LYL⁴⁷INC⁴⁸SGYMA⁴⁹HIT⁵⁰NY⁵¹Y⁵²PAP⁵³I⁵⁴IR⁵⁵V⁵⁶K⁵⁷V⁵⁸N⁵⁹E⁶⁰ER⁶¹Q⁶²SL⁶³PF⁶⁴V⁶⁵N⁶⁶L⁶⁷
VND⁶⁸T⁶⁹VLQ⁷⁰WSD⁷¹PN⁷²GK⁷³DEK⁷⁴YPS⁷⁵GO⁷⁶Y⁷⁷GL⁷⁸W⁷⁹LG⁸⁰LV⁸¹S

איור 1: רצף האנזים IPNS ובו מודגשות חומצות האמינו של האתר הפעיל בעמדות 214, 216 ו-270

ממצאים אלה מעלים שתי שאלות מחקריות מעניינות: כיצד ייתכן שחומצות אמינן הרחוקות זו מזו ברצף יכולות להרכיב אתר פעיל אחד? כיצד נקשר הסובסטרט לאתר הפעיל?

שאלה 1

תשובה נשמרה

ניקוד השאלה: 1.00

1. כיצד ייתכן שהאתר הפעיל של האיגדים IPNS מורכב מחומצה אמינית היסטידין בעמדה 270, הרחוקה כמעט 60 חומצות אמינו מעמדות 214 או 216 שבהן ממוקמות שאר החומצות המרכיבות את האתר הפעיל? האם נובע מכך שהאתר הפעיל משתרע על פני אזור גדול באיגדים?

























כאשר החלכון מתקפל למבנה הטבעי שלו המבינים השניונים והמבנה שליוני של החלכון גורמים לחומצות האמינים להיות קרובות זו לזו במרחב. "תקן, והאתר הפעיל משתרע על פני אזור מצומצם במרחב. כתוצאה מהתקפלות החלכון.

path: p

שלבי המשימה

כדי לענות על שאלה זו עלינו להיזכר מהם ההבדלים במבנה הראשוני, השניוני והשלישוני של חלבון. הבדלים אלו אף יסייעו בידינו להבין כיצד בנוי האתר הפעיל וכיצד הסובסטרט נקשר אליו. לשם כך נבצע בפעילות זו את השלבים האלה:

1. בפעילות זו נתבונן במבנה המרחבי של האנזים IPNS, הנקרא גם המבנה התלת-ממדי (3D) של האנזים, על ידי שימוש בכלי להצגת מבנים תלת-ממדיים של מולקולות הקרוי Jmol:
א. נבצע את הצעדים הראשונים בכלי Jmol ונתבונן במבנה החלבון מזוויות שונות.
ב. נציג את המבנים השניוניים במבנה האנזים.
2. נזהה את חומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל ונסמן אותן במרחב התלת-ממדי. בצורה זו נוכל לבחון מהי צורתו המרחבית של האתר הפעיל.
3. נתבונן כיצד הסובסטרט נקשר לאתר הפעיל.

מידע

המבנה המרחבי של אנזים ה-IPNS

מבנה מרחבי של חלבון נקבע בשיטה הנקראת פיזור קרני רנטגן (X-ray Diffraction) או בשיטה אחרת הנקראת תהודה מגנטית גרעינית (Nuclear Magnetic Resonance (NMR)). כל מבני החלבונים שנקבעו עד היום מוחזקים במאגר מידע הנקרא RCSB Protein Data Bank או בראשי תיבות PDB. קביעת המבנה המרחבי של חלבון היא משימה מורכבת מאוד הדורשת זמן ומשאבים רבים. החוקרים פענחו את המבנה המרחבי של רצפי חלבונים מעטים ולכן מאגר מבני החלבונים קטן באופן יחסי למאגרי מידע שאינם של מבני חלבונים.

המבנה המרחבי של חלבון IPNS מפטריות שומת נקבע, ביניהם נקבע המבנה של אנזים ה-IPNS מפטרייה מהזן אֶסְפֶּרְגִילוס נִידוּלֶנְס (Aspergillus Nidulans) על ידי צוות החוקרים האנגלי, באמצעות שיטת פיזור קרני רנטגן (X-ray diffraction). החוקרים יכולים ללמוד רבות על מבנה חלבון זה באמצעות הצגת המבנה בכלי להצגת מבנים תלת-ממדיים של מולקולות. נעקוב אחר תהליך אפיון מבנה החלבון באמצעות הצגת המבנה שלו. קוד הזהי של קובץ זה במאגר המבנים התלת-ממדיים (PDB) הוא 1QJE ואותו חשמים בכלי להצגת המבנה התלת-ממדי של החלבון על מנת להציגו.

לפיכך קובץ מבנה של מולקולה, המופיע כאן בפורמט "pdf". התבוננו בקובץ שנפתח וגוללו מסה עד לשורות המתחילות במילה ATOM (בעמוד 8, דוגמה מוצגת במסך 1). האותיות והמספרים שמוצגים לפיכך מייצגים את מיקומו של כל אטום במרחב התלת-ממדי, ומכך ניתן ליצור מודל של המבנה המרחבי של החלבון כולו.

1QJF.pdb - WordPad

File Edit View Insert Format Help

ORIGX2	0.000000	1.000000	0.000000
ORIGX3	0.000000	0.000000	1.000000
SCALE1	0.021427	0.000000	0.000000
SCALE2	0.000000	0.013906	0.000000
SCALE3	0.000000	0.000000	0.009830

ATOM	1	N	SER A	5	-10.358	45.314	-4.893	1.00	33.24
ATOM	2	CA	SER A	5	-10.159	44.842	-6.330	1.00	32.36
ATOM	3	C	SER A	5	-9.055	43.801	-6.413	1.00	28.82
ATOM	4	O	SER A	5	-8.056	43.896	-5.655	1.00	24.04
ATOM	5	CB	SER A	5	-10.006	46.076	-7.208	1.00	39.34
ATOM	6	OG	SER A	5	-8.903	46.107	-8.081	1.00	47.69
ATOM	7	N	LYS A	6	-9.152	42.780	-7.243	1.00	26.18
ATOM	8	CA	LYS A	6	-8.235	41.635	-7.344	1.00	22.55
ATOM	9	C	LYS A	6	-7.123	42.006	-8.269	1.00	19.52
ATOM	10	O	LYS A	6	-7.320	42.493	-9.386	1.00	23.20
ATOM	11	CB	LYS A	6	-8.942	40.364	-7.836	1.00	27.12
ATOM	12	CG	LYS A	6	-8.189	39.181	-8.321	1.00	32.90
ATOM	13	CD	LYS A	6	-8.720	37.793	-8.613	1.00	40.49
ATOM	14	CE	LYS A	6	-9.950	37.206	-9.262	1.00	45.33
ATOM	15	NZ	LYS A	6	-10.490	35.935	-8.611	1.00	55.54
ATOM	16	N	ALA A	7	-5.902	41.755	-7.831	1.00	17.38

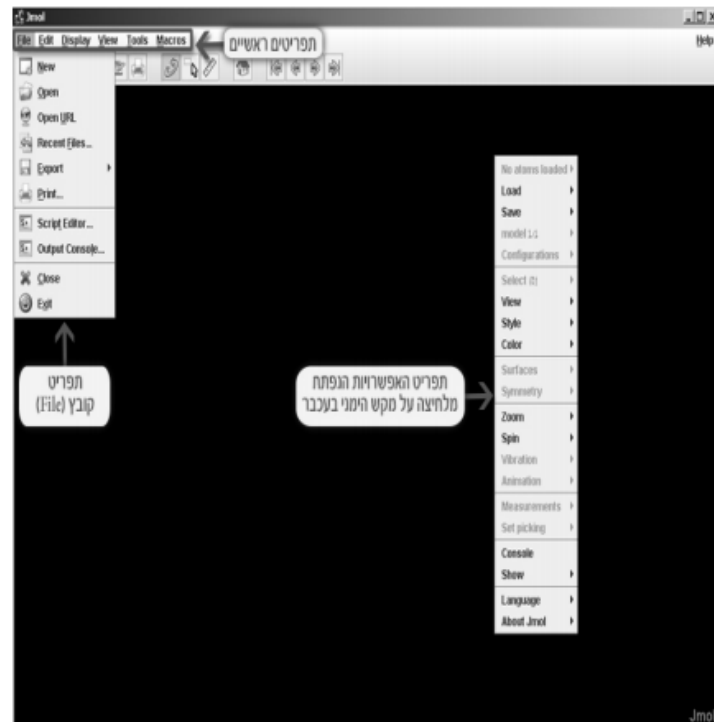
מסך 1: קובץ המבנה המרחבי מורכב ממספרים המציינים את מיקומו של כל אטום במרחב התלת-ממדי

כפי שניתן לראות, המידע בקובץ אינו קל להבנה, וקשה ללמוד ממנו על המבנה המרחבי של החלבון. כדי להתבונן במבנה המרחבי, עלינו להשתמש בתוכנה מיוחדת היודעת לפענח את הנתונים בקובץ המבנה, ולהמיר את המספרים והאותיות לצורה מרחבית. אחת התוכנות שידועות לפענח את הנתונים הללו ולהציג מבנה משוער של חלבון, נקראת תוכנת Jmol.

במחשבכם תמצאו ספרייה הנקראת "Jmol". מצאו בתיקייה קובץ הנקרא Jmol.jar, זהו קובץ בעל צלמית של ספל ; לחצו על קובץ זה, וסביבת העבודה Jmol תיפתח.

בטרם נמשיך בפעילותנו, מומלץ לצפות בסרטון המודרך של הכלי Jmol המסביר עקרונות שימוש בסיסיים בכלי.

בסביבת העבודה Jmol ניתן למצוא את שורת התפריטים הראשיים, ואילו לחיצה על לחצן ימני בעכבר תפתח את תפריט האפשרויות הנוספות (מסך 2).



מסך 2: שורת התפריטים (למעלה משמאל) ותפריט האפשרויות הנוספות (מימין) הנפתח לאחר לחיצה על מקש ימני בעכבר.

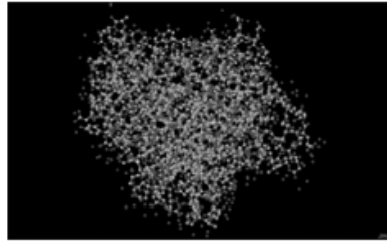
כעת נפתח את קובץ המבנה 1QJE.pdb של החלבון IPNS באמצעות הכלי Jmol:

File -> Get PDB -> 1QJE.pdb

נבחר בתפריט ראשי File, מלחץ על Get PDB ובתוך חלון תיבת השיח הנפתחת נקיש את קוד הקובץ המבוקש 1QJE. כך ניתן לפתוח את הקובץ ישירות ממאגר המידע PDB.

נקודה של השקפה - הסתכלות על החלבון בתצוגות שונות תצוגות מוטות וכדורים

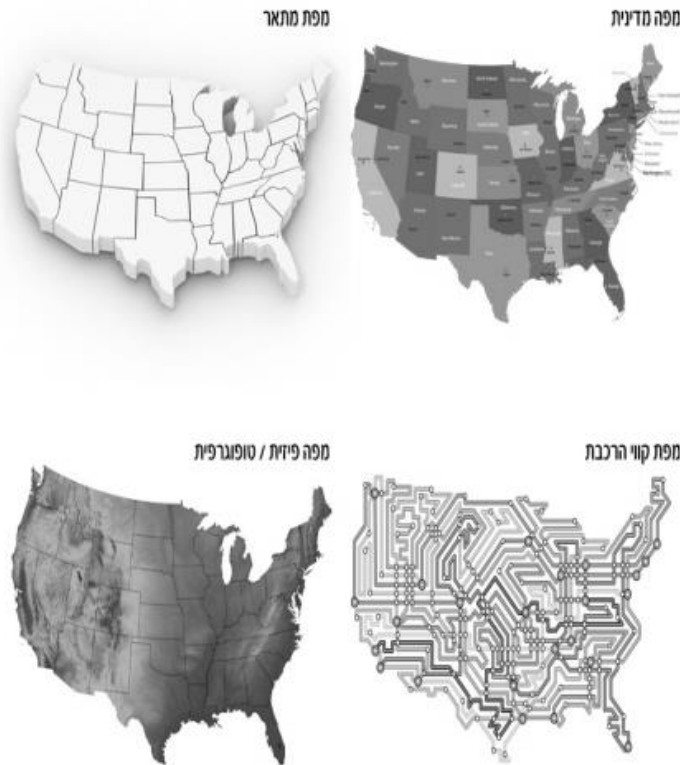
חלבון ה-IPNS מפטריית האֶסְפֶּרְגִּילוס נִידוּלֶנְס (*Aspergillus Nidulans*) מוצג לפנינו בתצוגה הנקראת מוטות וכדורים, Balls and Sticks. כל אטום מוצג ככדור (Ball), וכל קשר קוולנטי מוצג כקו (Stick). כדור אדום מייצג אטום חמצן, כדור כחול מייצג אטום חנקן, וכדור אפור מייצג אטום פחמן. צביעה כזו היא מוסכמת ונקראת CPK על שם ממציאה.



בהמשך משימה זו נתבונן בסוגים שונים של תצוגות, כל תצוגה ממחישה ומדגישה תכונה אחרת במבנה החלבון. האחת שמה דגש על

המבנה השניוני **מסך 3: מבנה חלבון ה-IPNS בתצוגת מוטות וכדורים (Balls and Sticks)** של החלבון.

האחרת על נפח האטומי של החלבון וכן הלאה. תצוגות רבות יש למודל של חלבון, אך עלינו לזכור שמולקולת החלבון איננה נראית במציאות, כפי שהיא מוצגת במודל. המודל הוא רק תיאור סכמטי המציג את מיקומו של כל אטום ביחס לשכניו. ניתן להבין עיקרון זה כאשר אנו מסתכלים על מפת שונות של אותו אזור (איור 2). מפה אחת מדגישה את גבולות המדינה, האחרת את הטופוגרפיה, והשלישית - את הכבישים באותו אזור. אך כל המפות האלה הן רק מודל למציאות, והן ממחישות ומדגישות תכונה מייוחדת בחלבון. במציאות כשנטייל באזור זה נבחין בבתיים, עצים, רחובות ופרטים נוספים שאף אחד מהם לא צוין במפות השונות. כך גם הדבר לגבי מודל של חלבון. כל תצוגה היא מעין מפה המדגישה וממחישה תכונה אחרת במבנה החלבון, אך אינה מייצגת את מבנה החלבון כפי שהוא קיים הלכה למעשה במציאות, זהו רק מודל קרוב.



איור 2: מפות שונות של ארצות הברית, כל מפה ממחישה תכונה או מאפיין שונה

הזזת המודל בכיוונים שונים

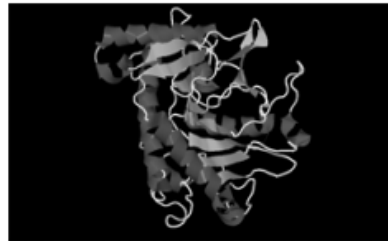
כדי לחקור את מבנה החלבון עלינו להתבונן ב מוזויות שונות; לצפות באזורים מסוימים בחלבון, ועל פי הצורך לקבוע את שיעור ההגדלה של תצוגת החלבון. נזיז את מבנה האנזים IPNS לפי ההוראות המציינות בסעיפים 1-2:

1. נלחץ על המקש השמאלי של העכבר ונזיז אותו ימינה ושמאלה. כעת המבנה מסתובב על צירו האנכי. לחיצה על המקש השמאלי בעכבר והזזה מעלה מסלה תסובב את המבנה על צירו באופקי. באופן דומה נוכל לסובב ולהזיז את במבנה בזוויות שונות.
2. נלחץ על גלגלת העכבר ונגלול אותה למעלה ולמטה - פעולה זו תקרב ותרחיק את החלבון (Zoom In/Zoom Out). ניתן להשתמש גם בתפריט כדי להרחיק/לקרב את החלבון. נלחץ על מקש ימני בעכבר ונבחר **Zoom -> 200%**. נחזיר את תצוגת החלבון למצב שבו ניתן לראות את כולו.
3. לשם הנוחות ניתן להעתיק את המבנה ממיקום אחד לאחר במסך, באמצעות לחיצה על המקשים **Alt+Ctrl**, ובזמנית ללחוץ על מקש שמאלי בעכבר ולהזיזו.

סיכום האפשרויות להזזת החלבון

פונקציה	טיב הזזת החלבון
לחיצה על מקש שמאלי בעכבר + הזזה ימינה ושמאלה	סיבוב החלבון על ציר Y
לחיצה על מקש שמאלי בעכבר + הזזה למעלה ולמטה	סיבוב החלבון על ציר X
לחיצה על מקש Shift + לחיצה על מקש שמאלי בעכבר והזזה ימינה ושמאלה (הזזה מעלה ומטה תגרום לקירוב והרחקה)	סיבוב החלבון על ציר Z
גלילה מעלה ומטה באמצעות גלגלת העכבר	הרחקה/קירוב (Zoom Out/Zoom In)
Zoom → תפריט	
לחיצה על מקשי Alt + Ctrl ולחיצה על מקש שמאלי בעכבר והזזתו	העתקת החלבון מנקודה אחת לנקודה אחרת במסך

תצוגת המבנה השניוני



בתצוגת מוטות וכדורים אמנם חאים כל אטום בחלבון ואת הקשרים הכימיים בין האטומים, אך קשה להבחין מהם המבנים השניוניים הקיימים בחלבון. נחזור לסביבת העבודה Jmol ונשנה את תצוגת החלבון לתצוגת מבנה שטוח. למחץ על המשק הימני של העכבר לקבלת התפרסות האפשרויות נוספות. בתפריט התפרסות נבחר

Style -> Scheme -> Cartoon

מסך 4: מבנה החלבון IPNS בתצוגת מבנה

שניוני
(Cartoon)

שאלה 2

תשובה נשמרה

ניקוד השאלה: 1.00

2. ציינו אילו מבנים שניוניים קיימים בחלבון ה-IPNS

המבנים השניונים הקיימים בחלבון ה-IPNS הם סלילי אלפא, מעטפת קפלים ביטא, לולאות וסימבים.

שאלה 3

תשובה נשמרה

ניקוד השאלה: 1.00

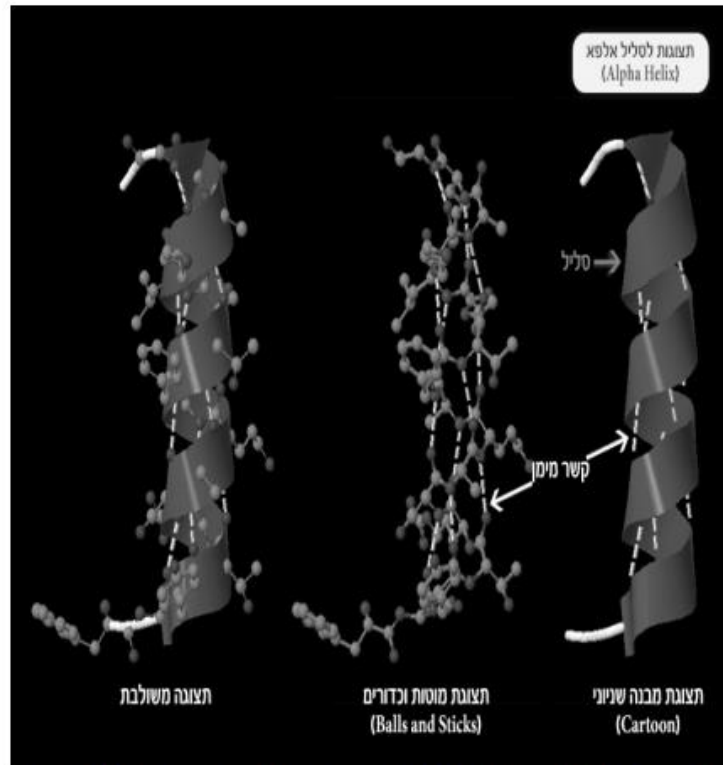
3. תארו כיצד המבנים השניוניים מיוצגים בתצוגת מבנה שניוני

ספיקה

סלילי אלפא מיזצגים כסלילים בצבע ורוד. מעטפת קפלים ביטא מיזצגת כחיצים צהובים המסודרים זה בסמך לזה. ואילו לולאות וסיבובים מיזצגים כחוסים לבנים.

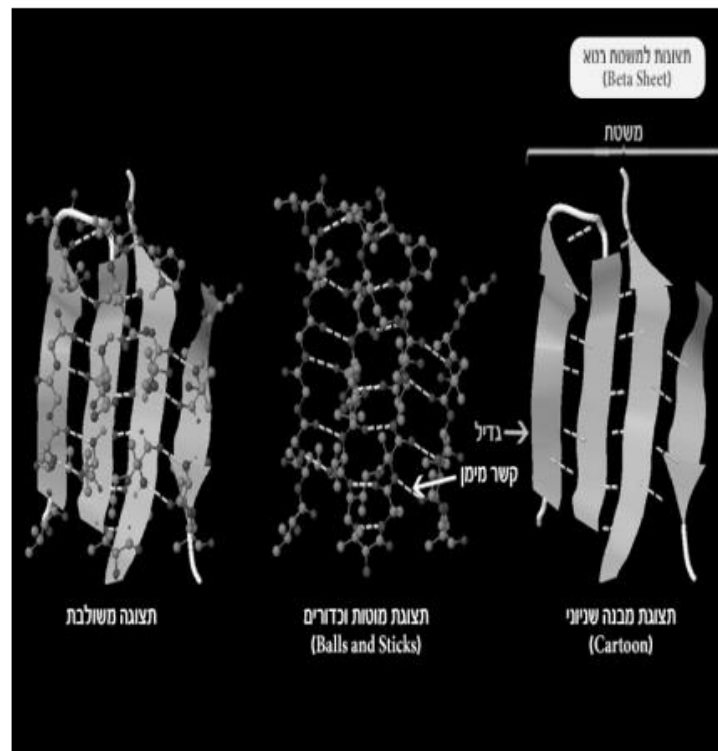
path: p

בחלבון קיימים שלושה סוגים של מבנים שניוניים עיקריים, ואלה הם:
סליל אלפא (alpha helix) - כשמו, כן הוא - מבנה סלילי כדוגמת קפיץ (איור 3). הצורה הסלילית נוצרת בזכות קשרי מימן (קווקוו לבן) הקושרים בין כל חומצה אמינית לבין החומצה האמינית הרחוקה ממנה מרחק ארבע חומצות אמינו ברצף החלבון.



איור 3: סליל אלפא וקשרי המימן (קו מקווקוו בצבע לבן) שנוצרים בין אטום חמצן או אטום חנקן לבין אטומי מימן

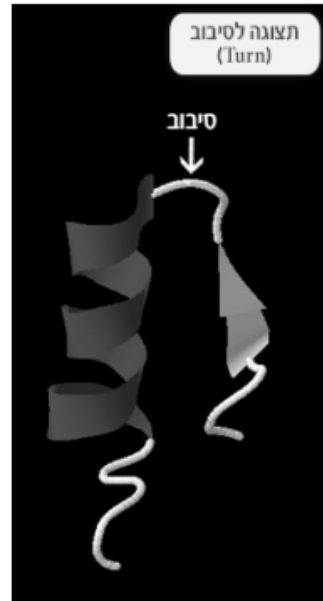
משטח בטא (beta sheet) - מבנה דמוי משטח המוצר כתוצאה מקשרי מימן בין מקטעים מקבילים של השרשרת הפוליפטידית (איור 4). כל מקטע במשטח בטא נקרא גדיל (strand).



איור 4: משטח בטא וקשרי המימן (קו מקווקו בצבע לבן) שנוצרים בין אטום חמצן או אטום חנקן לבין אטומי מימן.

מידע

סיבוב (turn) ולולאה (loop) - מבנים אלו משנים את כיוון השרשרת הפוליפטידית (השרשרת החלבנית). הם מהווים אזורי קישור בין סלילי אלפא ובין משטחי הבטא (איור 5).



איור 5: לולאה המחברת בין סליל אלפא ומשטח בטא

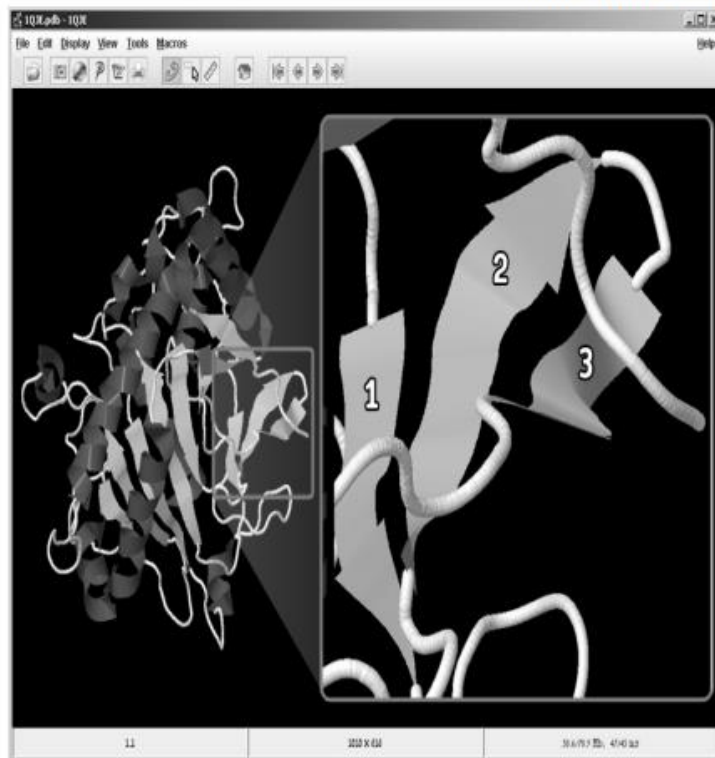
שאלה 4

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

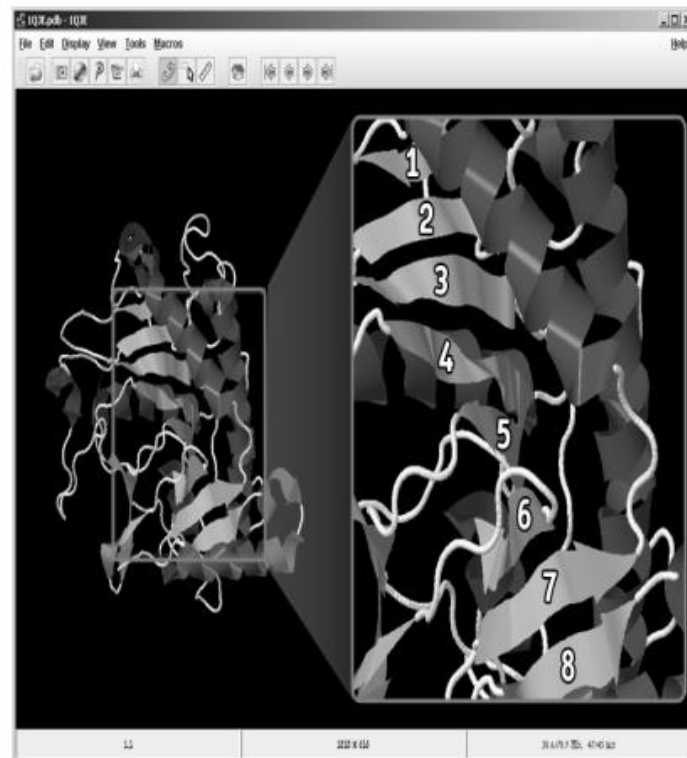
נחזור לחלבון ה-IPNS. במבנה האנזים ניתן להבחין בשני משטחי בטא; במשטח אחד קיימים 3 גדילים (מסך 5). כמה גדילים קיימים במשטח השני?



מסך 5: באנזים ה-IPNS קיימים שני משטחי בטא. בצד ימין ניתן לראות הגדלה של משטח בטא המסומן בריבוע אפור, כאשר כל גדיל בטא ממוספר.

בחרו תשובה אחת:

- ☐ א. גדיל אחד
 - ☐ ב. שלושה גדילים
 - ☒ ג. שמונה גדילים
- כפי שניתן לראות באיור 6, משטח הבטא השני מורכב מ-8 גדילים. לשם נוחות, כל גדיל בטא במשטח ממוספר.



איור 6: במשטח הבטא הנוסף בחלבון קיימים שמונה גדילים

ד. לא ניתן לדעת

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

תצוגת המבנה המרחבי האטומי (קשרי ואן דר-ואלס)

תצוגת המבנה השניוני היא תצוגה סכמטית בלבד המציגה במבנה התלת-ממדי של החלבון את יחידות המבנה הבסיסיות: סלילי אלפא, משטחי בטא, לולאות וסיבובים; ומציגה את מיקומן של יחידות אלה האחת ביחס לאחרת. אך עלינו לזכור שמבנה החלבון איננו נראה במציאות כסלילים ומשטחים. זהו מודל המציג רק את מבנה החלבון בדרכים שונות. לו יכולנו להתבונן בחלבון בסביבתו הטבעית, לרוב היינו מבחינים במולקולה המקופלת בצפיפות רבה לצורה כדורית וקומפקטית.

נציג כעת את החלבון בתצוגה בה מלמד על מבנהו המרחבי ועל נפח האטומים המרכיבים אותו. נלחץ על מקש ימני בעכבר בסביבת העבודה. בתפריט האפשרויות הנספות, נבחר

Style-> Scheme -> CPK Spacefill

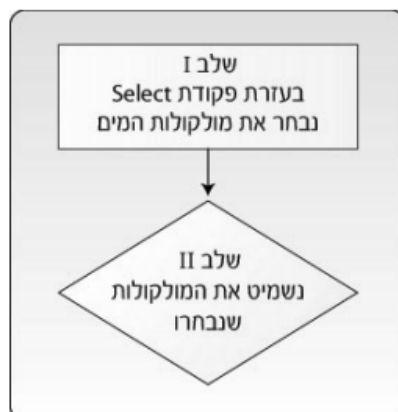
זוהי התצוגה המרחבית האטומית של החלבון. כל אטום מוצג ככדור, כאשר הנפח של כל כדור והמרחק בין הכדורים מייצגים את הנפח של כל אטום והמרחק בין האטומים. לכן תצוגה זו נקראת גם תצוגת נפח אטומי. מקובל להתייחס לתצוגה זו גם כתצוגת קשרי ואן דר-ואלס, כי גודל ענן האלקטרונים (הנפח של הכדור) ושטח הפנים הם בין הגורמים העיקריים (לצד קוטביות) המשפיעים על עוצמת קשרי ואן דר-ואלס הקיימים בין האטומים ובין מולקולות.

פקודת Select

חלק מן הכדורים האדומים מייצגים את אטומי החמצן שבמולקולות המים אשר מקיפות את החלבון. נשמיט אותם מהמודל. כדי להשיג מטרה זו נשתמש בפקודת Select המאפשרת לנו לבחור חלק במודל. פעולה זו בנויה משני שלבים כמוצג באיור 7: בעזרת הפקודה Select נבחר את המרכיב או החלק במולקולה שעליו נבצע את הפעולה, במקרה זה מולקולות המים; ובשלב הבא נבצע את הפעולה על המרכיב הנבחר, במקרה זה נשמיט מן המודל את מולקולות המים. נחזור לסביבת העבודה ונבצע את הפעולות הבאות:

- נלחץ על המקש הימני בעכבר בסביבת העבודה. בתפריט האפשרויות הנספות,

נבחר **Select -> Hetro -> All Water**.



איור 7: ביצוע פעולה על חלק מהחלבון מורכב משני שלבים. בשלב I בוחרים את החלק הרצוי בחלבון ובשלב II מבצעים את הפעולה הרצויה.

שאלה 5

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

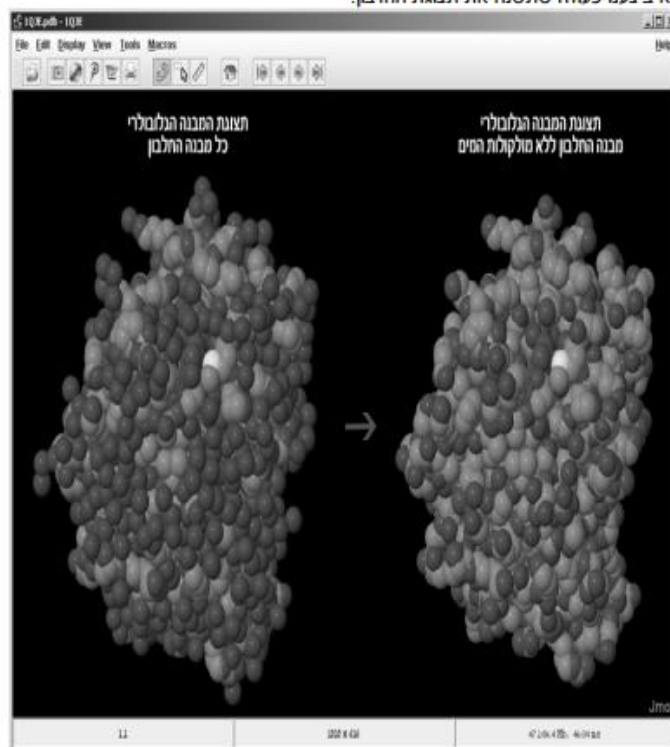
5. האם חל שינוי במבנה החלבון לאחר מתן פקודה זו?

בחרו תשובה אחת:

א. כן

ב. לא

התשובה היא ב. שינוי לב, לאחר שניתנה פקודת Select אין שינוי בהצגת המודל, כיוון שבחרנו בחלק מסוים מהחלבון - במקרה זה במולקולות המים המקיפות את החלבון - ועדיין לא ביצענו פעולה שתשנה את תצוגת החלבון.



איור 8: מודל החלבון IPNS בתצוגת CPK Spacefill לפני (שמאל) ואחרי (ימין) השמטת מולקולות המים מן המודל.

- נלחץ על המקש הימני בעכבר ונבחר **Style -> Atoms -> Off**. מולקולות המים הוסרו מהמודל וכעת נגלית לפנינו תצוגת הנפח האטומי של החלבון, ללא מולקולות המים המקיפות אותו (איור 8)

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

שאלה 6

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

(בצע את הפקודה שנדרשה במשוב לשאלה 5)

6. האם ניתן לזהות במידה כל שהיא נכחות של סלילי אלפא או מעטפת קפלים ביטא בתצוגת מודל ממלא מרחב CPK Spacefill?

בחר תשובה אחת:

☐ א. כן

☒ ב. לא  התשובה היא ב. לא ניתן לזהות בשום צורה מבנים שניוניים בתצוגת מודל ממלא מרחב (CPK Spacefill).

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

שאלה 7

תשובה נשמרה

ניקוד השאלה: 1.00

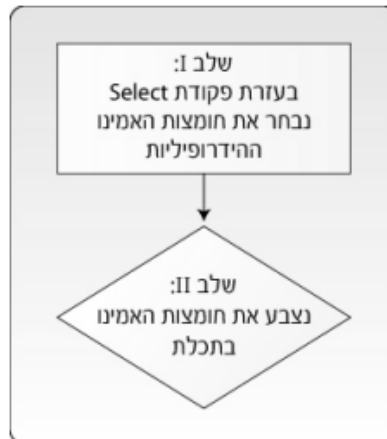
7. מרבית החלבונים המסיסים במים הם בעלי מבנה דמוי כדור ולכן הם נקראים חלבונים גלובולריים. תמיסת מים המכילה בתוכה חלבונים גלובולריים תיראה כתמיסה צלולה. דוגו ביניכם ושערו מדוע. התייחסו בתשובתיכם למיקומן בחלבון של חומצות אמינו הידרופוביות, שונאות מים, ושל חומצות אמינו הידרופיליות, אוהבות מים.

פסקה 

התמיסה צלולה מכיוון שמולקולות החלבון מומסות במים, ההסבר לכך שמולקולות החלבון מסיסות המים היא הנטייה של חומצות אמינו הידרופיליות לפנות כלפי חוץ ולקשור את מולקולות המים ואילו חומצות אמינו הידרופוביות נטות כלפי פנין ונקשרות זו לזו. כך נוצר חלבון בעל מבנה כדורי והתמיסה צלולה.

path: p

חלבונים גלובולריים הם חלבונים מסיסים במים, מכיוון שחומצות האמינו ההידרופוביות השונות מים מצויות בשטח הפנימי של החלבון ואינן חשופות למים; בעוד שהחומצות האמינו ההידרופיליות (פולריות) מצויות לרוב על פני השטח החיצוני של החלבון וחשופות לסביבה המימית שבו נמצא החלבון. נצבע את חומצות האמינו ההידרופיליות בצבע תכלת. גם פעולה זו מצריכה שימוש בפקודה Select כיוון שברצוננו לבחור רק חלק מוּתָך המודל השלם ולבצע רק עליו פעולה, במקרה זה לצבוע את חומצות האמינו ההידרופיליות (פולריות). ראה איור 8.



איור 8: סימון חומצות אמינו ההידרופיליות במודל היא פעולה המורכבת משני שלבים.

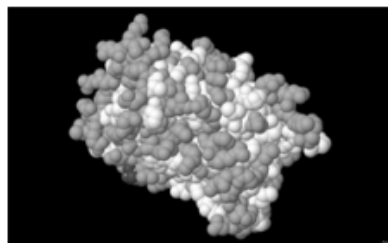
נחזור לסביבת העבודה ונבצע את הפעולות הבאות:

- מלחץ על המקש הימני בעכבר על סביבת העבודה.
- בתפריט לאפשרויות מנספות, נבחר **Select - > Protein - > Polar Residues**.
- מלחץ על המקש הימני בעכבר ונבחר **Color - > Atoms - > Cyan**.

נצבע את חומצות האמינו ההידרופוביות (לא פולריות) בצבע לבן. נחזור לסביבת העבודה ונבצע את הפעולות הבאות:

- מלחץ על המקש הימני בעכבר על סביבת העבודה. בתפריט האפשרויות הנספות, נבחר **Select - > Protein - > Nonpolar Residues**.
- מלחץ על המקש הימני בעכבר ונבחר **Color - > Atoms - > White**.

קעת חומצות האמינו ההידרופיליות צבעות בתכלת, וחומצות האמינו ההידרופוביות צבעות בלבן (מסך 6).



מסך 6: מודל חלבון ה-IPNS בו חומצות האמינו ההידרופיליות מסומנות בתכלת ואילו חומצות האמינו ההידרופוביות צבעות בלבן

ראשי ◀ שנה"ל תשע"ו ◀ ביולוגיה - בתי הספר - תשע"ו ◀ חלבונים 1 - תשע"ו ◀ "מירוץ החימוש" - חלק 1 ◀
חקר החלבון האחראי לייצור הפניצילין, גרסת Jmol ◀ תצוגה מקדימה

שאלה 10

תשובה נשמרה

ניקוד השאלה: 1.00

הצגת מבנה האתר הפעיל

התרשמו מהמבנה השיוני של החלובן ומהמבנה המרחבי האטומי שלו. אך מאחר שבתצוגות אלו אין אנו יכולים להבחין בחומצות אמיני יחידות, לא נוכל להגדיר את מיקומו של האתר הפעיל. כדי להתגבר על אתגר זה נציג את כל החלובן בתצוגה של מבנה שיוני, למעט חומצות האמינים המרכיבות את האתר הפעיל שאותן נציג באופן שונה ובצבע שונה.

בתצוגת מטוט וכדורים אמנם חאים כל אטום בחלבוץ ואת הקשרים היימים בין האטומים, אך קשה להבחין מהם המבנים השינויים הקיימים בחלבוץ. המבנה השינוי של החלבוץ הוא המבנה המציג את החלבוץ על פני מבנים בסיסיים ששחזרים על עצמם: סילולי אלפא המופיעים בצבע וחד, ומסחסי בטא הצבעים בצבע צהוב ולאחרים המתחברים ביניהם: לולאות וסוכיםים הצבעים בצבע לבן. נחזור לסביבת העבודה Jmol ונשנה את תצוגת החלבוץ לתצוגת מבנה שינוי (Cartoon).

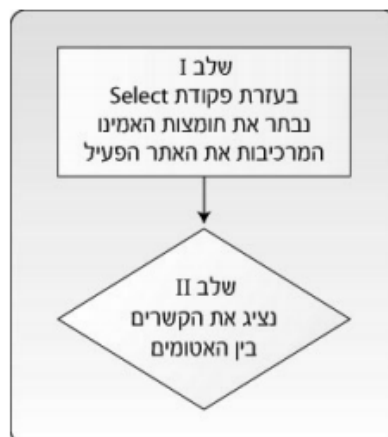
10. מהי הפקודה שעלינו לבצע בסביבת העבודה? לאחר שרשמתם אותה, נסו לבצע אותה בסביבת העבודה.

בשל הראשון עלינו לחזור ולסמן את כל מבנה החלבון ולק בחרים את כל מבנה החלבון
SELECT ולאחר מכן ALL.
בהמשך, STYLE לאחר מכן SCHEME ואחר כך CARTOON

כיוון שבפקודה קודמת בחרנו רק חלק מחומצות האמינו (ההידרופוביות), עלינו לבחור את כל חומצות האמינו בחלבון, ולמעשה את כל האטומים המרכיבים את המהנה, ורק אחר כך לשנות את תצוגת המודל. הפקודות הן אלה:

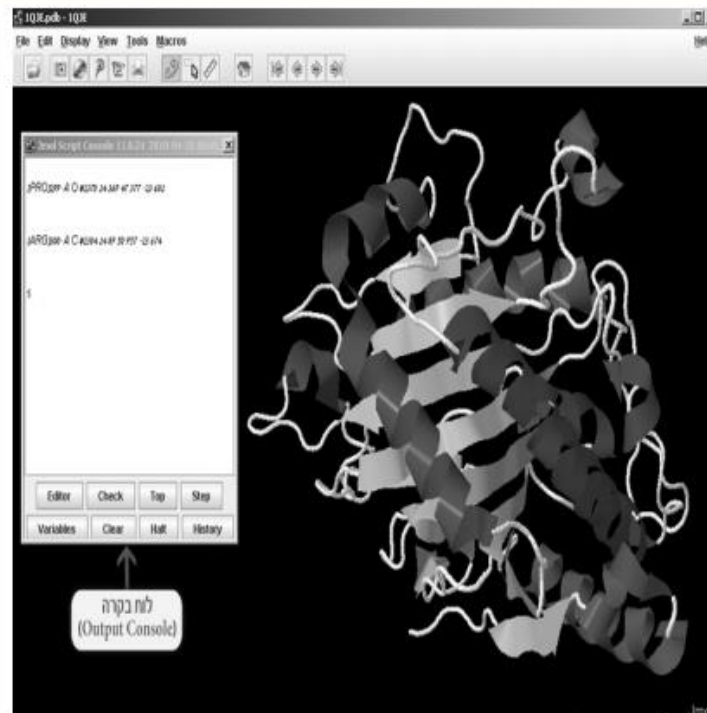
- מלחץ על המקש הימני בעכבר. בתפריט האפשרויות הנספות, נבחר **Select -> All**.
- מלחץ על מקש הימני בעכבר ונבחר **Style -> Scheme -> Cartoon**.

החלבון מוצג כעת בתצוגת המבנה השניוני. כעת נשתמש בפקודת **Select** כדי לבחור את חומצות האמינו שמרכיבות את האתר הפעיל ונציג אותן במודל. פעולה זו בנויה משני שלבים (איור 9): בחירת האזור שעליו נבצע את הפעולה, במקרה זה בחירת חומצות האמינו של האתר הפעיל בעזרת הפקודה **Select**; ובשלב הבא נציג את הקשרים בין האטומים של אותן חומצות אמינו שנבחרו כך שניתן יהיה לראות אותם. נחזור לסביבת העבודה ונבצע את הפעולות הבאות:



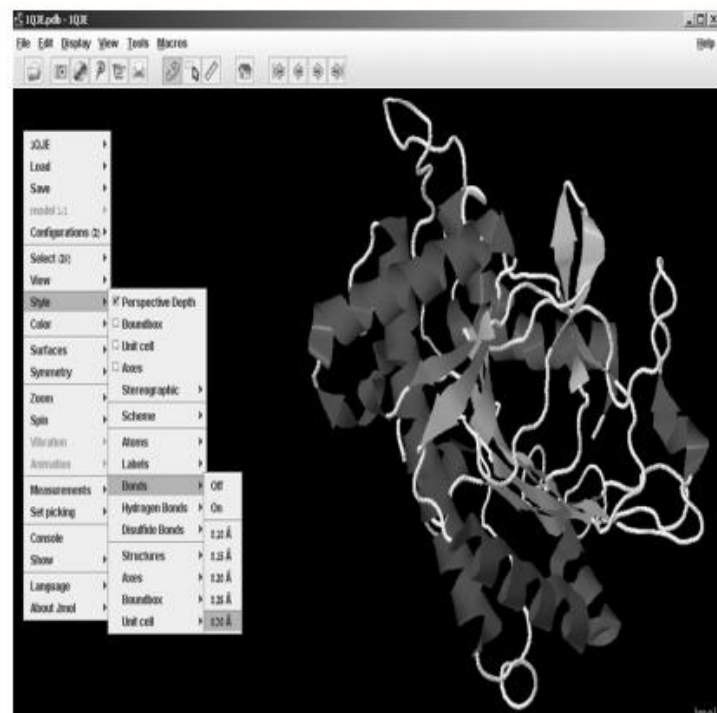
איור 9: הצגת הקשרים בין האטומים בחומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל היא תהליך דו-שלבי

- נפתח את לוח הבקרה (מסך 7): בשורת התפריטים של סביבת העבודה נבחר **File -> Console...>** לחלופין, ניתן ללחוץ על מקש ימני בעכבר ובתפריט האפשרויות הנספות לבחור **Console**



מסך 7: פתיחת לוח הבקרה.

- בחירת חומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל: נקיש בלוח הבקרה את הפקודה **select 214, 216, 270** (ניתן להעתיק את הפקודה בעזרת **ctrl+C**, או "העתק", ולהעביר למסך בעזרת **ctrl+V**, או "הדבק") ונלחץ **Enter**. בפקודה זו בחרנו את חומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל, אגב ציון מספר העמודות של חומצות האמינו באתר הפעיל, כשהן מופרדות בפסיק זו מזו. נשים לב כי הכלי Jmol מצוין שנבחרו 28 אטומים המרכיבים את שלוש חומצות האמינו באתר הפעיל. בעקבות בחירת חומצות האמינו לא חל שינוי בתצוגה של החלבון.
- הצגת הקשרים בין האטומים של חומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל: נלחץ על המקש הימני בעכבר על סביבת העבודה. בתפריט האפשרויות נבחר - **Style -> Bonds** ($0.3 \text{ \AA} > 8$).



מסך 8: הפקודה להצגת הקשרים בין האטומים של חומצות האמינו שנבחרו ברוחב רצוי

- נסובב את החלבון ונמצא מה השתנה במודל החלבון שלפנינו.
- שינוי צבע הקשרים: נעמוד על סביבת העבודה ונלחץ על המקש הימני בעכבר. בתפריט האפשרויות הנוספות, נבחר
- **Color -> Bonds -> Cyan**.

שאלה 11

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

11. סובב שוב את החלבון, קרב והרחיקו אותו ומצאו מה השתנה במודל החלבון שלפנינו.

בחרו תשובה אחת:

- ☐ א. תצוגת החלבון מלו מציגה את הקשרים בין האטומים.
- ☐ ב. הקשרים בין האטומים מוצגים רק לחומצות האמינו שבחרו החוקרים.
- ☐ ג. הקשרים בין האטומים בחומצות האמינו שבחרו החוקרים נצבעו בתכלת.
- ☒ ד. תשובה ב ו-ג נכונות. ✓

התשובה היא ד. בפקודה **Style -> Bonds -> 0.3 Å** אנן מבקשים שרוחב הקשרים הכימיים (Bonds) יוצגו בהפרדה של 0.3 Å (אנגסטרם) היא יחידת מידה לאורך השווה ל- 10^{-10} מטר, זה שווה למאית המיליונית של סנטימטר. נשים לב שאין משמעות הדבר שגודל האטומים או הקשרים במולקולה השתנו, אלא רק תצוגה שלהם. נשים לב שאין משמעות הדבר נוגע לגודל האטומים או לקשרים במולקולה, אלא רק לתצוגה שלהם. תצוגה זו מאפשרת לנו לראות את הקשרים הכימיים בבירור. בפקודה **Color-> Bonds -> Cyan** אנן מבקשים שאותם הקשרים הכימיים (Bonds) ייציבו בצבע תכלת (Cyan), וכך מכל לראות אותם בבירור.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

שאלה 12

תקין

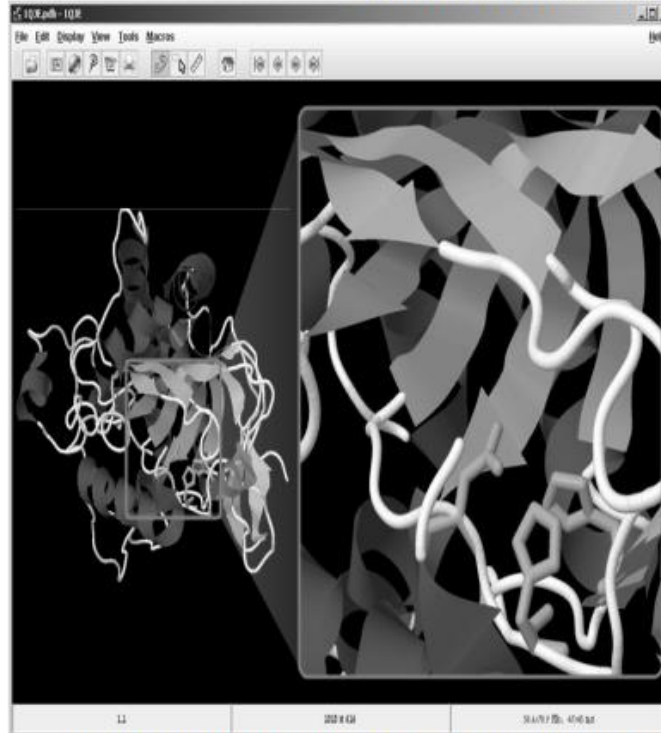
1.00 נקודות

מתוך 1.00

12. האם במבנה המרחבי של החלבון חומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל סמוכות זו לזו או רחוקות זו מזו?

בחרו תשובה אחת:

- ☒ א. סמוכות זו לזו. ✓ התשובה היא א. כל שלוש חומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל קרובות זו לזו במבנה המרחבי של האנזים. במסך 9 ניתן לראות את מקומן של שלוש חומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל.



מסך 9: חומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל (תכלת) סמוכות זו לזו. ניתן להתמקד באזור הרצוי בעזרת השימוש בפקודות zoom in בתפריט.

☐ ב. רחוקות זו מזו.

☐ ג. שתי חומצות אמינו קרובות זו לזו, והשלישית רחוקה מהן.

☐ ד. לא ניתן לדעת.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

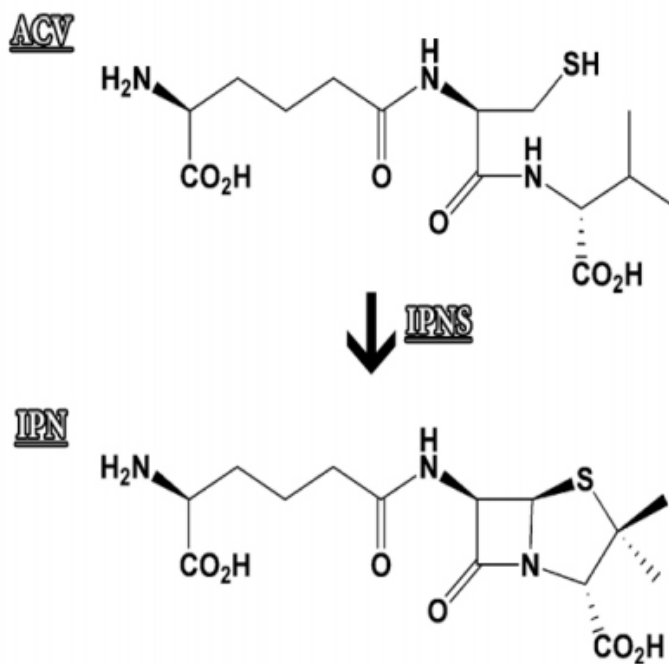
ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

מידע

קישור הסובסטרט לאתר הפעיל

מצאנו את האתר הפעיל בחלבון ה-IPNS וגילינו שכל שלוש חומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל קרובות זו לזו במבנה המרחבי. כעת נרצה להבין מהו הסובסטרט שנקשר לאתר הפעיל, כיצד האתר הפעיל מותאם לצורתו, ומהו התוצר שמתקבל מפעילותו של אנזים ה-IPNS.

אנזים ה-IPNS מזרז תהליך שבו מולקולה ארוכה הנקראת ACV הופכת למולקולה שנקראת IPN (איור 10). מולקולת ה-IPN משתתפת במסלול היצירה של האנטיביוטיקות פנצילין וספלוספורין, ולכן היא בעלת חשיבות גדולה.



איור 10: אנזים IPNS מזרז את יצירת מולקולת ה-IPN ממולקולת הסובסטרט ACV

שאלה 13

שאלה זו טרם נענתה

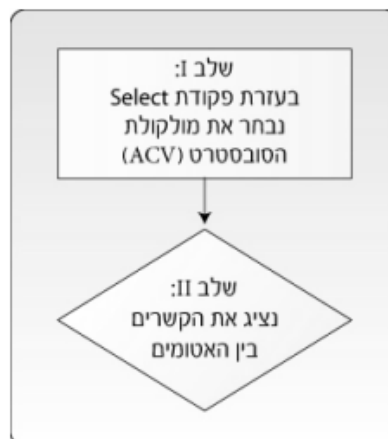
ניקוד השאלה: 1.00

13. באיזה הבדל בולט לעין אתם יכולים להבחין בין מולקולת הסובסטרט ACV למולקולת התוצר IPN ?

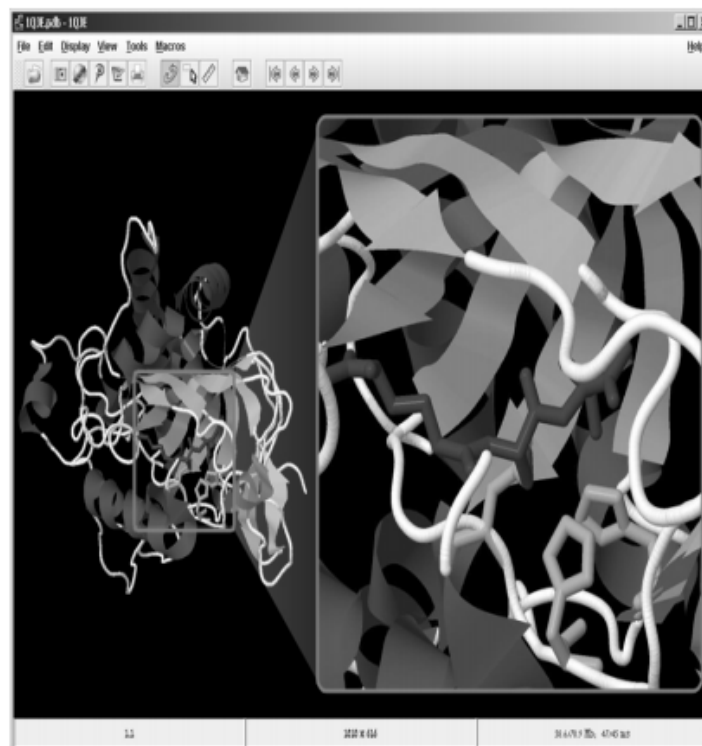
							
בתוצר IPN ישנם שני מבנים טבעתיים שלא ניתן לראות בסובסטרט ACV. בנוסף בסובסטרט ACV ישנם יותר אטומי מימן בהשוואה ל-IPN.							
path: p							

על מנת לפענח את המבנה המרחבי של חלבון, צריך תחילה לייצר גבישים של חלבון. תמיסת הגיבוש של חלבון ה-IPNS שאנו מתכננים בו הכילה גם מולקולות סובסטרט וגם מולקולות תוצר; לכן נוצר גביש חלבון שחלקם מכילים את מולקולת הסובסטרט, וחלקם מכילים את מולקולת התוצר, ונסכל לראות אותם במבנה המרחבי של התצמיד החלבוני.

נחזור כעת לסביבת העבודה Jmol ונציג את מולקולת הסובסטרט (ACV). גם כאן פעולה זו בנויה משני שלבים: בשלב I אנחנו בוחרים את מולקולת הסובסטרט ACV באמצעות הפקודה Select, ובשלב II אנחנו מציגים את הקשרים בין האטומים של מולקולת ה-ACV בצורה הנראית לעין (איור 11).



- איור 11: השלבים להצגת הקשרים בין אטומי מולקולת הסובסטרט ACV
 -
 - בסביבת העבודה נלחץ על המקש הימני בעכבר לפתיחת תפריט האפשרויות הנספות.
 - נבחר בפקודה **ACV - L-D-(A- -> Select -> Hetero -> By Hetatm** (**AMINOADIPOYL**)... (בשלב זה המודל לא השתנה).
 - נלחץ על המקש הימני בעכבר ונבחר בפקודה: **Style -> Bonds -> 0.3Å**.
 - נלחץ על המקש הימני בעכבר ונבחר בפקודה: **Color -> Bonds -> Red**.
- כעת מולקולת הסובסטרט מוצגת לפנינו בצבע אדום, והאתר הפעיל מוצג בצבע תכלת (מסך 10).



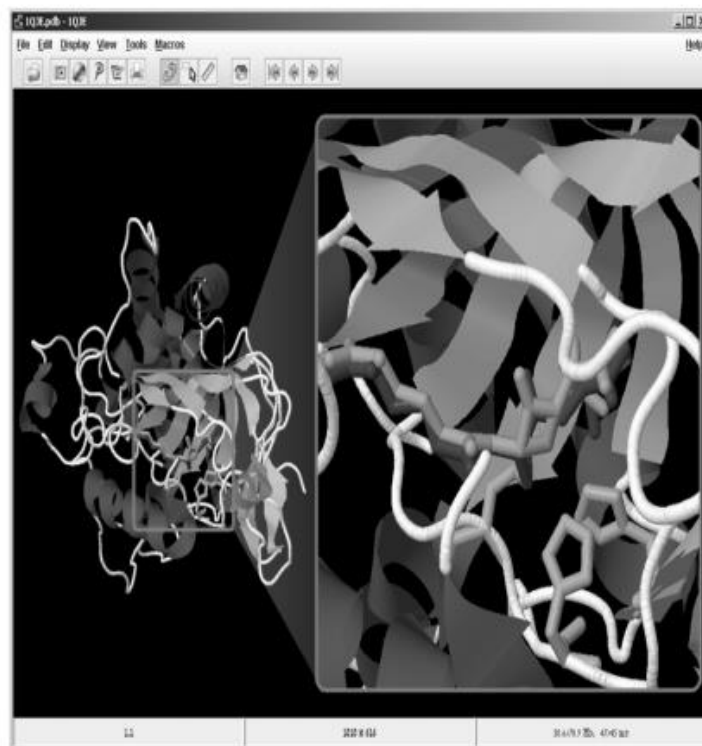
מסך 10: מולקולת הסובסטרט (אדום) ממוקמת מול האתר הפעיל (תכלת) באנזים ה-IPNS

באופן דומה נציג את מולקולת התוצר בצבע סגול.

בסביבת העבודה נלחץ על המקש הימני בעכבר. נפתח תפריט לאפשרויות מסופות.

- **נבחר** **Select-> Hetero -> By Hetatm -> IP1 isopenecillin N** (בשלב זה המודל לא השתנה).
- **נלחץ** על המקש הימני בעכבר ונבחר בפקודה **Style-> Bonds -> 0.3Å**.
- **נלחץ** על המקש הימני בעכבר ונבחר בפקודה **Color -> Bonds -> Violet**.
- **נלחץ** על המקש הימני בעכבר ונבחר בפקודה **Zoom -> 200%**.

כעת מוצגת גם מולקולת התוצר בצבע סגול (מסך 11).



מסך 11: מולקולת הסובסטרט (אדום) ומולקולת התוצר (סגול) ממוקמות מול האתר הפעיל (תכלת) באנזים ה-IPNS

שאלה 14

שאלה זו טרם נענתה

ניקוד השאלה: 1.00

14. סובב את המודל והתבונן בסובסטרט ובתוצר. מהו ההבדל העיקרי בין שתי מולקולות אלה?

פסקה

ניתן לראות שבתוצר IPN ישנם שני מבנים טבעתיים שלא ניתן לראות בסובסטרט ACV.

path: p

שאלה 15

שאלה זו טרם נענתה

ניקוד השאלה: 1.00

נחזור ונדגיש כי לאחר שהאנזים IPNS נקשר לסובסטרט ACV, מתקבלת מולקולת תוצר IPN בעלת מבנה השונה מזה של הסובסטרט, ולכן התוצר IPN ייתק מן האנזים. כלומר, האנזים אינו קשור גם לסובסטרט וגם לתוצר ב-זמנית. בעת יצירת הגבישים ששימשו לקביעת המבנה המרחבי של האנזים IPNS, נוצר גבישים שבחלק מהם האנזים קשור לתוצר ובחלק מהגבישים האנזים קשור לתוצר רגע לפני שהוא ייתק ממנו. זו הסיבה לכך שבמבנה ניתן לראות הן את הסובסטרט והן את התוצר, ולא רק אחד מהם, ביחס לאנזים. יחד עם מבנה החלבון זוהה יון המתכת ברזל.

15. היכן לדעתכם ממוקם יון המתכת ברזל בחלבון ה-IPNS? הסבירו בחירתכם.



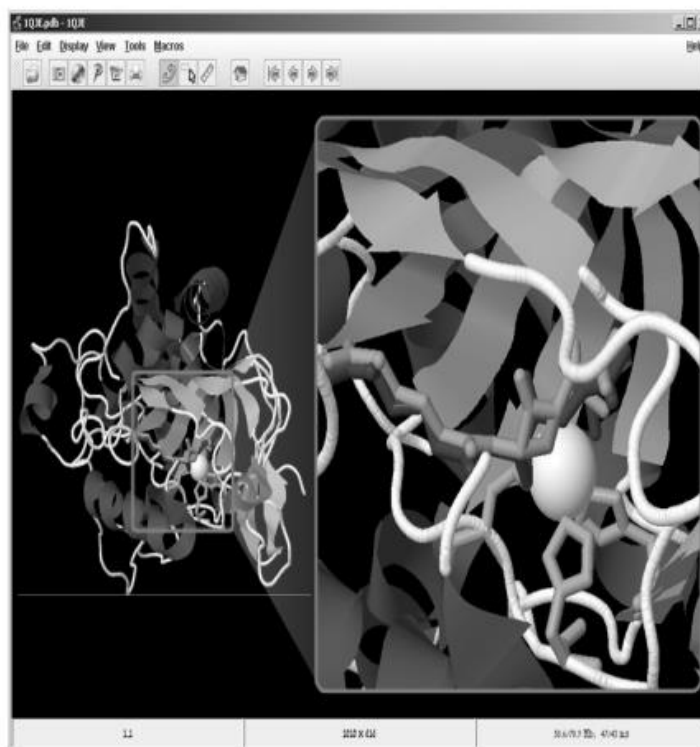
ההשערה היא שיון הברזל נמצא במרכז החלבון. ראשית ששלושת חומצות האמינו המשתתפות בפעילות החלבון נטות כלפי פנים, וכך גם הסובסטרט והתוצר נמצאים בליבת החלבון. ניתן להניח שהברזל משתתף בפעילות החלבון ולכן הוא גם נמצא בליבה ומשתתף בתגובה.

path: p

נציג את יון המתכת במודל החלבון. גם פעולה זו נעשית בשני שלבים. בשלב הראשון נבחר ביון המתכת בעזרת הפקודה Select, ובשלב הבא נשנה את הנפח של יון המתכת כך שנראה אותו במודל, כך:

- בסביבת העבודה נלחץ על המקש הימני בעכבר. נפתח תפריט לאפשרויות מסופות
- נבחר Select-> Hetero -> By Hetatm -> FE2- FE (II) ION (השתנה).
- נלחץ על המקש הימני בעכבר ונבחר בפקודה: Style è Atoms -> 100% van der Waals.

גם אטום המתכת מוצג לפנינו, וניתן לראות שהוא ממוקם בין שלוש חומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל מצד אחד, וסמוך למולקולת הסובסטרט מצד שני (מסך 12). במיקום מרכזי זה יון הברזל משמש כקולט אלקטרונים ומזרז את התהליך הקטליטי.



מסך 12: יון המתכת (לבן) ביחס לאתר הפעיל (תכלת), הסובסטרט (אדום) והתוצר (סגול) בתצמיד ה-IPNS

בחלק זה הצגנו את שלוש חומצות האמינו באתר הפעיל ואת מיקום הסובסטרט ביחס לאתר הפעיל. ראינו שיון המתכת משמש כקופקטור המזרז את התהליך הקטליטי שבמשתנים קשרים כימיים במולקולת הסובסטרט כך שנוצרת טבעת מחומשת סגורה. תגובה זו משנה את מבנה המולקולה, מולקולת התוצר קצרה יותר מהסובסטרט ומשנה זווית באזור הטבעות. בשל כך מולקולת התוצר מתנתקת מהאתר הפעיל ומשתחררת אל הסביבה המימית.

סיכום משימה

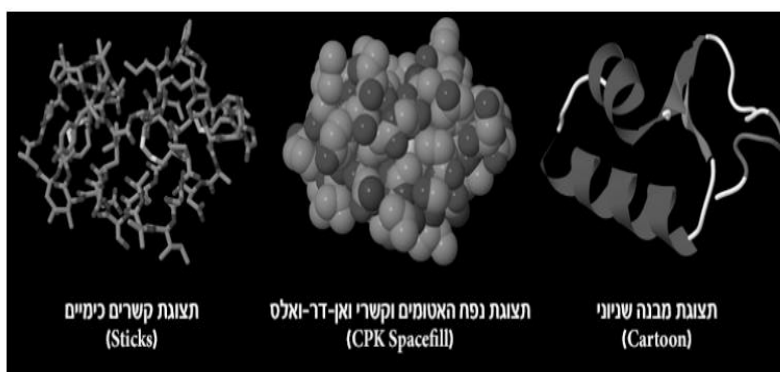
בתחילת פעילות זו ידענו את המיקום של חומצות האמינו המרכיבות את האתר הפעיל של אנזים ה-IPNS ברצף חומצות האמינו של החלבון: היסטידין בעמדה 214 (סימנה H214), חומצה גלוטמית בעמדה 216 (סימנה D216) והיסטידין בעמדה 270 (סימנה H270). שאלנו כיצד ייתכן אתר פעיל המורכב משלוש חומצות אמינו שאחת מהן, H270, מרחוקת משתי האחרות? האם הריחוק ברצף חומצות האמינו מעיד שהאתר הפעיל משתרע על אזור נרחב במבנה המרחבי של החלבון? כדי לענות על שאלות אלו וכדי להבין את מנגנון הפעולה של האתר הפעיל, נעזרנו בסביבת העבודה Jmol המציגה מבנים מרחביים של מולקולות. למדנו שניתן להציג את מבנה החלבון בדרכי תצוגה רבות ושכל אחת מהן ממחישה ומדגישה תכונות שונות של החלבון. לדוגמה, תצוגת המוטות והכדורים מציגה את כל האטומים ואת כל הקשרים הכימיים בין האטומים. בעזרת תצוגה זו אנו יכולים לראות חומצות אמינו בודדות. כך ראינו את מבנה האתר הפעיל. אך בתצוגה זו קשה מאוד להבחין במבנים השניוניים של החלבון, לכן בחרנו בתצוגת ה-cartoon המציגה מבנים שניוניים. ראינו שבחלבון קיימים שלושה סוגים של מבנים שניוניים - סליל אלפא, משטח בטא וכן לולאות וסיבובים המקשרים בין מבנים אלו. ניתן להציג חלבון בדרך תצוגה נוספת שלא הזכרנו כאן, וניתן להתנסות בהן בסביבת העבודה. אך עלינו לזכור שאלו רק תצוגות שונות של המבנה, ואין זה אומר שכך נראה החלבון במציאות.

שאלה 16

שאלה זו סרם נענדה

ניקוד השאלה: 1.00

16. לפניכם 3 תצוגות שונות של אותו החלבון. איזו מבין התצוגות מציגה את מבנה החלבון כפי שהוא במציאות?



איור 12: תצוגות שונות של מבנה חלבון



אף אחת מהן לא מציגה את החלבון כפי שהוא במציאות. אנו לא יכולים לדעת כיצד נראה החלבון במציאות. התצוגות המופיעות כאן הם מודלים המבדילים את המאפיינים הכימיים שלו.

path: p

שאלה 17

שאלה זו טרם נענתה

ניקוד השאלה: 1.00

17. יש ברשותנו חלבון **אמב** שקיימת בו מוטציה בעמדה 5, ואתם חושדים שהמוטציה זו משפיעה על הפעילות באתר הפעיל. באיזו תצוגה תבחרו להציג את מבנה החלבון וכיצד תבדקו את השערתכם אם ידוע שהאתר הפעיל מצוי בעמדות 20, 25 ו-37?

פסקה

נבחר בתצוגת CARTOON שבה האזורים שבתל החלבון חשופים ניתן לראות שיניים. את חומצות האמינו הרלוונטיות נציג בתצוגת מקלות או קשרים ונצבע אותם כדי שניתן יהיה לראותם בבירור. לאחר מכן נבדוק היכן נמצאת חומצה אמינית 5 בהשוואה לשלושת חומצות האמינו האחרות. במידה וכן רחוקות זו מזו, כנראה שהמוטציה לא תשפיע על פעילות החלבון.

path: p

שאלה 18

שאלה זו טרם נענתה

ניקוד השאלה: 1.00

בסוף הפעילות התבוננו גם באתר הפעיל ובצורתו המרחבית והבנו ששלוש חומצות האמינו קרובות מאוד זו לזו במבנה המרחבי למרות שהן רחוקות זו מזו במבנה הראשוני (ברצף החלבון) של החלבון. למדנו שהאזורים מזרח תגובה כימית שבה הקשרים הכימיים במולקולת הסובסטרט משתנים, ונוצרת מולקולת תוצר בעלת טבעת מחומשת סגורה. בשל יצירת הטבעת מולקולת התוצר קצרה יותר ממולקולת הסובסטרט ומשנה זווית בתוך האתר הפעיל. בשל כך מולקולת התוצר מתנתקת מהאתר הפעיל ומשתחררת אל הסביבה המימית. לפעילות של האנזים נדרש מעבר של אלקטרונים, ולכן באתר הפעיל של חלבון IPNS קיים יון המתכת מסוג יון ברזל (Fe^{+2}) שמשמש כזרז.

18. סטודנט לביולוגיה הרתיח בטעות מבחנה ובה תמיסת חלבון. הסטודנט גילה שלאחר ההרתחה פסקה פעילות החלבון. הסטודנט משער שההרתחה השפיעה על מבנה החלבון. אילו מן המבנים הבאים הושפעו מהחימום? המבנה הראשוני, השניוני או השלישוני של החלבון? נמקו את תשובתכם.

פסקה

המבנים שהושפעו הם המבנים השניוניים והשלישוניים. המבנה הראשוני נוצר כתוצאה מקשרים פפטידיים שהם קשרים קוולנטים שינם משפיעים מההרתחה. לעומת זאת, מבנים שניוניים נוצרים מקשרי מימן בשרשרת הפוליפפטידית ואילו מבנה שחשוני משפיע מקשרים בין שירים צדדיים או עם מולקולות המים - הקשרים הללו הם קשרי מימן, קשרי I.D., או קשרים יוניים והם קשרים חלשים שההרתחה מספיק אנרגיה לפירוקם ולכן החלבון יעבור דנטורציה.

path: p

מידע

מבוא

מגוון יצורים חיים מורכבים או פשוטים, מבעלי חיים וצמחים ועד חיידקים, מותאמים לסביבתם באופן פיזיולוגי, התנהגותי וגם מותאמים ברמה המולקולרית. דוגמה להתאמה פיזיולוגית היא רקמת שומן עבה המקנה בידוד תרמי ואילו דוגמה להתאמה התנהגותית היא פעילות לילית באזורי מחיה חמים.

שאלה 1

תשובה נשמרה

ניקוד השאלה: 1.00

1. ציינו דוגמה להתאמה ברמה המולקולרית של יצורים חיים לסביבתם.

פסקה

התאמות ברמה המולקולרית/ביוכימית הן יצור חומרים שהמבנה שלהם מאפשר תפקוד תקין בסביבה. לדוגמה: הימצאותן של חומצות שומן בלתי רוויות בשכיות גבוהה בפוספוליפידים הבנים את קרחת התאים או הרכב נוקלאוטידים ב-DNA העושר בגואנין (G) וציטוזין (C) הגורם לסמפרטורת היתוך גבוהה של הרצף הדו-גדילי ועוד.

path: p

שאלה 2

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

2. אורגניזמים החיים בבתי גידול שהטמפרטורה בהם נמוכה מאפס מעלות צלזיוס (0°C), חשופים לסכנת קיפאון

מהי הסכנה, ברמה התאית, הנשקפת לאורגניזם הנחשף לטמפרטורות נמוכות מאפס מעלות צלזיוס?

בחרו תשובה אחת:

☐ א. שבירת ה-DNA.

☒ ב. היווצרותם של גבישי קרח העלולים לגרום ליצירת נקבים בקרום התא. ✓ התשובה היא:
ב. היווצרותם של גבישי קרח בתאים עלולה להוביל ליצירת נקבים בקרום התא ולדליפת תוכן התא לסביבה.

☐ ג. נשימה תאית מוגברת ובזבז אנרגיה.

☐ ד. פירוק חלבונים מוגבר.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

מידע

אחת ההתאמות הביזימיות שיש לאורגניזמים החיים בסביבה קרה כל כך, היא ייצורם של חלבונים נוגדי קפאון (Anti Freezing Proteins, או בקיצור AFPs). זו משפחה של חלבונים אשר הודת למבנה הכימי והמרחבי שלהם, יש להם נטייה גבוהה לקשור על פני שטחם את גרעיני ההתגבשות של הקרח באופן המונע את תהליך התגבשות הקרח, וכך הם מגנים על התא מפני פגיעה. הימצאותן של מולקולות גדולות המונעות את התגבשות הקרח - כדוגמת חלבונים נוגדי קפאון או מולקולות קטנות המעלות את ריכוז המומסים ועל ידי כך מורידות את טמפרטורת הקפאון - הן דוגמאות להתאמות ברמה המולקולרית למחיה בסביבה שהטמפרטורות בה נמוכות.

פעמון המבנה המרחבי של חלבונים נוגדי קפאון עשוי לסייע בהבנת תפקודם של חלבונים אלו. החוקרים הצליחו עד כה לקבוע את רצף החומצות האמיניות של חלבונים נוגדי קפאון מעטים בלבד. נמצא שחלבוני AFPs הם ארוכים מאוד ומכילים הן חומצות אמיניות הידרופיליות והן חומצות אמיניות הידרופוביות.

עם זאת עדיין לא ברור מהו המבנה המרחבי של חלבוני ה-AFPs, וכיצד מבנה זה קשור לתפקודם בעינב תהליך ההתגבשות של הקרח.

צוות חוקרים מאוניברסיטת קווינס בקנדה העלה את שאלות המחקר הבאות:

1. מהו המבנה המרחבי של חלבונים נוגדי קפאון (AFPs), וכיצד המבנה מיוצב?
2. אילו חומצות אמיניות בחלבון חיוניות לקישור מולקולות הקרח, וכיצד הן מונעות את התגבשות הקרח?

כדי לענות על שאלות המחקר, על החוקרים לקבוע תחילה באמצעות ניסויים את המבנה המרחבי של חלבוני AFPs. תחילה הם גידלו חיידקים בשם *Marinomonas primoryensis* שמקורם בקוטב, והפיקו מהם את החלבונים נוגדי הקפאון MpAFP. החוקרים יצרו גביש המורכב מהרבה מולקולות של MpAFP וקבעו את המבנה המרחבי של החלבון בשיטה הנקראת פיזור קרני רנטגן (X-ray diffraction). הממצאים, כמו כל מבני החלבונים שנקבעו עד היום, מרכזים במאגר מידע הנקרא RCSB-Protein Data Bank או בראשי תיבות PDB-RCSB.

בשלב הבא על החוקרים לנתח את המבנה המרחבי ולהתייחס לרמות השונות של מבנה החלבון, החל מרצף החומצות האמיניות, דרך מבנים שניוניים, ועד למבנה התלת-ממדי וקישור למולקולות נוספות, ביניהן קרח. כך יוכלו ללמוד על הקשר שבין רצף החלבון, מבנהו ותפקודו.

מידע

תיאור המשימה (Jmol)

לפני ניתוח המבנה של ה-MpAFP, עלינו לפתוח תחילה את הקובץ שבו מאוחסנים פרטי המבנה של החלבון, ולהציג את המבנה. לשם כך נשתמש בכלי להצגת מבנים תלת-מדיים של מולקולות, הקרוי Jmol. כלי זה יסייע לנו לענות על שאלות המחקר וללמוד על הקשר שבין רצף החלבון MpAFP, מבנהו המרחבי ותפקודו כנוגד קפאון.

שלבי המשימה

1. באמצעות הכלי Jmol נלמד על המבנה המרחבי של החלבון נוגד הקפאון MpAFP, נתבונן בו מזוויות שונות ונאפיין את המבנים השניוניים במבנהו המרחבי.
2. נתמקד בתת-יחידה אחת של החלבון ונחקור לעומק אילו מרכיבים בה קושרים מולקולות אחרות כגון יוני סידן ומים, וכיצד קשרים אלה תורמים לייצוב המבנה המרחבי ולתפקוד החלבון.

ראשי ◀ שנה"ל תשע"ו ◀ ביולוגיה - בתי הספר - תשע"ו ◀ חלבונים 1 - תשע"ו ◀ "חלבונים נוגדי קפאון" ◀
חלבונים נוגדי קפאון, גרסת Jmol ◀ תצוגה מקדימה

מידע

משימה 1: המבנה המרחבי של חלבונים נוגדי קפאון

צעדים ראשוניים

החלבון MpAFP הוא חלבון גדול במיוחד. במחקר מוקדם נמצא שאזור אחד של החלבון, המכונה אזור 4 (IV) ואורך כל תת יחידה ב היא 322 חומצות אמיניות, הוא זה המקנה לחלבון את יכולתו להיקשר אל גרעיני ההתגבשות של הקרח. על כן התמקדו החוקרים רק בחלק זה של החלבון וקבעו באופן ניסוי את מבנהו.

המידע אודות מבנה החלבון מצוי בקובץ בשם 3p4g.pdb. סיומת הקובץ "pdb". מעידה שזהו קובץ מבנה של מולקולה.

כדי לראות את המידע המילולי בקובץ, ניתן לפתוח אותו בפורמט ".pdf". נתבונן בקובץ שנפתח ונגלול מטה עד לשורות המתחילות ב-"ATOM 1" (דוגמה מוצגת במסך 1). האותיות והמספרים שמצגים מייצגים את סוג האטום, את שיוכו לחומצה אמינית מסוימת ואת מיקומו במרחב התלת-ממדי, ומכך ניתן ליצור מודל של המבנה המרחבי של אזור 4 בחלבון MpAFP.

```
SITE 1 GC3 6 GLY D 255 GLY D 257 ASP D 259 GLY D 273
SITE 2 GC3 6 GLU D 275 ASP D 278
SITE 1 GC4 6 ASN D 274 GLY D 276 ASP D 278 GLU D 304
SITE 2 GC4 6 HOH D 702 HOH D1625
CRYST1 57.500 70.780 84.250 99.06 92.30 97.47 P 1 4
ORIGX1 1.000000 0.000000 0.000000 0.000000
ORIGX2 0.000000 1.000000 0.000000 0.000000
ORIGX3 0.000000 0.000000 1.000000 0.000000
SCALE1 0.017391 0.002280 0.001088 0.000000
SCALE2 0.000000 0.014249 0.002372 0.000000
SCALE3 0.000000 0.000000 0.012042 0.000000
ATOM 1 N HIS A 23 -1.722 -44.981 5.610 1.00 23.29 N
ANISOU 1 N HIS A 23 3256 3037 2557 -225 441 -268 N
ATOM 2 CA HIS A 23 -2.984 -44.294 5.456 1.00 23.55 C
ANISOU 2 CA HIS A 23 3260 3049 2641 -225 500 -292 C
ATOM 3 C HIS A 23 -4.031 -45.365 5.155 1.00 21.96 C
ANISOU 3 C HIS A 23 3048 2845 2450 -229 527 -252 C
ATOM 4 O HIS A 23 -3.908 -46.082 4.155 1.00 20.85 O
ANISOU 4 O HIS A 23 2888 2692 2341 -219 497 -211 O
ATOM 5 CB HIS A 23 -2.923 -43.277 4.299 1.00 22.94 C
ANISOU 5 CB HIS A 23 3138 2934 2645 -205 492 -307 C
ATOM 6 CG HIS A 23 -2.027 -42.090 4.548 1.00 26.32 C
ANISOU 6 CG HIS A 23 3575 3354 3073 -209 482 -355 C
ATOM 7 MD1 HIS A 23 -0.652 -42.164 4.488 1.00 27.30 N
ANISOU 7 MD1 HIS A 23 3709 3490 3172 -217 429 -358 N
ATOM 8 CD2 HIS A 23 -2.318 -40.788 4.788 1.00 29.42 C
ANISOU 8 CD2 HIS A 23 3963 3723 3490 -208 520 -407 C
ATOM 9 CE1 HIS A 23 -0.132 -40.971 4.722 1.00 30.09 C
ANISOU 9 CE1 HIS A 23 4065 3833 3535 -227 438 -412 C
ATOM 10 ME2 HIS A 23 -1.123 -40.118 4.908 1.00 32.55 N
ANISOU 10 ME2 HIS A 23 4373 4119 3877 -223 495 -441 N
```

מסך 1: קובץ המבנה המרחבי מורכב ממספרים המציינים את מיקומו של כל אטום במרחב התלת-ממדי.

כפי שניתן לראות, המידע בקובץ אינו קל להבנה, וקשה ללמוד ממנו על המבנה המרחבי של החלבון. כדי להתבונן במבנה המרחבי, עלינו להשתמש בתוכנה מיוחדת הידועת לפענח את הנתונים בקובץ המבנה ולהמיר את המספרים והאותיות לצורה מרחבית.

שאלה 3

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

3. מטרתו של הכלי Jmol היא:

בחר תשובה אחת:

- ☐ א. לקבוע את המבנה התלת-ממדי של חלבון.
- ☐ ב. לחפש באופן יעיל קובצי מבנה חלבון במאגר מידע.
- ☒ ג. להציג מודל תלת-ממדי של מבנה חלבון. ✓ התשובה היא: ג. הכלי Jmol משמש להצגת מודלים מבניים תלת-ממדיים של מולקולות כגון: חלבונים, חומצות גרעין, גבישי מלח, תרכובות כימיות או כל מולקולה שיש לה קובץ מבנה במאגר מידע של מבנים של חלבונים.
- ☐ ד. להשוות בין רצפי חלבונים.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

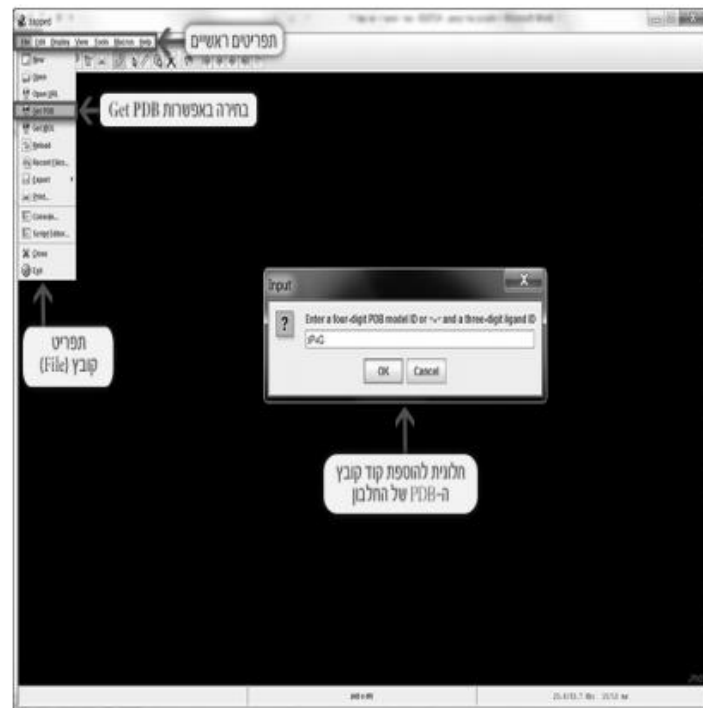
תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

נחזור לתיקית Jmol ונמצא קובץ הנקרא Jmol.jar. זהו קובץ בעל צלמית של ספל . נלחץ על קובץ זה, וסביבת העבודה Jmol תיפתח.

כעת נפתח את קובץ המבנה 3p4g.pdb של אזור 4 בחלבון MpAFP באמצעות הכלי Jmol:
File -> Get PDB -> 3p4g.pdb

204



מסך 3: פתיחת קובץ המבנה 3p4g.pdf של אזור 4 בחלבון MpAFP.

ראשי ◀ שנה"ל תשע"ו ◀ ביולוגיה - בתי הספר - תשע"ו ◀ חלבונים 1 - תשע"ו ◀ "חלבונים נוגדי קפאון" ◀
חלבונים נוגדי קפאון, גרסת Jmol ◀ תצוגה מקדימה

מידע

משימה 1: המבנה המרחבי של חלבונים נוגדי קפאון

תצוגת ברירת המחדל של המבנה נקראת תצוגת אטומים "Ball and stick". בתצוגה זו ניתן לזהות את האטומים השונים (הכדורים) במולקולה לפי צבעם ואת הקשרים הקוולנטיים (המקלות) בין האטומים השונים. גלילה והשתהות על פני אטום מסוים יציגו את סוג האטום, את מספרו, מידע בשאלה אם הוא חלק מחומצה אמינית מסוימת או ממולקולת מים וכו'.

שאלה 4

תקין

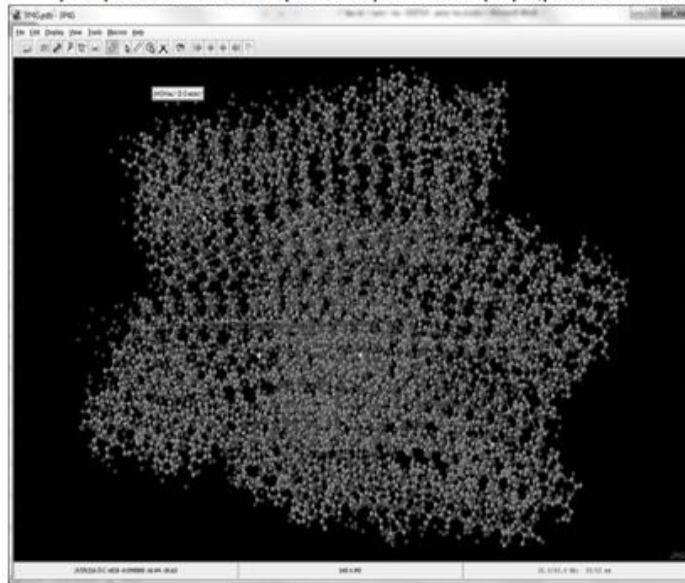
1.00 נקודות

מתוך 1.00

4. בתצוגת מבנה החלבון ישנן גם מולקולות מים. כיצד הן מתוארות?

בחרו תשובה אחת:

- ☐ א. כדורים כחולים המייצגים את אטומי החמצן של מולקולות המים.
- ☐ ב. כדורים כחולים המחוברים לכדורים אפורים או כדורים כחולים במקלות.
- ☒ ג. כדורים אדומים המייצגים את אטומי החמצן המרכיבים את מולקולות המים.
 התשובה היא: ג. בתצוגת ברירת המחדל (מסך 2) אטומי החמצן מסומנים ככדורים אדומים, אטומי חנקן מסומנים ככדורים כחולים ואטומי פחמן מסומנים ככדורים אפורים. אף על פי שמולקולות מים בנויות משני אטומי מימן ומאטום חמצן אחד, הרי שבתצוגה זו לא מופיעים כלל אטומי מימן, כך שמולקולות המים מיוצגות על ידי אטומי חמצן בלבד. מולקולות המים אינן חלק מהמבנה של החלבון, והן מקיפות אותו. ניתן לזהות אותן באמצעות העמדת הסמן עליהן.



מסך 2: מודל של מבנה החלבון MpAFP בתצוגת כדורים ומקלות (Ball and stick).

- ☐ ד. כדורים אדומים המחוברים לכדורים אפורים או כדורים כחולים במקלות.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

כדי לחקור את המבנה של החלבון, עלינו להתבונן בו מזוויות שונות; לצפות באזורים מסוימים בחלבון ועל פי הצורך לקבוע את שיעור ההגדלה של תצוגת החלבון. נזיז את מבנה החלבון נגד הקיפאון לפי ההוראות הבאות:

1. מלחץ על **המקש שמאלי** של העכבר ונזיז אותו ימינה ושמאלה. כעת המבנה מסתובב על ציר האנכי. לחיצה על המקש השמאלי בעכבר והזזה מעלה-מטה תסובב את המבנה על ציר האופקי. באופן דומה נוכל לסובב ולהזיז את במבנה בזוויות שונות.
2. מלחץ על **גלגלת העכבר** ונגלול אותה למעלה ולמטה - פעולה זו תקרב (Zoom in) ותרחיק (Zoom out) את החלבון. ניתן להשתמש גם בתפריט כדי להרחיק/לקרב את החלבון. מלחץ על מקש ימני בעכבר ונבחר **Zoom -> 200%**. נחזיר את תצוגת החלבון למצב שבו ניתן לראות את כולו.
3. לשם הנוחות ניתן גם להעתיק את המבנה ממקום אחד לאחר במסך באמצעות לחיצה בזמנית על **המקשים Ctrl ו-Alt**, ואז ללחץ על **מקש שמאלי בעכבר** ולהזיזו.

פונקציה	טיב הזזת החלבון
לחיצה על מקש שמאלי בעכבר + הזזה ימינה ושמאלה	סיבוב החלבון על ציר Y
לחיצה על מקש שמאלי בעכבר + הזזה למעלה ולמטה	סיבוב החלבון על ציר X
לחיצה על מקש Shift + לחיצה על מקש שמאלי בעכבר והזזה ימינה ושמאלה (הזזה מעלה ומטה תגרם לקירוב והרחקה)	סיבוב החלבון על ציר Z
גלילה מעלה ומטה באמצעות גלגלת העכבר	הרחקה/קירוב (Zoom Out/Zoom In)
Zoom → תפריט	
לחיצה על מקשי Alt + Ctrl ולחיצה על מקש שמאלי בעכבר והזזתו	העתקת החלבון מנקודה אחת לנקודה אחרת במסך

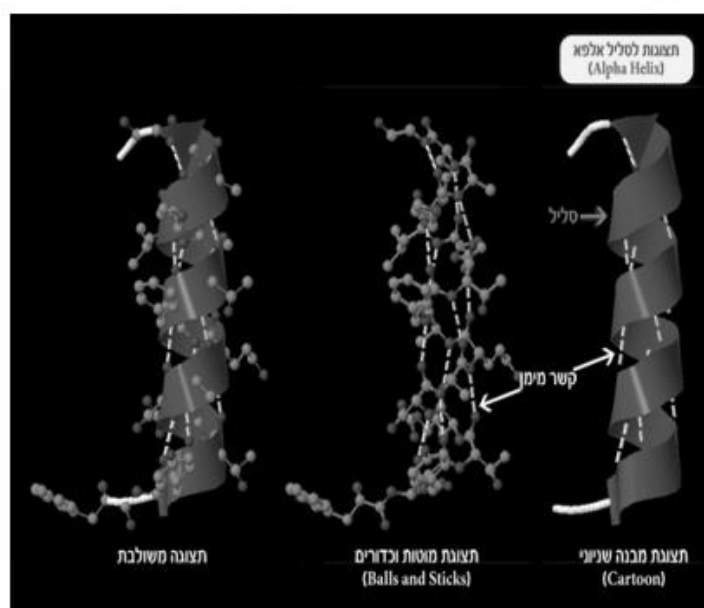
טבלה 1 : סיכום האפשרויות להזזת החלבון

משימה 1: המבנה המרחבי של חלבונים נוגדי קיפאון

הכרת המבנים השניוניים

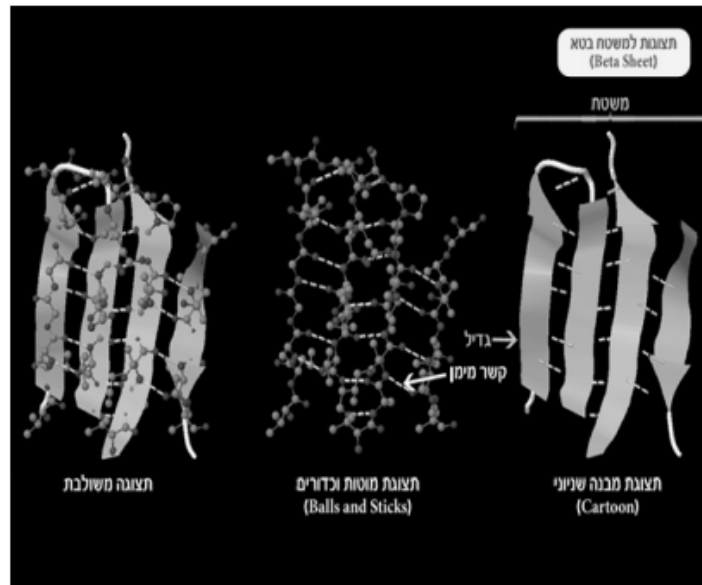
באמצעות הכלי Jmol ניתן להציג מולקולות במגוון דרכי תצוגה, כל דרך תצוגה ממחישה היבט אחר במבנה. כך לדוגמה, ניתן להציג מודל של שלד השרשרת הפפטידית, של המבנים השניוניים, של האטומים, של הקשרים ביניהם ועוד. כאמור, תצוגת ברירת המחדל נקראת "כדורים ומוטות" (Ball and stick), והיא מציגה את האטומים והקשרים ביניהם. עם זאת תצוגה זו אינה מאפשרת ללמוד על המבנים השניוניים הקיימים בחלבון. קיימים שלושה סוגים של מבנים שניוניים עיקריים, ואלה הם:

סליל אלפא (alpha helix) - כשמו - כן הוא: מבנה סלילי כדוגמת קפיץ (מסך 3). הצורה הסלילית נוצרת בזכות קשרי מימן מחזוריים הנוצרים בין חומצות אמיניות בשרשרת הפוליפפטידית (חלבון).



מסך 3: סליל אלפא וקשרי המימן (קו מקווקו בצבע לבן) שנוצרים בין אטום חמצן או אטום חנקן לבין אטומי מימן

משטח בטא (beta sheet) - מבנה דמוי משטח הנוצר כתוצאה מקשרי מימן בין מקטעים מקבילים של השרשרת הפוליפפטידית (מסך 4). כל מקטע במשטח בטא נקרא גדיל (strand).



מסך 4: משטח בטא וקשרי המימן (קו מקווקוו בצבע לבן) שנוצרים בין אטום חמצן או אטום חנקן לבין אטומי מימן



סיבוב המחבר בין סליל אלפא ומשטח בטא

לולאה (loop) וסיבוב (Turn) - מבנים אלו משנים את כיוון השרשרת הפוליפטידית. הם גם עשויים להוות אזור קישור בין סלילי אלפא ובין משטחי הבטא.

לכל מבנה שניוני יש צורה אופיינית במודל, וכדי להבחין בהם ביתר קלות הכלי Jmol צובע (באופן מלאכותי כמובן) כל מבנה שניוני בצבע ייחודי: סלילי אלפא מופיעים כסלילים בצבע ורוד, משטחי בטא מופיעים כחץ משוטח בצבע צהוב, והאזורים המחברים ביניהם מסומנים כלולאות ובסיסובים הצבועים בצבע לבן. כדי להציג את המבנים השניוניים, יש לבחור בתצוגה הנקראת Cartoon.

מלחץ על המקש הימני של העכבר לקבלת תפריט לאפשרויות נוספות, ובבחר: **Style -> Cartoon**.

שאלה 5

תקין

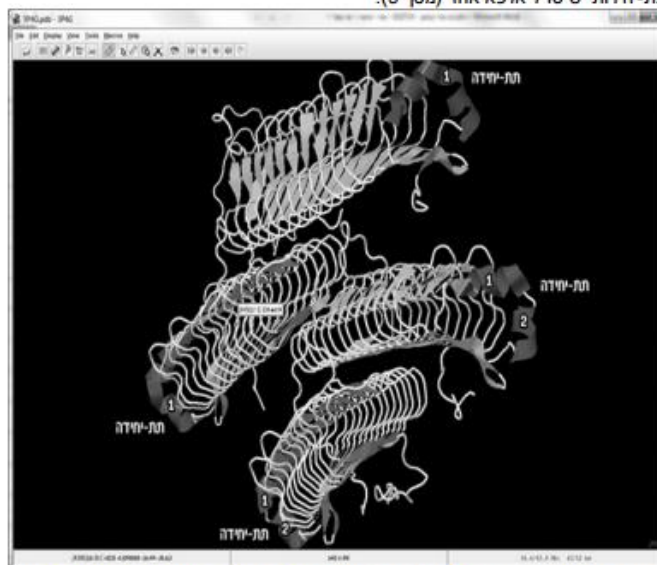
1.00 נקודות

מתוך 1.00

5. נסתכל בתצוגה המתקבלת. מכמה תת-יחידות בנוי החלבון? וכמה סלילי אלפא יש בכל יחידה?

בחר תשובה אחת:

- ☐ א. החלבון בנוי מתת-יחידה אחת ובה 4 סלילי אלפא.
 - ☐ ב. החלבון בנוי מ-2 תת-יחידות, שבכל אחת מהן יש 6 סלילי אלפא.
 - ☒ ג. החלבון בנוי מ-4 תת-יחידות. בשתיים מהן יש 2 סלילי אלפא, ובשתיים - סליל אלפא יחיד.
- ✓
התשובה היא: ג. ניתן להבחין ב-4 תת-יחידות. בשתי תת-יחידות יש שני סלילי אלפא, ובשתי תת-יחידות יש סליל אלפא אחד (מסך 5).



מסך 5: תצוגת ה-Cartoon מאפשרת לזהות בקלות את תת-יחידות במבנה החלבון וכן את המבנים השניוניים (סלילי אלפא ומשטחי בטא).

- ☐ ד. חלבון בנוי מ-4 תת-יחידות, שאין בהן כלל סלילי אלפא.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

שאלה 6

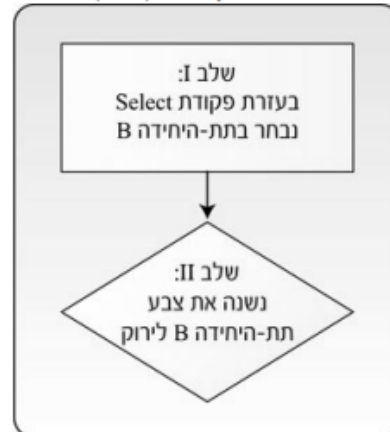
תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

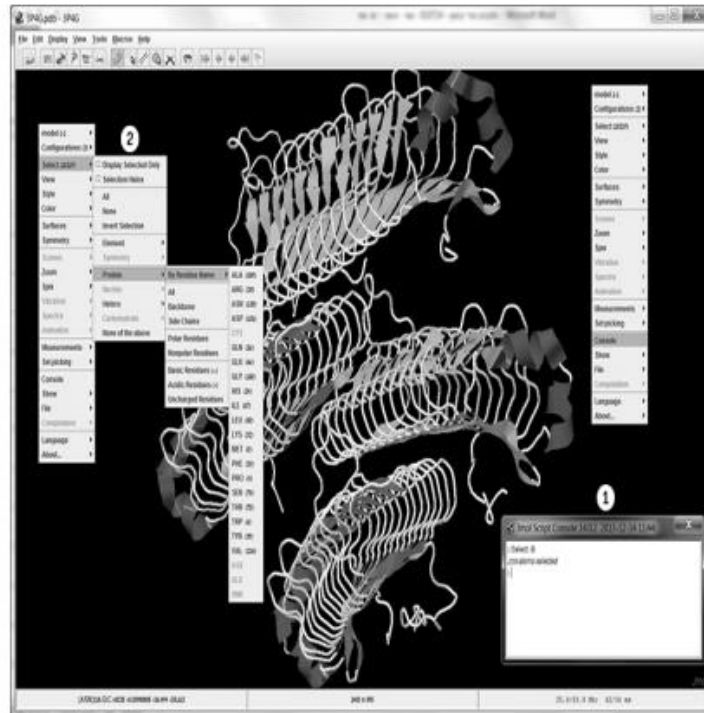
פקודת Select

הכלי מאפשר גם להציג בדרכים שונות מרכיבים במבנה, כמו האטומים והקשרים הכימיים ביניהם, וזאת באמצעות עיצוב הצבע, עיצוב הגודל, דרך ההצגה ועוד, ואפילו להסתיר אותם. כדי להבחין בין תת-היחידות במבנה שלפינו, נשנה את העיצוב של שתיים מבין ארבע תת-היחידות של החלבון: את תת-היחידה B נצבע בתמלת, ואילו בתת-היחידה C נציג את שטח פני קשרי הוואן-דר-ואלס. ביצוע כל פעולה מורכב משני שלבים: בשלב I בוחרים באמצעות הפקודה Select את החלק הרצוי שעליו מבצעים את הפעולה, ובשלב II מבצעים את הפעולה הרצויה של עיצוב החלק הנבחר (איור 1).



איור 1: ביצוע הפעולה מורכב משני שלבים. בשלב I בוחרים את החלק הרצוי שעליו מבצעים את הפעולה באמצעות הפקודה Select, ובשלב II מבצעים את הפעולה הרצויה.

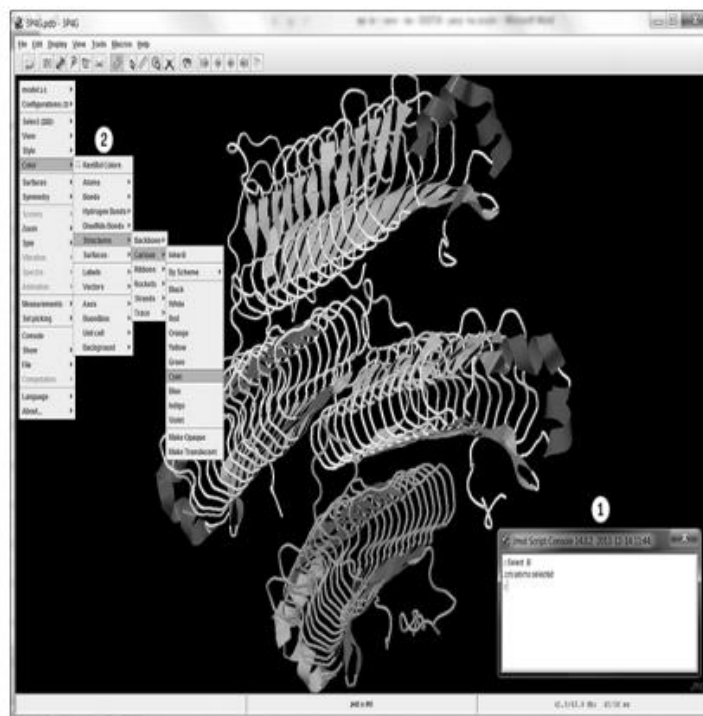
הפקודה Select מאפשרת לבחור את המרכיב או החלק במולקולה שעליו נבצע פעולה, כגון: חומצה אמינית מסוג מסוים (לדוגמה: פרולין, היסטידין ועוד), אטומים מסוג מסוים (לדוגמה: אטומי פחמן, חמצן ועוד), מולקולות מים, ליגנדים ועוד. לבחירה של מרכיבים קבועים במבנה, כגון אטומים מסוג מסוים, חומצות אמיניות מסוג מסוים או על פי מאפייניהן, ניתן להשתמש בפקודה Select בתפריט האפשרויות הנספות. לבחירה של תת-יחידה או חומצה אמינית בעמדה מסוימת, יש להשתמש בפקודה Select בלוח הבקרה Console (מסך 6).



מסך 6: הפקודה Select מאפשרת בחירה במרכיב מסוים במבנה דרך תפריט האפשרויות הנוספות (שמאל) ודרך לוח הבקרה (1) Console או לחלופין דרך תפריט File ובחירה לדוגמה בחומצה אמינית מסוג מסוים דרך (2) **Select -> Protein -> By Residue Name**.

לשם שינוי צבעה של תת-יחידה B, עלינו לפעול באופן הבא:

1. מלחץ על מקש ימני בעכבר בסביבת העבודה, ובתפריט האפשרויות הנוספות נבחר ב- Console.
2. בחלון לוח הבקרה, מיד לאחר הסימן \$, נקליד: **Select : B** (סימולה של תת-היחידה הנבחרת) ומלחץ **Enter**.
3. הכלי מציג לנו את מספר האטומים במרכיב הנבחר (במקרה זה: 2553 אטומים).
4. מלחץ על מקש ימני בעכבר בסביבת העבודה, ובתפריט האפשרויות הנוספות נבחר **Color -> Structure -> Cartoon -> Cyan**.
5. תת-יחידה B נצבעה בתכלת (מסך 7).



מסך 7: תצוגת Cartoon של MpAFP לאחר בחירה בתת-יחידה (1) וצביעתה בצבע תכלת (2).

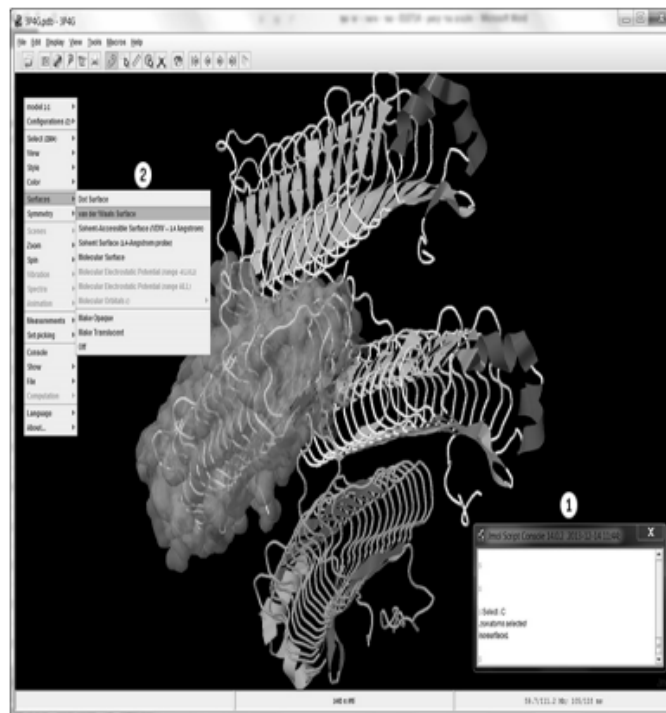
באופן דומה נבחר את תת-היחידה C ונציג את שטח פני קשרי הוואן-דר-ואלס של תת-יחידה זו.

6. איזה סדר פקודות יביא להצגת שטח הפנים של קשרי הוואן-דר-ואלס של תת-יחידה C בלבד?

בחרו תשובה אחת:

☐ א. נקיש ב-Console: C: Select בלבד.

☒ ב. נקיש ב-Console: C: Select ואח"כ בתפריט האפשרויות הנוספות נבחר **Surfaces -> van der Waals Surface**. ☒ התשובה היא: ב. כאמור, ראשית יש לבחור את המרכיב המבוקש במולקולה באמצעות פקודת Select. בשלב זה אין שינוי בתצוגת המבנה. ואח"כ נבצע את הפעולה המבוקשת, במקרה זה נבחר בתפריט האפשרויות הנוספות ב- **Surfaces -> van der Waals Surface** לשם הצגת שטח פני קשר הוואן-דר-ואלס (מסך 8).



מסך 8: תצוגת Cartoon של MpAFP לאחר בחירה וצביעת תת-היחידה B בצבע תכלת, ובחירה בתת-יחידה C (1) ושינוי התצוגה שלה כך ששטח פני קשרי הוואן-דר-ואלס מוצג (2).

ג. ראשית בתפריט האפשרויות הנספות נבחר **Surfaces -> van der Waals Surface**, ואח"כ נקיש ב-**Select :C**.

ד. בתפריט האפשרויות הנספות נבחר **Surfaces -> van der Waals Surface** בלבד.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

שאלה 7

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

אנו מציגים את שטח פני (Surface) של תת-יחידה C של החלבון.

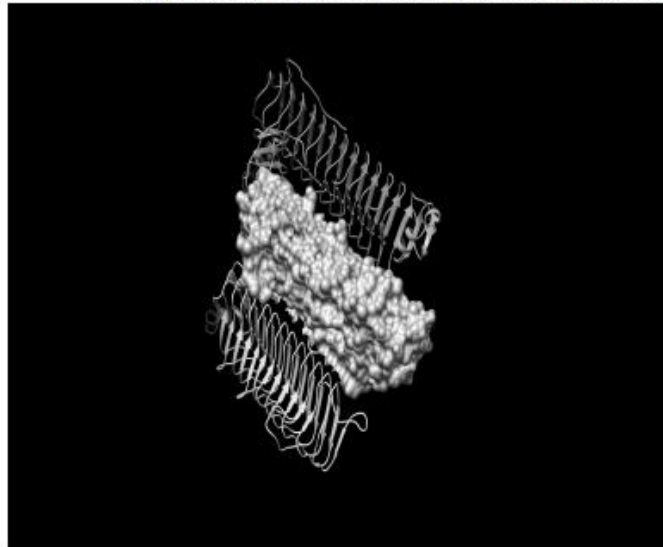
הקבוצות הכימיות הנמצאות על פני שטח הפנים של החלבון יוצרות סוגים שונים של קשרים כימיים חלשים כגון קשרי ואן דר-ואלס וקשרי מימן עם מולקולות המקיפות אותם.

7. נענה על השאלה הבאה:

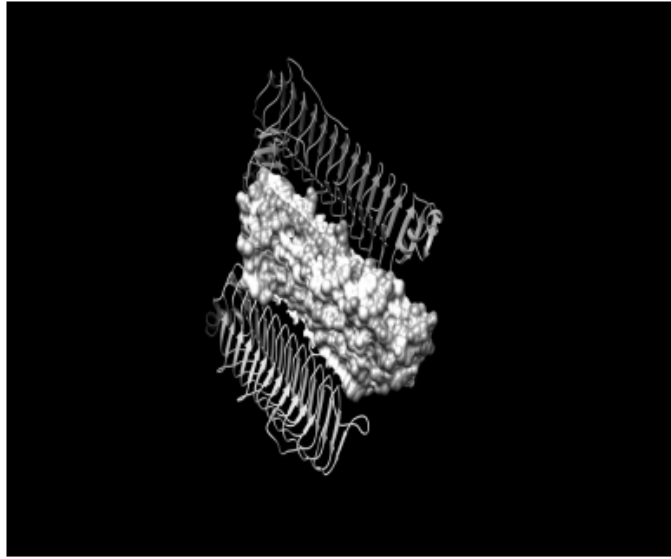
הוספת שטח הפנים של החלבון בצבע חום אחיד...

בחרו תשובה אחת:

- ☐ א. מאפשרת לזהות את שטח המגע החיצוני של החלבון עם מולקולות אחרות ואת סוגי כוחות המשיכה החשמליים של החלבון בחלק החיצוני שלו.
 - ☐ ב. מאפשרת לזהות את סוגי כוחות המשיכה החשמליים של החלבון בחלק החיצוני שלו אך לא את שטח המגע החיצוני של החלבון עם מולקולות אחרות.
 - ☒ ג. מאפשרת לזהות את שטח המגע החיצוני של החלבון עם מולקולות אחרות אך לא את סוגי כוחות המשיכה החשמליים של החלבון בחלק החיצוני שלו. ✓
- התשובה היא: ג. כאמור, הצגת שטח פני החלבון המתואר כאן מתואר באופן זה כדי להראות את האזורים המפעילים כוחות חשמליים על מולקולות המצויות בסביבתו. יחד עם זאת לא ניתן לדעת האם הקבוצות על שטח הפנים הינם הידרופיליות או הידרופוביות כל עוד לא נצבעו שטח הפנים בצבעים המתארים משיכה חשמלית הידרופובית או הידרופילית.



מסך: תצוגת Cartoon של MpAFP לאחר בחירה וצביעת תת-יחידה B בצבע תכלת, ושינוי התצוגה של שטח הפנים של יחידה C והצגת קשרי הוואן-דר-ואלס.



מסך: הצגת סוגי המשיכה החשמלית מאזורים הידרופיליים המיוצגים בצבע סגול ועד לאזורים הידרופוביים המיוצגים בצבע חום בהיר.

ד.מאפשרת לראות באופן ברור את המבנים העיקריים במבנה השניוני.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

מידע

משימה 1: המבנה המרחבי של חלבונים נוגדי קפאון

התמקדות והתעמקות במבנה של תת-יחידה אחת בחלבון MpAFP

החוקרים מצאו שהחלבון בנוי מ-4 תת-יחידות שלכל אחת מהן מבנה מרחבי דמוי צינור, העשוי ממשטחי בטא המחוברים באמצעות לולאות.

על מנת ללמוד את מבנה האזור המתפקד כנוגד קפאון, נתמקד בתת-יחידה A. כדי להציג את תת-יחידה A בלבד, עלינו להעלים את שאר תת-היחידות, ולכן נפעל באופן הבא:

1. מלחץ על מקש ימני בעכבר בסביבת העבודה, ובתפריט האפשרויות הנוספות נבחר ב-
Console.

2. בחלון לוח הבקרה, מיד לאחר הסימן \$, נקליד: B,;C,;D Select ונלחץ Enter.

3. הכלי מציג לנו את מספר האטומים במרכיב הנבחר (במקרה זה 7689 אטומים).

4. מלחץ על מקש ימני בעכבר בסביבת העבודה ונבחר - **Style -> Structure**.

Off > (הבחירה "Off" משמשת ל"כיבוי" ולהסתרת המרכיב הנבחר).

5. שלוש תת-היחידות שנבחרו אינן מוצגות, ומוצגת רק תת-יחידה A וק שטח הפנים של תת-יחידה C.

שאלה 8

תקין

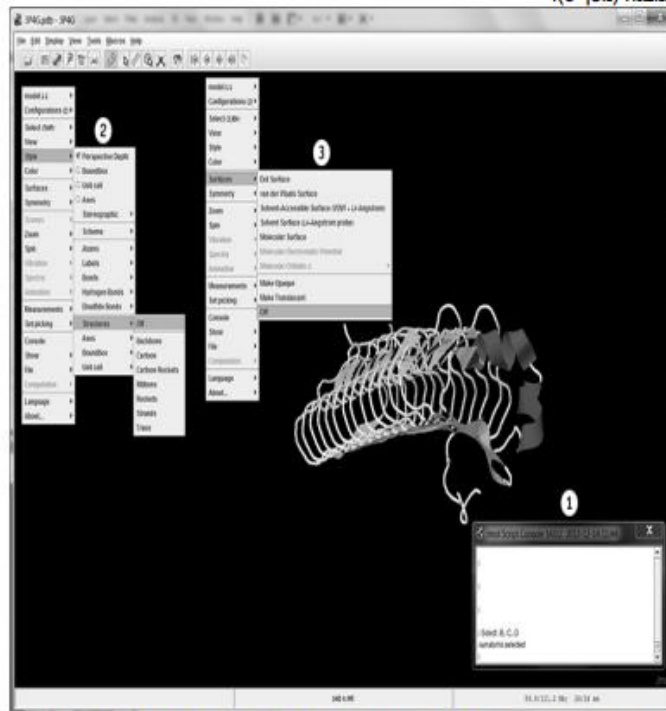
1.00 נקודות

מתוך 1.00

8. כיצד לדעתכם מכל להסיר מן התצוגה את שטח הפנים של תת-יחידה C?

בחרו תשובה אחת:

- Ⓐ. קודם נבחר בתת-יחידה C באמצעות הפקודה C: Select בחלון ה-Console, ואז בתפריט האפשרויות המסופות נבחר **Surfaces -> van der Waals Surface**.
- Ⓑ. בתפריט האפשרויות המסופות נבחר **Surfaces -> van der Waals Surface**, ואז נבצע את הפקודה על תת-יחידה C באמצעות הפקודה C: Select בחלון ה-Console.
- Ⓒ. נסתיר את כל שטח הפנים באמצעות **Surfaces -> Off**. התשובה היא: ג. אין צורך לבחור בתת-יחידה מסוימת, אלא ניתן פשוט להסתיר את שטח הפנים של כל תת-היחידות במבנה (מסך 9).



מסך 9: תצוגת Cartoon של תת-יחידה A בלבד של החלבון MpAFP, וזאת לאחר בחירה ב-3 תת-היחידות האחרות (1), הסתרת המבנה שלהן (2) והסתרת תצוגת שטח הפנים (3).

- Ⓓ. נבחר בתת-יחידה C באמצעות הפקודה C: Select בחלון ה-Console, ואז בתפריט האפשרויות המסופות נסתיר את האטומים של תת-יחידה זו באמצעות הפקודה **Style -> Atoms -> Off**.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

שאלה 9

תקין

נקודות 0.67

מתוך 1.00

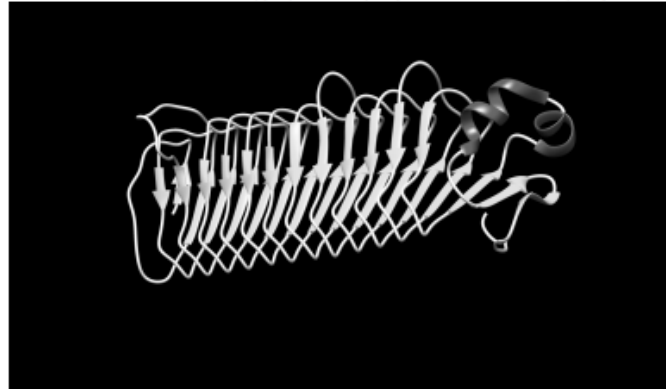
תת-יחידות החלבון MpAFP אמורות להיות במגע עם מולקולות המים, ולמנוע את התגבשותן לכדי חלקיקי קרח.

9. האם בתצורת תצוגה זו (Cartoon, מבנה שניוני) מוצגות מולקולות המים?

בחר תשובה אחת:

☐ א. כן

☒ ב. לא ✓ התשובה היא: ב. לא. מולקולות המים שסומנו כעיגול אדום בתצוגת Ball and Stick אינן חלק מתצוגת Cartoon ולכן אינן מופיעות (מסך).



מסך: תצוגת Cartoon של תת-יחידה A של החלבון MpAFP

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00. כאשר משקללים ניסיונות מענה קודמים, מתקבל 0.67/1.00.

מידע

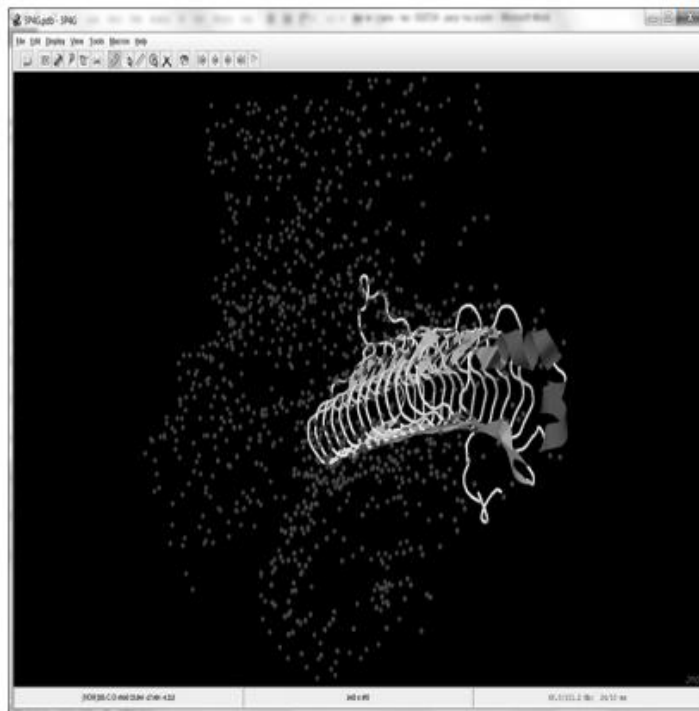
כדי שמולקולות המים תופענה במודל המוצג, נלחץ על מקש ימני בעכבר, ובתפריט האפשרויות הנספות נבחר:

Select -> Hetero-> All water לבחירה בכל מולקולות המים:

לקביעת נפח מולקולות המים, כך שיוצגו באופן ברור: **Style -> Atoms-> 25% van der Waals**

לשינוי צבע מולקולות המים לאדום: **Color -> Atoms -> Red**

כעת מולקולות המים מוצגות בצבע אדום, ואלו תת-יחידה A מוצגת בתצוגת מבנה שניוני (מסך 10).



מסך 10: תצוגת Cartoon של תת-יחידה A של החלבון MpAFP עם כל מולקולות המים במבנה (אטום החמצן בכל מולקולות מים מוצג ככדור אדום).

שאלה 10

תשובה נשמרה

ניקוד השאלה: 1.00

10. סביר להניח שמולקולות המים שנמצאות בתצוגה זו קשורות אל החלבון בקשרי מימן. כיצד ניתן להסביר מכחות של מולקולות מים המרוחקות מתת-היחידה A המוצגת?

פסקה

מולקולות המים קשורות (בקשרי מימן) לתת היחידות B,C ו-D שהושתרו בתצוגה זו.

path: p

שאלה 11

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

בפקודה הראשונה נבחרו כלל מולקולות המים במבנה: אלו הקשורות לתת-יחידה A והמצויות בקרבתה, ואלו הקשורות לשאר תת-היחידות (B, C, D) והמחזקות יותר מתת-יחידה A. כדי להציג רק את תת-יחידה A ואת מולקולות המים הקשורות אליה, עלינו למחוק שוב את שאר תת-היחידות, ואז תמחקנה גם מולקולות המים הקשורות אליהן.

11. מהו סדר הפקודות שיש לבצע כדי להציג רק את תת-יחידה A ואת מולקולות המים הקשורות אליה?

בחרו תשובה אחת:

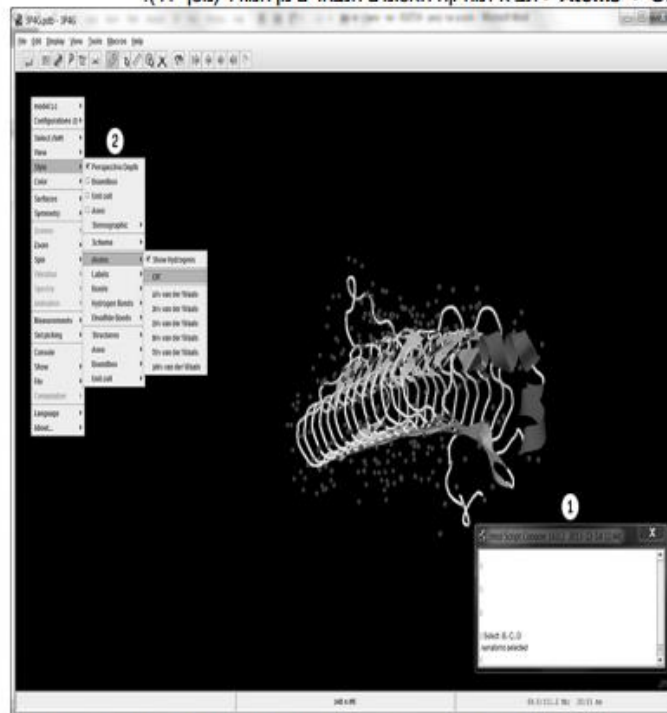
א. בחלון לוח הבקרה (Console) נקיש "Select :B:C:D" ולאחר מכן בתפריט האפשרויות הנספות נבחר **Style -> Atoms -> Off**.

ב. בחלון לוח הבקרה (Console) נקיש "Select :A" ולאחר מכן בתפריט האפשרויות הנספות נבחר **Style -> Atoms -> Off**.

ג. נלחץ על המקש הימני בעכבר ובתפריט האפשרויות הנספות נבחר **Select->Hetero -> All water**, ואח"כ נבחר **Style-> Atoms -> Off**.

ד. בחלון לוח הבקרה (Console) נקיש "Select :B,C,D" ולאחר מכן בתפריט האפשרויות הנספות נבחר **Style -> Atoms -> Off**. ✓

התשובה היא: ד. בחירה בתת-יחידות B, C ו-D ובמולקולות המים הקשורות אליהן תיעשה באמצעות הפקודה "Select :B,C,D" בחלון לוח הבקרה (Console). הפקודה **Style -> Atoms -> Off** תביא למחיקה האטומים הנבחרים מן המודל (מסך 11).



מסך 11: תצוגת Cartoon של תת-יחידה A של החלבון MpAFP עם מולקולות המים

הקשורות לתת-יחידה זו בלבד, וזאת לאחר בחירה ב-3 תת-היחידות האחרות (1)
והסתרת האטומים של תת-היחידות הללו (2).

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

שאלה 12

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

12. נבצע את סדר הפקודות הנכון כפי שנכתב בתשובה לשאלה הקודמת, ונענה על השאלה הבאה:

היכן ממוקמות מולקולות המים ביחס לתת היחידה A של החלבון AFP?

בחר תשובה אחת:

☒ א. רק על פני שטח הפנים החיצוני של תת היחידה A. ☒ התשובה היא: א. בשטח הפנים החיצוני של תת היחידה A בלבד.

☐ ב. בשטח הפנים החיצוני של תת היחידה A וגם בליבת תת היחידה.

☐ ג. בעיקר בליבת תת היחידה A אך גם בשטח הפנים החיצוני של תת היחידה.

☐ ד. בליבת תת היחידה A.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

מידע

לאחר שהצלחנו להציג את תת-יחידה A ואת מולקולות המים הקשורות אליה בלבד, נכל לחקור לעומק אילו מרכיבים בתת-היחידה קושרים את מולקולות המים וכן מולקולות אחרות, וכיצד קשרים אלה תורמים לייצוב המבנה המרחבי ולתפקוד החלבון כמונע התגבשות קרח.

ראשי ◀ שנה"ל תשע"ו ◀ ביולוגיה - בתי הספר - תשע"ו ◀ חלבונים 1 - תשע"ו ◀ "חלבונים נוגדי קפאון" ◀
חלבונים נוגדי קפאון, גרסת Jmol ◀ תצוגה מקדימה

מידע

משימה 2: ניתוח מבנה תת-יחידה A של החלבון MpAFP

זיהוי אזורי קישור ליוני סידן

יוני סידן קיימים בסביבת היצור החי, וחשיבותם רבה בתהליכים שונים בתא. החוקרים מצאו שיוני הסידן חיוניים לייצוב מבנה החלבון MpAFP ולתפקודו כמנוע קיפאון של מים.

שאלה 13

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

13. לאיזו רמת ארגון של קיפול החלבון MpAFP משתייכים יוני הסידן?

בחרו תשובה אחת:

- ☐ א. מבנה ראשוני - "מבנה קווי" הנבע מרצף החומצות האמיניות בשרשרת ומהקשרים הפפטידיים ביניהן.
- ☐ ב. מבנה שניוני - מבנה שבו נוצרים קשרי מימן בין חומצות אמיניות מסוימות הגורמים ליצירת אחת משתי צורות עיקריות: סליל אלפא או משטח בטא (ובניהן לולאות וסיבבים).
- ☐ ג. מבנה שלישוני - מבנה המעניק לחלבון את יכולתו לפעול ונוצר בשל מגוון קשרים (אינטראקציות הידרופוביות, אינטראקציות יוניות, קשרי מימן, גשרים די-סולפידיים (S-S) וכו').
- ☒ ד. יוני סידן אינם חלק מן ממבנה החלבון. ✓ התשובה הנכונה היא: ד. ליוני הסידן תפקיד חשוב בייצוב המבנה של החלבון, אך אין הם מהווים חלק מהחלבון עצמו. בנוסף לייצוב המבני שיוני הסידן מספקים, נמצא גם שבטכוחתם החלבון פעיל כנוגד קיפאון ומונע את התגבשות הקרח, ואובדנם או שחרורם של יוני הסידן מהחלבון יגרם לאובדן הפעילות.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

מבחינה מדעית חשוב למצוא היכן ממוקמים יוני הסידן ביחס לכל תת-יחידה ואלו אזורים בחלבון קושרים את יוני הסידן. כדי לסמן באופן ברור את יוני הסידן, נבצע את הפעולות הבאות:

1. לבחירת יוני הסידן (סמל היסוד הוא Ca) הקשורים לתת-יחידה A בלבד, נפתח את לוח הבקרה באמצעות לחיצה על מקש ימני בעכבר ובחירה ב-Console בתפריט האפשרויות הנספות, ובחלון לוח הבקרה, מיד לאחר הסימן \$, נקליד: **Select Ca:A** ונלחץ **Enter** (שלוש-עשרה אטומים נבחרו).

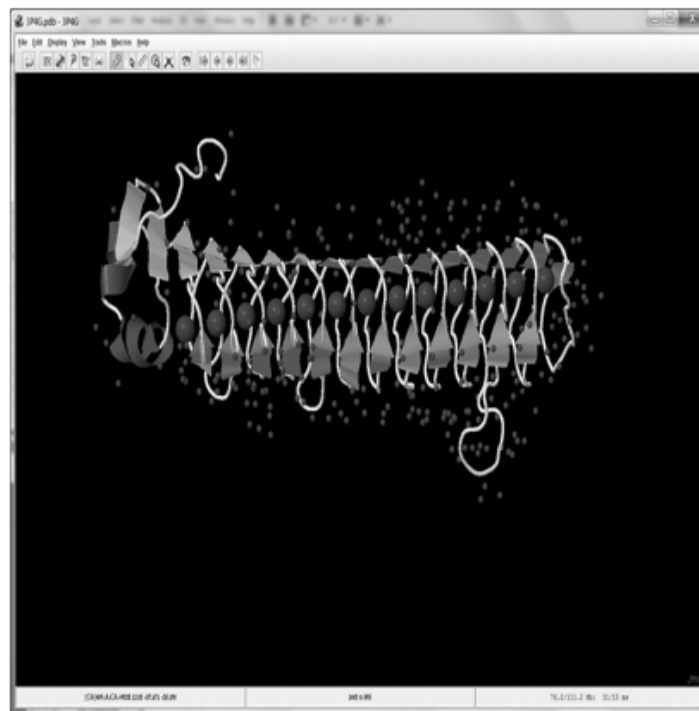
2. להגדלת נפח יוני הסידן, נלחץ על מקש ימני בעכבר בסביבת העבודה ונבחר:

Style -> Atoms -> 75% van der Waals

3. לשינוי צבע יוני הסידן לירוק, נלחץ על מקש ימני בעכבר בסביבת העבודה ונבחר:

Color -> Atoms -> Green

כעת ניתן להבחין ביוני הסידן בתור קלות. ניתן לראות את יוני הסידן ממוקמים בין הלולאות (מסך 12). בשלב זה כדאי לסובב את המבנה כדי לזהות את המיקום היחסי של יוני הסידן ביחס ללולאות.



מסך 12: תצוגת Cartoon של תת-יחידה A של החלבון MpAFP יחד עם יוני סידן המסומנים בצבע ירוק.

כדי ללמוד עוד על הרצף המאפיין את הלולאות באזור הקושר את יוני הסידן, נסתיר את מולקולות המים במודל מבנה החלבון. לשם כך נבחר במולקולות המים (בתפריט האפשרויות הנספות נבחר:

(Select -> Hetero -> All water

ואז נסתיר אותן (בתפריט האפשרויות הנספות נבחר: **(Style -> Atoms -> Off**).

ראשי ◀ שנה"ל תשע"ו ◀ ביולוגיה - בתי הספר - תשע"ו ◀ חלבונים 1 - תשע"ו ◀ "חלבונים נגדי קפאון" ◀
חלבונים נגדי קפאון, גרסת Jmol ◀ תצוגה מקדימה

מידע

משימה 2: ניתוח מבנה תת-יחידה A של החלבון MpAFP

חשיבות יוני הסידן בייצוב המבנה של החלבון

במבנה הללאה החוזרי המאפיין את תת-היחידה A יש מוטיב של 19 חומצות אמיניות שהרצף שלו הוא זה: $\text{GGxGxGxGGxGNDxGxGxG}$, וכל אות מייצגת חומצה אמינית מסוימת או קבוצה של חומצות אמיניות:

G = גליצין - חומצה אמינית הידרופובית;

T = תראונין - חומצה אמינית הידרופילית;

N = אספרגין - חומצה אמינית הידרופילית;

D = אספרטט - חומצה אמינית הידרופילית;

u = חומצה אמינית הידרופובית (ואלין, לאוצין או איזולאוצין).

x = חומצה אמינית כלשהי, לחב הידרופילית.

המוטיב בני כך ש-10 חומצות האמיניות הראשונות (GGxGNDxGxGxG) ממוקמות מול 9 החומצות האמיניות האחרונות (GGxGxGxG).

שאלה 14

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

14. איזה חלק במוטיב ניתן לצפות שייקשר למולקולות המים בגביש הקרח?

בחרו תשובה אחת:

☐ א. הרצף GGxGNDxGxGxG כי יש בו יותר חומצות אמיניות הידרופוביות.

☐ ב. הרצף GGxGxGxG כי יש בו יותר חומצות אמיניות הידרופיליות.

☒ ג. הרצף GGxGNDxGxGxG כי יש בו יותר חומצות אמיניות הידרופיליות. ✓ התשובה היא:

ג. ברצף GGxGNDxGxGxG יש בעיקר חומצות אמיניות הידרופיליות: T, N, D, x - המהוות 60% מן החומצות האמיניות ברצף, והן אלו היכולות לקשור את מולקולות המים בגביש הקרח. לעומת זאת, שיעור החומצות האמיניות ההידרופוביות ברצף GGxGxGxG הוא 44% בלבד.

☐ ד. אף לא אחד מהרצפים, כי בשניהם אין חומצות אמיניות הידרופיליות כלל.

הגשת שאלה

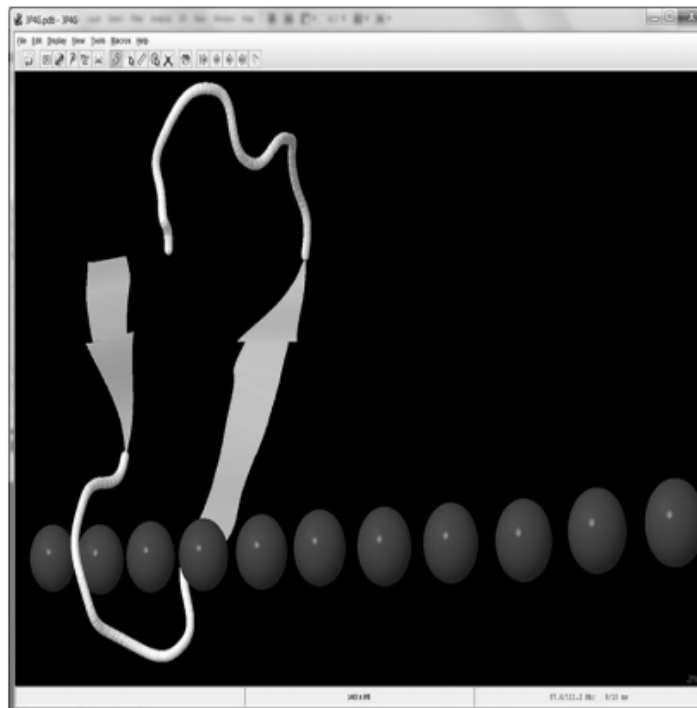
תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

נתמקד עתה ביחידה אחת במבנה דמוי טבעת הבנוי משתי לולאות ומשני מקטעים של מעטפת קפלים של משטח בטא. דוגמא ליחידה כזו היא היחידה המורכבת מהחומצות האמיניות בעמדות 95-77. בשלב ראשון נציג רק את החומצות האלו על ידי הסתרת שאר החומצות האמיניות. נפעל באופן הבא:

1. לבחירת החומצות האמיניות בעמדות 76-1 בתת-יחידה A, נפתח את לוח הבקרה באמצעות לחיצה על מקש ימני בעכבר ובחירה ב-Console בתפריט האפשרויות הנספות, ובחלון לוח הבקרה, מיד לאחר הסימן \$, נקליד: A:1-76 Select ונלחץ Enter (שלוש מאות תשעים ושניים אטומים נבחרו).
2. להסתרת החלק במבנה שיוצרות חומצות אמיניות אלה, נלחץ על מקש ימני בעכבר בסביבת העבודה ונבחר: **Style -> Structure -> Off**. נשים לב שאמנם קשה להבחין בשינוי, אך כעת החומצות האמיניות בעמדות 76-1 לא מוצגות במודל!
3. באופן דומה נבחר את החומצות האמיניות בעמדות 96-495 בתת-יחידה A (באמצעות הפקודה A:495-96 Select במסך ה-Console) ונסתיר גם אותן (נבחר - **Style -> Structure -> Off** בתפריט האפשרויות הנספות).
4. כעת מוצג לפנינו החלק הרלוונטי בלבד בתת-יחידה A (מסך 13).



מסך 13: תצוגת Cartoon של יחידה אחת בעלת מבנה דמוי טבעת בתת-יחידה A של החלבון MpAFP. בתצוגה זו יוני הסיידן מסומנים בצבע ירוק.

בשלב הבא ננסה לסמן במודל המבנה את החומצות האמיניות שעל פי תכונותיהן הביזימיות (כלומר, ההידרופיליות) אם משערים כי הן מעורבות בקישור יוני הסיידן ובכך תורמות לפעילות נגדת הקיפאון.

ראשי ◀ שנה"ל תשע"ו ◀ ביולוגיה - בתי הספר - תשע"ו ◀ חלבונים 1 - תשע"ו ◀ "חלבונים נוגדי קפאון" ◀
 חלבונים נוגדי קפאון, גרסת Jmol ◀ תצוגה מקדימה

מידע

משימה 2: ניתוח מבנה תת-יחידה A של החלבון MpAFP

החומצות האמיניות הקושרות יוני סידן

כעת ננסה לסמן במודל המבנה את החומצות האמיניות שעל פי תכונותיהן הביזימיניות (כלומר, ההידרופיליות) אנו משערים כי הן מעורבות בקישור יוני הסידן ובכך תורמות לפעילות נוגדת הקפאון. באופן טבעי נתמקד בחומצה האמינית אספרטט (סימנה D, נקראת גם חומצה אספרטית) בעמדה 84, שהיא בעלת מטען שלילי. נציג גם את החומצה האמינית הסמוכה לה, גלוטמין (סימנה Q) בעמדה 85, שהיא פולרית חסרת מטען. נפעל באופן הבא:

1. לבחירת החומצה האמינית אספרטט בעמדה 84 בתת-יחידה A, נפתח את לוח הבקרה באמצעות לחיצה על מקש ימני בעכבר ובחירה ב-Console בתפריט האפשרויות הנספות; בחלון לוח הבקרה, מיד לאחר הסימן \$, נקליד: 84:A:Select ונלחץ Enter.
2. נצבע את החומצה האמינית הנבחרת בצבע תכלת: **Color -> Atoms -> Cyan**.
3. באופן דומה נבחר בחומצה האמינית גלוטמין בעמדה 85 בתת-יחידה A ונצבע אותה בסגול (Violet).

שאלה 15

תקין

0.33 נקודות
 מתוך 1.00

15. החומצה האמינית אספרטט בעמדה 84 היא חלק מן המבנה השניוני הזה:

בחרו תשובה אחת:

- ☐ א. סליל אלפא.
- ☐ ב. משטח (מעטפת קפלים) בטא.
- ☒ ג. לולאה. ✓ התשובה היא: ג. לולאה, כיוון שבה מופיע הסימון בצבע תכלת.
- ☐ ד. איננה חלק משום מבנה שניוני

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00. כאשר משקללים ניסיונות מענה קודמים, מתקבל 0.33/1.00.

שאלה 16

תקין

1.00 נקודות

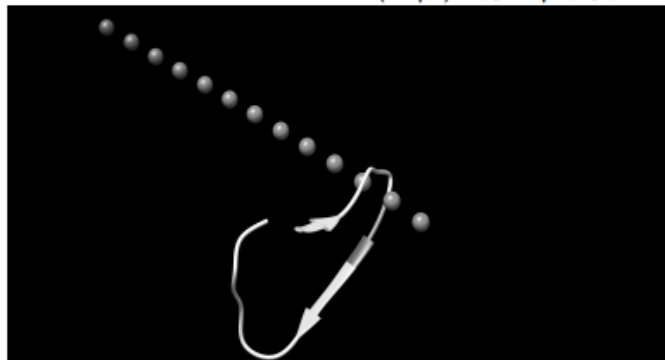
מתוך 1.00

16. החומצה האמינית גלוטמין בעמדה 85 היא חלק מן המבנה השניוני הזה:

בחרו תשובה אחת:

☐ א. סליל אלפא.

☒ ב. משטח (מעטפת קפלים) בטא. ☐ התשובה היא: ב. משטח (מעטפת קפלים) בטא, כיוון שבה מופיע הסימון בצבע סגול (מסך 14).



מסך 14: תצוגת Cartoon של יחידה אחת בעלת מבנה דמוי טבעת בתת-יחידה A של החלבון MpAFP. בתצוגה זו יוני הסיידן מסומנים בצבע ירוק, חומצה אמינית אספרטט בעמדה 84 מסומנת בצבע תכלת וחומצה אמינית גלוטמין בעמדה 85 מסומנת בצבע סגול.

☐ ג. לולאה.

☐ ד. איננה חלק משום מבנה שניוני.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

מידע

כדי לזהות אם אחת מבין שתי החומצות האמיניות הללו קושרת את יוני הסיידן, נציג את השיירים הצדדיים שלהם באמצעות תצוגת קשרים (Bonds). נפעל באופן הבא:

1. לבחירת החומצות האמיניות בעמדות 84-85 בתת-יחידה A, נפתח את לוח הבקרה באמצעות לחיצה על מקש ימני בעכבר ובחירה ב-Console בתפריט האפשרויות הנספות, ובחלון לוח הבקרה, מיד לאחר הסימן \$, נקליד: Select 84-85:A ונלחץ Enter.
2. להצגת הקשרים שהן יוצרות: **Style -> Bonds -> 0.30Å**. פקודה זו מציגה את רחב הקשרים הכימיים (Bonds) בהפרדה של 0.3Å (אנגסטרם) היא יחידת מידה לאורך השווה ל- 10^{-10} מטר, זהה שווה למאית המיליונית של סנטימטר. אין משמעות הדבר שגודל האטומים או הקשרים במולקולה השתנו, אלא רק התצוגה שלהם, וכך נכל לראות את הקשרים הכימיים בבירור.

שאלה 17

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

17. איזו מבין החומצות האמיניות הללו קושרת את יוני הסיידן?

בחרו תשובה אחת:

☐ א. שתיין - הן החומצה האמינית אספרטט (עמדה 84) והן החומצה האמינית גלוטמין (עמדה 85).

☒ ב. חומצה אמינית אספרטט. ✓ התשובה היא: ב. ניתן לראות (מסך 15) כי השייר הצדדי של החומצה האמינית אספרטט מופנה כלפי יון הסיידן. לעומת זאת השייר הצדדי של גלוטמין איננו מופנה כלפי יון הסיידן. הדבר מעיד כי ככל הנראה אספרטט היא זו הקושרת את יוני הסיידן.



מסך 15: תצוגת Cartoon של יחידה אחת בעלת מבנה דמוי טבעת בתת-יחידה A של החלבון MpAFP. בתצוגה זו יוני הסיידן מסומנים בצבע ירוק, חומצה אמינית אספרטט בעמדה 84 מסומנת בצבע תכלת וחומצה אמינית גלוטמין בעמדה 85 מסומנת בצבע סגול, וכן נבחרו שתי חומצות אמינו אלו והוצגו הקבוצות הצדדיות שלהן והקשרים השונים שהן יוצרות.

☐ ג. חומצה אמינית גלוטמין.

☐ ד. אף לא אחת מן החומצות האמיניות הללו אינה קושרת את יון הסיידן, אלא חומצות אמיניות אחרות.

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

מידע

בנסף לחומצה האמינית אספרטט בעמדה 84, גם לחומצה האמינית גליצין (סימנה G) הנמצאת בעמדות 80 ו-82 (וגם לחומצות נוספות במוטיב) יש חשיבות לקישור של יון הסידן לחלבון. כך שנוכחותו במיקום זה תתרחם לייצוב מבנה החלבון. הדבר נכון עבור כל אחת מ-13 היחידות בעלות מבנה דמוי טבעת בתת-יחידה A וגם בשאר תת-היחידות. ייצוב מבנה החלבון על ידי יוני הסידן מאפשר היווצרות של מעין משטח שאליו נקשרות מולקולות מים, דרך קשרי מימן ליצירת משטח דמוי קרח, שבו מולקולות המים פרושות זו לצד זו. כך נמנעת התגבשותן של מולקולות המים לכדי גרעיני גיבוש גדולים של הקרח. כך החלבון מגן מפני יצירת קרח העלול להוביל לשבירה והרס של קרומי התאים.

מידע

סיכום מחקר

החלבון נוגד הקפאון MpAFP בנוי מארבע תת-יחידות בעלות מבנה דמוי צינור. כל תת-יחידה בנויה מ-13 מבנים חוזריים דמוי טבעת שבהם מוטיבים של 19 חומצות אמיניות. כאשר מאפיינים טבעת מבנית, הרי שהיא מכילה חומצות אמיניות הידרופיליות וגם הידרופוביות היוצרות את הקשר עם המים בגרעיני ההתגבשות של הקרח ומונעות את גדילתו. חומצות אלו יוצרות גם קשר עם יוני סידן המצויים בין כל שתי לולאות ועוזרים לייצוב המבנה והתפקוד של החלבון. יוני הסידן יוצרים את הקיפול המתאים של XGTGND, כך שבין גליצין בעמדה 82 בחלבון לבין החומצה האמינית אספרטית בעמדה 84 נוצר מרחוח המתאים במדויק לקשירת גביש קרח.

שאלה 18

תקין

1.00 נקודות

מתוך 1.00

18. בחלבוני נוגדי קפאון ישנם מספר מאפיינים מבניים המונעים יצירת גבישי קרח משמעותיים

בתא. קבעו את סדר השלבים שבסופם נמנעת יצירת גבישי הקרח הללו:

- שלב 1: יוני סידן מייצבים מבנה דמוי טבעת . ✓
- שלב 2: קבוצות קוטביות במבנה הטבעתי קושרות מולקולות מים . ✓
- שלב 3: נוצר מבנה דמוי משטח קרח בו מולקולות המים פרושות זו לצד זו . ✓
- שלב 4: התגבשות מולקולות המים לכדי גרעיני גיבוש משמעותיים נמנעת . ✓

הגשת שאלה

תשובתך נכונה.

בחרת באופן נכון 4

תקין

ניקוד עבור הגשה זו: 1.00/1.00.

שאלה 19

ניקוד השאלה: 1.00

(ב) חלבוניס רבים שנקבע המבנה שלהם מוללים יונים המשמשים כקופקטורים. ציין חלבון אחד שאליו קשור יון מסוים וקבע מהי פעילות של הion בחלבון זה.

path: p

נספח 4: שאלוני ידע ותפיסות תלמידים

שאלוני הידע ממוספרים כ-I ו-II ושאלון ותפיסות תלמידים ממוספר כ-III.

I שאלון

מספר מזהה: _____

ב"ס: _____

מקצוע/ות בחירה בנוסף לביטכנולוגיה: _____ .



ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר אך מכוונות הן לבנים והן לבנות.

צייר מולקולה של חלבון במסגרת המצורפת. הוסף מידע מילולי בסמוך לציור על מנת להקל על הבנת המאפיינים המבניים של החלבון המופיעים בציור. השתדל להתייחס בכל הרצינות למשימה זו ובטא ככל הניתן את הידע שלך על מולקולות של חלבונים באמצעות הציור.

שאלון II



מספר מזהה: _____

בי"ס: _____

מקצוע/ות בחירה בנוסף לביוטכנולוגיה: _____

ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר אך מכוונות הן לבנים והן לבנות.

ענה בפירוט על השאלות הבאות:

1. סמן את סוג הקשר אשר תורם ליצירת מבנה ראשוני

- א. קשר יוני
- ב. משיכה חשמלית הידרופובית/קשרי ואן-דר-וואלס.
- ג. קשר פפטידי
- ד. קשר מימן
- ה. קשר דיסולפידי (קשר S-S).

נמק בחירתך: הקשר הפפטידי אשר מחבר בין שתי חומצות אמינו הוא הגורם לחיבור שרשרת של חומצות אמינו, המגדיר את המבנה הראשוני.

2. סמן את סוג הקשר אשר תורם ליצירת מבנה שניוני

- א. קשר יוני
- ב. משיכה חשמלית הידרופובית/קשרי ואן-דר-וואלס.
- ג. קשר פפטידי
- ד. קשר מימן
- ה. קשר דיסולפידי (קשר S-S).

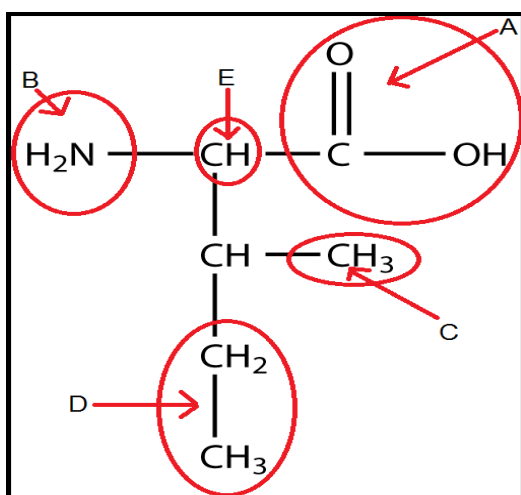
נמק בחירתך: גם סליל אלפא וגם מעטפת קפלים ביטא הם מבנים מחזוריים הנובעים מקשרי מימן המתקיימים בין קבוצות הנמצאות על שלד השרשרת הפוליפפטידית (ולא על קבוצות ה-R).

3. סמן את סוגי הקשרים אשר תורמים ליצירת מבנה שלישוני:

- א. קשר יוני
- ב. משיכה חשמלית הידרופובית/קשרי ואן-דר-וואלס.
- ג. קשר פפטידי
- ד. קשר מימן
- ה. קשר דיסולפידי (קשר S-S).

נמק בחירתך: כל הקשרים הללו מתקיימים בין קבוצות ה-R, וגורמים ליצירת התקפלות החלבון למבנה פקעתי או סיבי.

4. נתונה נוסחת מבנה של החומצה האמינית איזולאוצין (Ile, I). אילו קבוצות במולקולה משתתפות ביצירת הקשר הפפטידי?



א. קבוצה A

ב. קבוצה B

ג. קבוצה C

ד. קבוצה D

ה. קבוצה E

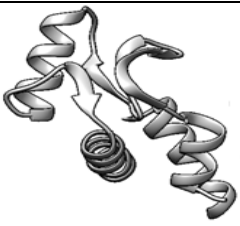
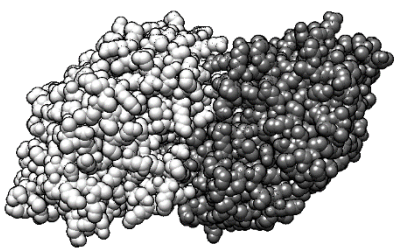
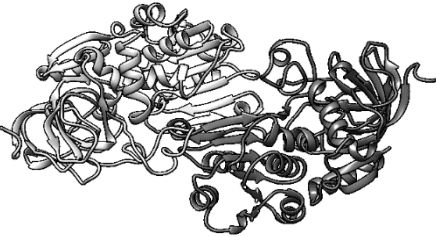
5. לפיך 5 נוסחאות מבנה של חמש

חומצות אמיניות אשר מסומנות מ- A ועד E. סמן בטבלה האם החומצה האמינית

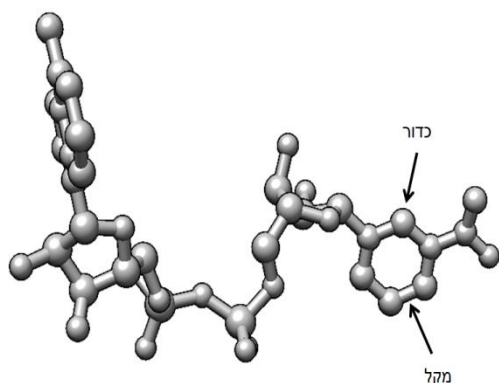
קוטבית (Polar), או חומצה אמינית לא קוטבית (Non-Polar).

חומצה אמינית	A	B	C	D	E
נוסחת מבנה	$\begin{array}{c} \text{COOH} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{CH} \\ / \quad \backslash \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{COOH} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{C}-\text{H} \\ \\ (\text{CH}_2)_3 \\ \\ \text{HN}-\text{C}=\text{NH} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{COOH} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{C}-\text{H} \\ \quad \backslash \\ \text{CH}_2 \quad \text{CH}_2 \\ \quad \\ \text{CH}_2-\text{CH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{COOH} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{COOH} \\ \\ \text{H}_2\text{N}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{OH} \end{array}$
מקום לרישום: קוטבי/לא קוטבי	לא קוטבי	קוטבי	לא קוטבי	קוטבי	קוטבי
נמק בחירתך	כל הקבוצות בקבוצת R יוצרות קשרי ו.ד.ו בלבד	קבוצות אמיניות בקבוצת R יוצרות קשרי מימן ובערכי pH מסוימים גם קשרים יוניים	כל הקבוצות בקבוצת R יוצרות קשרי ו.ד.ו בלבד	קבוצת קרבוקסיל בקבוצת R יוצרת קשרי מימן ובערכי pH מסוימים גם קשרים יוניים	קבוצת הידרוקסיל יוצרת קשרי מימן

6. לפניך ייצוגים מבניים של חלבונים, או ייצוגים של חלקים ממבנה החלבון. קבע מהו המבנה שניתן לזהות בצורות הייצוג. רשום נימוק במקום המתאים בטבלה. שים לב: ייתכן יותר ממבנה אחד המופיע בייצוג המבני הנתון.

מספור	ייצוג מבני	מבנה: ראשוני, שניוני, שלישוני, רביעוני
ייצוג 1	<pre> 1 MNIFEMLRIDEGRLKIYKDTGGYTTIGIGHLLTKSPSLNAAKSELDKA I 50 51 GRNCNGVITKDEAEKLFNQDQVDAAVRGILRNAKLKPVYDSDLAVRRCA I 100 101 NMVFQMGGETGVAGFTNSLRMLQQKRWDEAAVNLAKSRWYNQTPNRAKRV I 150 151 TTFRTGTWDAYKNL 164 </pre>	ראשוני מקום לנימוק: האותיות מייצגות חומצות אמינו, והמיקום שלהם מתאר את מיקום חומצות האמינו ברצף
ייצוג 2		שניוני שלישוני מקום לנימוק: ניתן לזהות סלילי אלפא, וכן התקפלות למבנה שלישוני
ייצוג 3		שלישוני רביעוני מקום לנימוק: המבנה הכדורי-אליפטי של המודל מלמד על המבנה השלישוני הצבע השונה מלמד על מבנה רביעוני של שתי תתי יחידות (הומודימר)
ייצוג 4		שניוני, שלישוני רביעוני מקום לנימוק: ניתן לזהות סלילי אלפא, וכן התקפלות למבנה שלישוני

7. אחת מצורות הייצוג של החלבון היא תצוגת כדורים ומקלות (Balls and sticks). לפניך תיאור מתוך תצוגת כדורים ומקלות.



מה מייצג כל אחד מהייצוגים?

כדור : **אטום**

מקל : **קשר קוולנטי**

8. ממה מורכב אתר פעיל בחלבון?

שיירים צדדיים של חומצות אמינו, קופקטור/ים.

9. מהי החשיבות של אתר פעיל בחלבון?

האתר הפעיל מאפשר קישור או מזרז תגובות ביוכימית ביצור החי או מחוצה לו ובכך גורם ליצור חי המייצר את החלבון לשגשג או לשרוד בסביבה מסוימת.

10. ישנה חומצה אמינית X הממוקמת באתר הפעיל של חלבון כלשהו. האם מוטציה אשר מובילה לשינוי של חומצה אמינית X לחומצה אמינית אחרת בחלבון זה, תגרום בהכרח לירידה בפעילותו? נמק תשובתך.

היא עלולה לגרום לירידה בפעילותו, אך לא בהכרח. היא גם עשויה לשפר את פעילותו או לא לשנות אותה. הנימוק הוא שהחלפת חומצות אמינו מאותו הסוג/סוג שונה לא לא תשפיע/תשפיע על פעילות האתר הפעיל בגלל מבנה חומצה האמינית והמשיכה החשמלית שלה שדומה או שונה לחומצה האמינית המקורית.



תודה רבה על שיתוף הפעולה!

שאלון III:

לתלמיד/ת הביוטכנולוגיה בכיתה י"ב שלום.

להלן שאלון העוסק בתרומת כלים ביואינפורמטיים ללמידה וכן בהיבטים הנוגעים לתוכנת Jmol שפגשת במסגרת הלימודים במגמת הביוטכנולוגיה.

השאלון אנונימי אך דורש רישום של תאריך לידה בשש ספרות וכן ציון שם בית הספר בו הנך לומד/ת.

כמו כן השאלות כתובות בלשון זכר אך מכוונות לשני המינים.

אודה מאוד אם תמלא/י בתשומת לב ובמחשבה שאלון משוב זה.

דעתך חשובה מאוד ותסייע לשיפור ההוראה באמצעות כלים ביואינפורמטיים כדוגמת Jmol בעתיד.

אוהד לבקוביץ

קבוצת הביולוגיה

המחלקה להוראת המדעים

מכון ויצמן למדע

רשום את תאריך הלידה שלך: _____.

ציין את שם בית הספר בו אתה לומד: _____.

מין: זכר / נקבה.

חלק א':

במהלך לימודיך במסגרת מגמת הביוטכנולוגיה למדת להפעיל מספר כלים ביואינפורמטיים: Jmol, BLAST, ORF-Finder, ENTREZ.

בסדרת השאלות הבאה תתבקש להביע עמדתך בנוגע לכלים אלו, באפשרותך לסמן יותר מבחירה אחת במידה ותידרש.

ה	ו	ז	ח	ט	השאלה	מספר שאלה
לא יודע	Jmol	ORF-Finder	BLAST	ENTREZ	מהו הכלי הביואינפורמטי שסיפק לך את רמת העניין הגבוהה ביותר? ניתן לסמן בחירה של יותר מכלי אחד.	1
לא יודע	Jmol	ORF-Finder	BLAST	ENTREZ	מהו הכלי הביואינפורמטי שהפעלתו הייתה המורכבת ביותר עבורך? ניתן לסמן בחירה של יותר מכלי אחד.	2
לא יודע	Jmol	ORF-Finder	BLAST	ENTREZ	מהו הכלי הביואינפורמטי שניתוח התוצאות המתקבלות מן השימוש בו היה המורכב ביותר עבורך? ניתן לסמן בחירה של יותר מכלי אחד.	3
לא יודע	Jmol	ORF-Finder	BLAST	ENTREZ	מהו הכלי הביואינפורמטי שמנקודת מבטך תרומתו היא הרבה ביותר למחקר בתחום הביוטכנולוגיה בהשוואה לכלים הביואינפורמטיים האחרים? ניתן לסמן בחירה של יותר מכלי אחד.	4
לא יודע	Jmol	ORF-Finder	BLAST	ENTREZ	מהו הכלי הביואינפורמטי שעזר לך במיוחד להבין את חומר הלימוד בפרק ההנדסה הגנטית? ניתן לסמן בחירה של יותר מכלי אחד.	5

חלק ב':

כאשר מבצעים משימות למידה הממוקדות בהצגת מבני חלבונים, מפעילים את תוכנת Jmol וגם מציגים את מבנה החלבון במסך התוכנה וכן ובתמונות המסך במשימת הלמידה. סמן בעיגול את התשובה בה אתה בוחר:

מספר שאלה	השאלה	א	ב	ג	ד
1	מהו המאפיין שגרם לי לרצות יותר ללמוד על חלבונים?	העובדה שהפעלתי Jmol	העובדה שמבנה חלבון הוצג בפניי	שניהם במידה שווה	אף לא אחד מהם
2	מהו המאפיין שגרם לי להבין יותר על חלבונים?	העובדה שהפעלתי Jmol	העובדה שמבנה חלבון הוצג בפניי	שניהם במידה שווה	אף לא אחד מהם
3	מהו המאפיין שסייע לי להבין את העיקרון שתצוגות שונות ¹ של חלבון מדגישות תכונות שונות של חלבון?	העובדה שהפעלתי Jmol	העובדה שמבנה חלבון הוצג בפניי	שניהם במידה שווה	אף לא אחד מהם
4	מהו המאפיין שגרם לי להנאה רבה יותר?	העובדה שהפעלתי Jmol	העובדה שמבנה חלבון הוצג בפניי	שניהם במידה שווה	אף לא אחד מהם
5	מהו המאפיין שסייע לי להבין את הקשר בין תצוגה של מולקולות לבין מבנה המולקולות בעולם הממשי?	העובדה שהפעלתי Jmol	העובדה שמבנה חלבון הוצג בפניי	שניהם במידה שווה	אף לא אחד מהם

¹ תצוגות שונות = לדוגמה תצוגת כדורים ומקלות או תצוגת מבנה שניוני

חלק ג':

סדרת ההיגדים הבאה עוסקת במשימות הלמידה שבהן הפעלת Jmol והצגת את מבנה החלבון בו התמקדה המשימה. אנא קרא בעיון כל אחד מההיגדים והבע את מידת הסכמתך באמצעות סימון במקום המתאים:

1-לא מסכים בכלל. 2-נוטה שלא להסכים. 3-נוטה להסכים. 4-מסכים לחלוטין.

<u>מספר היגד</u>	<u>ההיגד</u>	<u>1 לא מסכים בכלל</u>	<u>2 נוטה שלא להסכים</u>	<u>3 נוטה להסכים</u>	<u>4 מסכים לחלוטין</u>
<u>1</u>	בחירת חלק ממבנה החלבון באמצעות לוח הבקרה (Console) הצגתו וצביעתו, היא פעולה פשוטה עבורי כשאני מפעיל Jmol				
<u>2</u>	הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol לא מסייעת לי להבין מדוע היצור החי המבטא את החלבון מותאם לסביבתו הטבעית				
<u>3</u>	הבנתי את תמונות המסך שצולמו מתוך Jmol והופיעו במשימת הלמידה				
<u>4</u>	סיבוב, הקטנה והגדלה של תצוגת החלבון היא פעולה פשוטה עבורי כשאני מפעיל Jmol				
<u>5</u>	הבנתי את התוכן המדעי במשימות הלמידה				
<u>6</u>	הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין את פעילות החלבון ביצור החי				
<u>7</u>	שינוי תצוגת חלבון אחת לתצוגת חלבון אחרת היא פעולה פשוטה עבורי כשאני מפעיל Jmol				

<u>מספר היגד</u>	<u>ההיגד</u>	<u>1 לא מסכים בכלל</u>	<u>2 נוטה שלא להסכים</u>	<u>3 נוטה להסכים</u>	<u>4 מסכים לחלוטין</u>
<u>8</u>	לא הבנתי את התוכן המדעי במשימות הלמידה				
<u>9</u>	הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין את מאפייני המבנה השלישוני שלו				
<u>10</u>	הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol לא מסייעת לי להבין את פעילות החלבון ביצור החי				
<u>11</u>	הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין את מאפייני המבנה הראשוני שלו				
<u>12</u>	שליפת קובץ מבני של חלבון מתוך מאגר מידע של מבני חלבונים, היא פעולה פשוטה עבורי כשאני מפעיל Jmol				
<u>13</u>	בחירת חלק ממבנה החלבון באמצעות סרגל הכלים (ללא לוח הבקרה Console) הצגתו וצביעתו, היא פעולה פשוטה עבורי כשאני מפעיל Jmol				
<u>14</u>	הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol לא מסייעת לי להבין את מאפייני המבנה השניוני שלו				
<u>15</u>	הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין מדוע היצור החי המבטא את החלבון מותאם לסביבתו הטבעית				
<u>16</u>	אני מבין את ההנחיות להפעלת Jmol אשר מופיעות במשימת הלמידה				
<u>17</u>	שינוי תצוגת החלבון (לדוגמה מתצוגת כדור מקל לתצוגת מבנה שניוני) הייתה פעולה מורכבת עבורי כשהפעלתי Jmol				
<u>18</u>	הצגת מבנה החלבון באמצעות Jmol מסייעת לי להבין את מאפייני המבנה השניוני שלו				

אשמח לקבל הערותיכם...במידה וברצונך להוסיף הערה רשום אותה כאן:

נספח 5: פרוטוקול ריאיון מורים תפיסות על למידה אודות חלבונים באמצעות השימוש ב-Jmol
הריאיון הזה מתמקד ברפלקציה של מורים המלמדים בכיתות ביוטכנולוגיה שבהן תלמידים משתמשים ב-Jmol בתיווך משימות למידה.

חלק ראשון:

- ש1:** ספר לי, מהו הניסיון שלך בהוראה במסגרת מגמת הביוטכנולוגיה עם הכלי Jmol?
- ש2:** **המשך לשאלה 1:** האם התנסית בהפעלה ושימוש של הכלי Jmol במסגרת אחרת? אם כן, היכן?
- ש2:** במידה ואתה זוכר, מה הייתה התגובה הראשונה שלך כשהבנת שאתה הולך ללמד תלמידים להפעיל ולהשתמש בכלי Jmol?
- ש3:** **המשך:** ומה עשית אז? וכיצד אתה רואה את תגובתך אז נכון להיום?

חלק שני:

- בקשה:** אני מציב בפניך שלוש כרטיסיות ריקות. אני אשמח שתיקח לעצמך מספר דקות כדי לחשוב על שלוש מטרות למידה שאתה כמורה מקדם באמצעות זה שהתלמידים שלך מפעילים ומשתמשים בכלי Jmol, במסגרת ביצוע משימות הלמידה. בנוסף אשמח לדוגמה מתוך העשייה בכיתה בהקשר למטרה זו.
- ...לאחר שהמורה רשם את עמדותיו הנוגעות למטרות הלמידה המושגות באמצעות Jmol בכרטיסיות יש להמשיך לשאלות הבאות:**

- ש3:** אשמח שתפרט מעט על כל אחת מהמטרות שרשמת בכרטיסיות.
- ש4:** תודה רבה. עכשיו, האם תוכל לסדר באופן היררכי את מטרות הלמידה המושגות באמצעות ההפעלה והשימוש בכלי Jmol על ידי התלמידים המופיעות בכרטיסיות השונות על פי סדר חשיבותן עבור התלמידים לדעתך? במידה והנך רואה חשיבות זהה למטרות שונות אז תוכל להציב את הכרטיסיות זו לצד זו.
- ש5:** האם תוכל להסביר לי מדוע בחרת לסדר את מטרות הלמידה המושגות באמצעות הפעלת הכלי Jmol באמצעות משימות הלמידה על ידי התלמידים כפי שסידרת?

חלק שלישי:

- בקשה:** תודה רבה, עכשיו נעבור לדבר נוסף. ברשותי ארבע כרטיסיות נוספות שבהן רשומות מטרות למידה של תלמידים כפי שהן מופיעות בספרות. אני לא יודע אם אתה מסכים להן, או אם אתה מיישם אותם כשהתלמידים משתמשים ומפעילים את Jmol. אני מעביר לידי המורה את הכרטיסיות/כרטיסיה.
- ש6:** האם תוכל להבהיר לי האם אתה מקבל את המטרות הללו? האם אתה מיישם את המטרות האלה? במידה ואתה מיישם אשמח שתרשום דוגמה למשהו שנעשה בכיתה שמתכתב עם מטרת הלמידה הרשומה על גבי הכרטיסיה. **לתת מספר דקות**
- ש8:** האם תוכל לשבץ את מטרות הלמידה במידה ואתה מקבל אותם או מיישם אותם לתוך תרשים הזרימה הקיים ולהסביר לי מדוע בחרת להכניס את הכרטיסיות הללו לתוך תרשים הזרימה של מטרות הלמידה שכתבת דווקא באופן הזה? במידה והנך רואה חשיבות זהה למטרות שונות אז תוכל להציב את הכרטיסיות זו לצד זו. במידה ואתה רואה את המטרות כזהות למטרות קיימות אז תוכל להציב את הכרטיסיה הנוכחית על גבי הכרטיסיה הראשונה.

סיכום:

- ש10:** אציג בפניך עכשיו גרסה נוספת למשימות למידה שבהם ממוחשים מבנים של חלבונים, אך ללא הפעלת Jmol. האם גרסה זו של משימת הלמידה עומדת בהלימה לסידור המטרות ההיררכי שהצגת?

כרטיסיות שאותם התבקשו המורים למלא

שלש תבניות ריקות לרישום מטרות למידה באופן עצמאי על ידי המורה:

לדעתי, חשוב שהתלמידים יקבלו מתוך ההפעלה והשימוש בתוכנת Jmol במסגרת משימות הלמידה את...

ולכן בכיתה...

ארבע תבניות מלאות עם מטרות למידה על פי הפרקטיקות של NRC, 2012:

לדעתי, חשוב שהתלמידים יקבלו מתוך ההפעלה והשימוש בתוכנת Jmol במסגרת משימות הלמידה את...

היכולת לנתח ולפרש נתונים

ולכן בכיתה...

לדעתי, חשוב שהתלמידים יקבלו מתוך ההפעלה והשימוש בתוכנת Jmol במסגרת משימות הלמידה את...

היכולת לבנות הסברים ולעצב פתרונות

ולכן בכיתה...

לדעתי, חשוב שהתלמידים יקבלו מתוך ההפעלה והשימוש בתוכנת Jmol במסגרת משימות הלמידה את...

היכולת להשתמש במודל ואף לפתחם

ולכן בכיתה...

לדעתי, חשוב שהתלמידים יקבלו מתוך ההפעלה והשימוש בתוכנת Jmol במסגרת משימות הלמידה את...

היכולת להשתמש בתוכנות מחשב ולהפעיל חשיבה מתמטית

ולכן בכיתה...

נספח 6: קישורים המציגים את שיח התלמידות בשמונת האפיזודות כפי שהוקלטו באמצעות תוכנת Screencast-O-Matic.

מספר שאלה	קישור לשיח של SB	קישור לשיח של MR
IPNS שאלה 1	https://vimeo.com/291867101	https://vimeo.com/291866499
IPNS שאלה 4	https://vimeo.com/291877846	https://vimeo.com/291876948
IPNS שאלה 15	https://vimeo.com/178489347/3c54c0b947	
IPNS שאלה 16	https://vimeo.com/291889773	https://vimeo.com/291882310
IPNS שאלה 19	https://vimeo.com/291890669	https://vimeo.com/291890164
AFP שאלה 4	https://vimeo.com/178489268/5d2bc22389	
AFP שאלה 10	https://vimeo.com/178489414/6d365f9536	

נספח 7: תמלילי אפיזודות השיח של שני זוגות בשני חקרי מקרה שונים.

הזוג שלי ובטי (SB) והזוג מאי ורחל (MR)

אפיזודת שיח כמענה במשימת IPNS, שאלה 1 –הזוג SB:

47	בטי: פה. "כיצד ייתכן שהאתר הפעיל של האנזים" מורכב מחומצה אמינית היסטדין בעמדה 270
48	הרחוקה כמעט שישים חומצות אמינו מעמדות 214 או 216 שבהן ממוקמות שאר החומצות
49	המרכיבות את האתר הפעיל, האם נובע מכך שהאתר הפעיל משתרע"-
50	שלי: לא, כי את יודעת יש להן R, ה-R ים שלהם, השיירים שלהם, אז הם מתחברים,
51	בטי: נו, אז הם מתחברים, כן, אני יודעת
52	שלי: זה קשרים לא, לאו דווקא פפטידיים ב, איזה קשרים יש? קשרי מימן
53	בטי: מימן, V.D.V-
54	שלי: אינטראקציות-
55	בטי: הידרופוביות-
56	שלי: אינטראקציות יוניות, יש חמש, S-S
57	בטי: לא-
58	שלי: מימן
59	בטי: אס-אס זה ציסטאין
60	שלי: בסדר, בכללי אני אומרת נו,
61	בטי: אה, ציסטאין, אז
62	שלי: ציסטאין, דיסולפידי
63	בטי: דיסולפידי,
64	שלי: מימן
65	בטי: מימן, יוני
66	שלי: ואן דר וואלס
67	בטי: וואן דר וואלס
68	שלי: יוני
69	בטי: והידרופובי, הידרופילי,
70	שלי: פילי זה יוני, לא? זרם חשמל
71	בטי: אז הידרופובי, חשמל? מה הקשר? מים
72	שלי: כן אבל כאילו, אהממ
73	בטי: הידרופובי, הידרופובי
74	שלי: [מפקת] אהה האינטראקציות היוניות
75	בטי: טוב אז מה לרשום? אני לא יודעת לנסח, תנסחי לי את זה,
76	שלי: אבל תרשמי את,
77	בטי: אני ארשום, בסדר,
78	שלי: אהממ [3 שניות] רגע [3 שניות, מנתיבה לבטי] אף על פי ש, חומצות האמיניות, שהחומצות
79	האמיניות, אף על פי שהחומצות האמיניות המדוברות
80	בטי: להלן
81	שלי: להלן
82	בטי: לעיל
83	שלי: מדוברות, רחוקות אחת מהשנייה [4 שניות] אהממ...אחת מהשנייה, אין זה אומר שהאתר
84	הפעיל משתרע על פני אזור גדול באנזים, [חוזרת עבור ההכתבה] אין זה אומר שהאתר הפעיל
85	משתרע על פני אזור גדול באנזים, אלא שפשוט החומצות, החומצות האמיניות
86	בטי: לא החומצות האמיניות אהה
87	שלי: אהה, השיירים שלהם, השיירים שלהם, שבחומצות האמיניות אהה נקשרו אחת לשני
88	בטי: נקשרו או נקשרות

89	שלי: אחד לשני בקיפול במבנה השלישוני נגיד.. בקיפול
90	בטי: במבנה שניוני גם
91	שלי: אחת לשנייה [מגיבה לבטי] אבל למה במבנה שניוני? במבנה השניוני זה... זה רק ה... לשנייה,
92	במבנה המרחבי פשוט תרשמי, במבנה המרחבי ש... [קוראת בשקט שאלה]
93	בטי: וכך,
94	שלי: באחד מהקשרים, תפרטי את הקשרים, מה שאמרת
95	בטי: [כותבת] באחד מהקשרים הבאים, אינטראקציות יוניות, קשרי מימן, קשרי ון-דר-ולס או
96	אינטראקציות הידרופוביות. זהו?
97	שלי: את בטוחה שאלה הקשרים?
98	בטי: כן,
99	שלי: טוב יאללה, זהו

אפיזודת שיח כמענה במשימת IPNS, שאלה 1 –הזוג MR:

33	מאי: אחד, כיצד ייתכן שהאתר הפעיל של האנזים IPNS מורכב מחומצה אמינית היסטדין
34	בעמדה 270, הרחוקה כמעט 60 חומצות אמינו מעמדות 214 או 216 שבהן ממוקמות שאר
35	החומצות המרכיבות את האתר הפעיל? האם נובע מכך שהאתר הפעיל משתרע על פני אזור גדול
36	באנזים?" [3 שניות] לא פשוט יש מצב שהן כאילו כזה אחת מול השנייה, ואז הן, כאילו-
37	רחל: כן, כמו בזה... במבנה ה...
38	מאי: [צחוק] כמו במעטפת ההיא... קפלים ביטא נגיד, שהם באים כאילו ממול ואז עושים קשרים
39	רחל: זה לא מבנה שלישוני?
40	מאי: מה זה משנה איזה מבנה זה? זה מין מבנים כאלה בשערות [12 שניות, התלמידות מוסחות]
	אפיזודה 4 קוטעת
43	רחל: טוב חלבוניים [רחל פותחת את המחברת ובודקת בה] הנה קשרים קיימים גם פה
44	מאי: נו כן זה בכל החלבונים, לא משנה איזה
45	רחל: אוקיי
46	מאי: הוא פשוט כאילו מתקפל ואז נהיים, נו, הם פשוט נהיים אחד מול השני, לא משנה באיזה מקום
47	הם, לא חייבות להיות אחת מול השנייה, אז מה לרשום? כאילו איך ננסח את זה?
48	רחל: בואי נקרא עוד הפעם את השאלה "כיצד ייתכן שהאתר הפעיל של האנזים IPNS מורכב
49	מחומצה אמינית היסטדין בעמדה 270 המרוחק כמעט 60 חומצות אמינו מעמדות 214 או 216 שבהן
50	ממוקמות שאר החומצות המרכיבות את האתר הפעיל? האם נובע מכך שהאתר הפעיל משתרע על
51	פני אזור גדול באנזים?" תכתבי, לא בהכרח.
52	מאי: רק רגע, מה לרשום
53	רחל: אה... כיצד יתכן אה, [מאי כותבת]
54	מאי: התקפלות זה עם [האות] ת?
55	רחל: כן, כן [5 שניות], גם הם אומרים מתקפל [7 שניות, מאי כותבת] מה כתבת פה?
56	מאי: אמינו
57	רחל: לא כתבת טוב אמינו [צחוק]
58	מאי: [צחוק] די סתמי אני כותבת, אל תקטעי את קו המחשבה שלי [7 שניות] אורן תירגע [15 שניות],
59	רחל: תראי שזה כמו -
60	מאי: שקט שקט [8 שניות], קטבים או?
61	רחל: מה זאת אומרת קטבים... תכתבי כמו שזה-
62	מאי: שנייה שנייה
63	רחל: כמו במבנה שניוני ושלישוני [5 שניות] תוסיפי
64	מאי: זה בכל המבנים ככה
65	רחל: לא זה לא

66	מאי: זה כן, זה כן ברביעוני
67	רחל: ברביעוני אין
68	מאי: אבל, נוצרים לך קשרים בין, כאילו בין חומצות אמינו שכל..
69	רחל: שהם מסתדרים אחד מול השני,
70	מאי: נכון, אבל זה לא מחייב שזה יהיה רק מול, זה יכול להיות כאילו, זה כן מול אבל כאילו -
71	רחל: מבנה רביעוני זה לא
72	מאי: זה כן
73	תלמיד: אפשר בבקשה שקט שם?
74	רחל: ששש [צחוק]
75	מאי: זה כל ה....
76	יובל : תודה
77	רחל: [3 שניות] טוב לא משנה
78	מאי: [10 שניות, מבקשת משוב על מה שכתבה] בסדר?
79	רחל: סבבה, רגע פה, ני ני ני, חומצות האמינו לא החומצות האמינו
	אפיזודה 5 קוטעת
83	רחל: מה זה הקטבים הזה?
84	מאי: קטבים, זה, קצוות שונות של ה...זה מקומות שונים
85	רחל: אז אולי נכתוב מקומות?
86	מאי: נו בסדר, נו יאללה, זה לא,
87	רחל: [מתקנת] טוב סבבה, עכשיו השני "האם נובע שהאתר הפעיל משתרע על פני אזור גדול
88	באנזים?"
89	מאי: אני חושבת שלא,
90	רחל: כן אז בואי נכתוב את זה, לא מכיוון שיכולים להיווצר קשרים, בין חומצות האמינו-
91	מאי: הם פשוט שואלים כאילו אם האתר הפעיל אם החיבור שלהם יהיה פשוט יותר גדול, בגלל שהם
92	רחוקים יותר [רעש]
93	רחל: לא, זה לא דווקא, זה תלוי איך זה מסתדר, אם זה נגיד אחד מול השני אז זה יהיה ממש קטן
94	אבל זה בכאילו יותר זווית, נקרא לזה, אז זה יהיה גדול,
95	מאי: אז איך נרשום את זה?
96	רחל: שלא בהכרח, תלוי בצורה שבה זה מסתדר
97	מאי: שנייה, [כותבת ויש רעש בכיתה], בואו אתם מוציאים מריכוז אנשים [3 שניות],
	אפיזודה 6 קוטעת
113	רחל: תמחקי את זה, אז אם כתבנו לא בהכרח אז לא צריך פסיק...רגע
114	מאי: תוציאי את בהכרח [מתקנת], אבל למה יכולת למחוק את ה...?
115	רחל: כי זה מבלבל אותי, כי אז האותיות קופצות,
116	מאי: [קוראת טקסט שכתבה] "לא בהכרח, החלבון יכול להגיע בצורה בה חומצות האמינו
117	שכשרשרת רחוקות יותר", לא [מתקנת, 60 שניות] טוב עכשיו
118	רחל: יאללה השאלה הבאה
119	מאי: רגע כתבתי "החלבון יכול להגיע לצורה בה חומצות אמינו שכמבנה ראשוני הן רחוקות, הן
120	פתאום נהיות קרובות, לכן אין קשר בין המרחק לגודל"
121	רחל: סבבה
122	מאי: התחביר לא משהו אבל לא נורא
123	רחל: אבל יבינו אותנו כי אנחנו מדברות על זה [צחוק]

אפיזודת שיח כמענה במשימת IPNS, שאלה 4 –הזוג SB:

317	בטי: "נחזור לחלון"..." כמה גדילים קיימים במשטח השני"
318	שלי: אחד, שתיים, שלש, ארבע, חמש, שש, שבע, לא יודעת, רגע, שבע...זה אחד-
319	בטי: גדילים זה-
320	שלי: רגע גדילים צריך לספור?
321	בטי: גדילים, כן
322	שלי: לפי דעתי שמונה, רגע...הגדילים
323	בטי: כמה גדילים?
324	שלי: מה זה גדילים?
325	בטי: גדיל...אני יודעת,
326	שלי: גדיל?
327	בטי: "כל גדיל בטא ממוספר" רשום. סליל אלפא ובטא כנראה. [לוחשת] מה זה סליל?
328	שלי: "משטח אחד" [5 שניות] WTF! [3 שניות] "במבנה האנזים ניתן להבחין בשני משטחי ביטא,
329	במשטח אחד קיימים 3 גדילים [3 שניות] כמה גדילים קיימים במשטח השני" [צחוק]
330	בטי: זה בטח בביטא, לא? [3 שניות], אההה! אני הבנתי [2 שניות] תראי... יש לך פה אחד, הנה אחד
331	עם שלושה...הנה, שלושה גדילים, עכשיו פה יש לך עוד אחד עם אחד, שתיים, שלש, ארבע, חמש,
332	לא יש יותר, אחד, שתיים, שלש, ארבע, חמש, שש, שבע שמונה.
333	שלי: אמרתי שמונה
334	בטי: [תשובה נכונה] וואו
335	שלי: ואו, יפה בטי [נותנת כיף אחת לשנייה]
336	בטי: הופה, שמונה גדילים, אההה [על המשוב לתשובה] את רוצה לקרוא את זה? [מחליטה שלא]

אפיזודת שיח כמענה במשימת IPNS, שאלה 4 –הזוג MR:

379	רחל: "במבנה האנזים ניתן להבחין בשתי משטחי ביטא, במשטח אחד קיימים
380	שלושה גדילים, כמה גדילים קיימים במשטח השני?" אה...כאילו כל אחד הוא גדיל?
381	מאי: [לא מובן]
382	רחל: שנייה בואי נחזור לפה, לא קראנו את זה, סליל אלפא יודעים, ביטא יודעים, אה יודעים, אז זהו.
383	מאי: אין מה לקרוא [צחוק]
384	רחל: הנה זה איור 5 [מראה איור 5, אך התבקשה למסך 5].
385	מאי: מה זה גדיל?
386	רחל: יש שאלה עכשיו, אה הנה זו השאלה
387	מאי: אה! כל אחד מהם זה גדיל. הבנתי.
388	רחל: [קוראת כותרת למסך 5] "באנזים ה-IPNS קיימים שני משטחי ביטא, בצד ימין ניתן לראות את
389	ההגדלה של משטח ביטא המסומן בריבוע אפור, כאשר כל גדיל ביטא ממוספר. יש לבחור תשובה
390	אחת. [תשובה] א גדיל אחד, [תשובה] ב, מה השאלה?
391	מאי: שלושה גדילים, יש פה שלוש אז נראה לי שלוש.
392	רחל: אבל מה השאלה? כאילו לא הבנתי מה שואלים אותנו, תעלי, "כמה גדילים קיימים במשטח
393	השני?"
394	מאי: שלוש
395	רחל: אבל זה המשטח הראשון, "במשטח אחד קיימים שלושה גדילים", והם שואלים אותנו כמה
396	קיימים במשטח השני?
397	מאי: אההה!
398	רחל: מה זה המשטח השני?
399	מאי: כל השניים, כל הצהובים השניים, יש אחד, שתיים... כנסי לכאן,

400	רחל: רגע, באנזים ה-IPNS קיימים שני משטחי ביטא, בצד ימין ניתן לראות את ההגדלה של משטח
401	ביטא המסומן בריבוע אפור, כאשר כל גדיל ביטא". אוהד...
402	מאי: עזבי...לא...
403	רחל: זו שאלה טכנית אבל, כשאומרים שיש לנו שני משטחי ביטא, מתכוונים שכל זה חלק אחד, וכל
404	זה חלק שני?
405	מאי: [לא מובן]
406	רחל: בטח התבלבלת, בואי נספור כמה יש פה, אחד
407	מאי: אוהד נראה שיש לך פרצוף מרוצה,
408	חוקר: ג'יימול, תכנסי לג'יימול
409	מאי: אני אמרתי לך להיכנס לג'יימול
	אפיזודה 22 קוטעת
414	חוקר: אם את רוצה לספור אז למה לא להשתמש בג'יימול, למה להשתמש בתוך...בתמונה עומדת
415	מאי: אז בואי נעשה, תביאי לי
416	רחל: אז מה הם אמרו שהמשטח הראשון?
417	מאי: הראשון שלוש, פשוט נעשה מספר עגול ואז נעשה מינוס שלש
418	רחל: סבבה,
419	מאי: אחת שתיים שלוש ארבע חמש שש שבע שמונה תשע עשר אחת עשרה. ספרת אחת-עשרה?
420	רחל: לא ספרתי,
421	מאי: אז תספרי
422	רחל: רגע, תפסיקי תעצרי פה, אחת שתיים שלוש ארבע חמש שש שבע שמונה תשע עשר אחת
423	עשרה.
424	מאי: גם את ספרת אחת- עשרה, אחת עשרה פחות שלוש תשע. אין פה אפשרות לתשע, אז זה
425	שמונה [צחוק, דיבור לא מובן] שאלה?
426	רחל: אל תסגרי תמזערי את זה
427	מאי: סליחה אוהד [הגשת שאלה]
428	רחל: רגע רגע,
429	מאי: עשיתי כבר
430	רחל: אבל אם טעינו
431	מאי: צדקנו [מחליקות כיף, צחוק]
432	רחל: יהה, כן אני לא הייתי בטוחה, אם כאן ספרתי את זה בתור שני גדילים, אבל זה מחובר.
433	מאי: רגע, אחת עשרה פחות...נו...שלש [5, שניות צחוק בלתי נשלט],

אפיזודת שיח כמענה במשימת IPNS, שאלה 15 –הזוג SB:

798	שלי: "יחד
799	עם מבנה החלבון זוהה יון המתכת ברזל". תזווי קצת אחורה אולי נראה איזה נקודה, [4 שניות]
800	למה משמש יון ברזל?
801	בטי: הולכה חשמלית [צחוק]
802	שלי: אהה! זה בחלבון? כאילו, אה זה בחלבון, אין לי מושג, [צועקת למורה] מאיפה אני אמורה לדעת
803	איפה ממקום יון ברזל? [המורה לא עונה]
804	שלי: [שואלת תלמידים] איפה ממקום היום ברזל?
805	ת: אהה?
806	שלי: [חוזרת ושואלת] איפה ממקום היום ברזל?
807	תלמיד: במרכז נראה לי...
808	שלי: למה?
809	בטי: אולי זה כמו הסיידן ב-PON1

810	שלי: נכון, תרשמי שאולי הוא עוזר לקיפול ה-
811	בטי: הוא עוזר,
812	שלי: תרשמי שאנחנו משערים
	אפיזודה 61 קוטעת
820	בטי: [כותבת] יון הברזל ממוקם באמצע ה... [שואלת את שלי] האתר הפעיל או החלבון?
821	שלי: נראה לי האתר הפעיל, שהוא נמצא בו
822	בטי: [כותבת] באמצע האתר הפעיל, אה זהו. אה למה?
823	שלי: כי אולי הוא עוזר לקיפול נכון ולתפקוד טוב של ה-
824	בטי: [ממשיכה לכתוב] כי אולי הוא עוזר נכון לתפקוד החלבון ולקיפול נכון שלו

אפיזודת שיח כמענה במשימת IPNS, שאלה 15 –הזוג MR:

967	רחל: "היכן לדעתכם ממוקם יון המתכת ברזל" מה? אה! [מתרגזת וחוזרת לקרוא טקסט קודם שלא
968	נקרא] "נחזור ונדגיש כי לאחר שהאנזים IPNS"
969	מאי: אה, הריבוע שנוצר זה נראה לי יון מתכת ברזל,
970	רחל: [לאחר שסיימה לקרוא את הטקסט] אני לא מבינה, "היכן לדעתכם ממוקם יון המתכת ברזל"
971	אוהד [החוקר לא מגיע],
	אפיזודה 59 קוטעת
978	מאי: סביר שהוא בפנים. כי ברזל הוא הידרופובי. לא? סבבה
979	רחל: בתוך ה-
980	מאי: חלבון, לא? [10 שניות, פונה לזוג בנים] סיימתם? יואו נבלות [8 שניות, לא מובן]
981	בני: יאללה סיימנו
982	רחל: [כותבת] תראי מה כתבתי [בתוך החלבון כי הברזל הוא הידרופובי והסביבה החיצונית היא
983	מימית והוא לא יוכל להיות בחוץ]
984	מאי: סבבה הבא

אפיזודת שיח כמענה במשימת IPNS, שאלה 16 –הזוג SB:

833	בטי: "לפניכם שלש תצוגות של אותו חלבון, איזו מבין התצוגות מציגה את מבנה החלבון כפי שהוא
834	במציאות?" [CPK Spacefill], לא?...לא...תסתכלי שנייה, מה נראה לך במציאות,
835	מציג את המבנה במציאות, זה לא? לא?
836	שלי: כן,
837	בטי: למה?
838	שלי: כי הוא מראה לנו את הנפח של האטומים. לא?
839	בטי: [כותבת] האזור האמצעי מראה לנו את החלבון כפי שהוא במציאות כי הוא מראה את כל נפח
840	החלבון? [3 שניות]
841	שלי: נפח האטומים, ב [לא מובן] אחר. נפח החלבון?
842	בטי: איפה?
843	שלי: לא יודעת, זה הם אומרים משהו כזה
844	בטי: חלבון בסדר,

אפיזודת שיח כמענה במשימת IPNS, שאלה 16 –הזוג MR:

1006	רחל: "לפניכם שלש תצוגות של
1007	אותו חלבון"
1008	מאי: אף אחת,

1009	רחל: "איזו מבין התצוגות מציגה את מבנה החלבון כפי שהיא במציאות"
1010	מאי: אף אחת
1011	רחל: אם לא כתוב לנמק לא צריך לנמק? נכון?
1012	חוקר: כן, תדברו על זה רק,
1013	מאי: פשוט אף אחת בגלל שאמרנו שהאלה [לא מובן, צלצול] של מפה, אז כאילו-
1014	רחל: אני מקווה ששומעים כי עכשיו צלצול
1015	מאי: פשוט, נזכרנו במטאפורה המדהימה שאמרתם לנו על המפה, שזה לא באמת מתאר את
1016	הדרכים, כי יש שם בתים יש שם הרבה דברים, ש-
1017	רחל: טוב,

אפיזודת שיח כמענה במשימת IPNS, שאלה 19 –הזוג SB:

919	שלי: מה רשמתי בכלל, מפסיקה. תשע-עשרה, "בחלבונים רבים קיימים קשרי גופרית התורמים רבות לייצוב מבנה החלבון".
	אפיזודה 72 קוטעת
922	"שלי": חלבון האינסולין, לדוגמה, חומצות האמינו המכילות אטום גופרית הן חומצות אמינו
923	מסוג ציסטאין. לפניכם מבנה מרחבי של חלבון המוצג בתצוגת ה-CARTOON, וברצונכם לבדוק אם
924	קיימים קשרי גופרית. תארו מה הפקודות שעליכם לבצע על מנת לבדוק שאלה זו (קשרי גופרית
925	בסביבת העבודה מוצגים בצבע צהוב". אהממ, אם יש קשרי גופרית, איך עשינו? SELECT,
926	PROTEIN, ELEMENT, מה זה היה הקשרים? איך עשינו את הקשרים? את היית על הלחיצות?
927	בטי: STYLE,
928	שלי: לא, לא STYLE
929	בטי: BONDS [10 שניות] מה? מה היא אמרה, מה היה רשום? CARTOON?
930	שלי: כי זה כאילו במבנה של ה-CAROON, עכשיו את זוכרת, תביאי לי רגע, איך עשינו את זה, אה,
931	עשינו משהו ואז עשינו את ה-30A, איך בחרת את אלה?
932	בטי: אין לי מושג [16 שניות]
933	שלי: אה! עושים משהו? הנה S! סולפיטור, ואז תעשי שוב פעם, תעשי
934	בטי: COLOR
935	שלי: לא רגע, תעשי, לא רגע רגע, תעבירי ל, איך היה לך את ה-30 A הזה? היה לך את ה-30 A,
936	לא? BONDS אולי? הנה, 30 A, עכשיו תעשי COLOR צהוב, מה זה צהוב? איפה את? YELLOW
937	BONDS, BONDS, ATOMS, אז BONDS, YELLOW, תעשי YELLOW, לא? תעשי ATOMS? לא יודעת!
938	בטי: [5 שניות] לא יודעת, [7 שניות] BONDS, הנה HYDROGEN, HYDROGENS [צחוק]
939	שלי: [צחוק] יש לך את זה ביותר רוסית?
940	בטי: אני לא יודעת, תעזרי לי,
941	שלי: [לחוקר] תקשיב, אנחנו לא יודעים את תשע-עשרה, כאילו נראה לי שעשינו את ה-S ATOMS,
942	חוקר: כן,
943	שלי: אני אגיד לך מה עשינו, עשינו SELECT,
944	חוקר: כן, נכון, כבר החשיבה מעולה.
945	שלי: לא, איפה זה היה? הנה פה, ELEMENT,
946	חוקר: כן,
947	שלי: S
948	חוקר: אהה, אבל אז תסמני, רק את ה-
949	שלי: את האטומים!
950	חוקר: את האטומים כאילו, יש לך במתיונין גם אטומי גופרית
951	שלי: אה נכון,

952	חוקר: יש לך גם עוד אופציה, SELECT, תמשיכי לחבור שם, הלכת ל-PROTEIN, תסתכלו שם ב-
953	BY, PROTEIN, מה זה שם BY RESIDUE NAME? מה זה שם הדברים האלה? למעלה?
954	בטי: מה זה? מה זה?
955	חוקר: כן, מה זה?
956	שלי: באמת מה זה?
957	בטי: קשרים?
958	שלי: אה הנה,
959	חוקר: מי אלה? מה אלה?
960	שלי: [צחוק]
961	חוקר: מה זה?
962	שלי: אה, זה הקשרים האלה?
963	חוקר: זה לא קשרים!
964	בטי: זה חומצות אמיניות!
965	שלי: זה חומצות אמיניות!
966	חוקר: יפה, זה חומצות אמיניות, מה אתן מחפשות?
967	שלי: אהה, גופרית, סולפיט, לא?
968	חוקר: וגופרית נמצאת בחומצה אמינית שקוראים לה,
969	בטי: ציסטאין,
970	חוקר: ציסטאין יפה! את זכרת שזה היה רשום פה,
971	בטי: לא זכרתי את זה,
972	שלי: הנה, הנה CYS,
973	חוקר: נכון,
974	שלי: ועכשיו תעשי YELLOW COLOR, אה לא,
975	חוקר: קודם כל להציג אותם, להציג
976	שלי: לא צריך לעשות את ה 30A הזה?
977	חוקר: אולי תציגו שיירים צדדיים כמו שהצגתם פה?
978	שלי: ככה, תעשי רגע, לא, איך עשינו את זה?
979	חוקר: עשיתם ATOMS, לא עשיתם BONDS, הלכתם ל-BONDS
980	שלי: כן, כן, עשינו את זה ב-BONDS, ואז עשינו 30 A.
981	חוקר: נכון את הכי רציני, שהוא הכי טוב,
982	שלי: כן, כן,
983	חוקר: יש, יש לכם ככה איזה צבע, צהוב טוב, ש
984	שלי: כן,
985	חוקר: או לא צהוב כי זה מפריע,
986	שלי: כן אני גם חשבת, למה צהוב?
987	חוקר: כי צהוב יפריע לכם, כי זה הצבע של המעטפת קפלים ביטא,
988	שלי: לא כי גם אני אמרתי, יש פה צהובים, אז למה צריך צהוב?
989	חוקר: כן, בדיוק, אז עשיתם GREEN, טוב, יפה
990	שלי: אה, הנה יצא לנו יפה, תביאי כיף
991	חוקר: זה הכל, אז איפה אתם רואים גופרית, אה סליחה, ציסטאנים?
992	בטי: פה ופה,
993	שלי: הם כאילו ליד ה, כאילו כזה-
994	בטי: [לא מובן]
995	שלי: מכסים את האתר הפעיל כזה,
996	חוקר: מסביב, אחד פה ואחד, אז מה אתם אומרים נוצר קשר דיסולפיד? יש קשר דיסולפיד?
997	בטי: לא,

998	שלי: בינו ובינו?
999	חוקר: יש לכם דבר אחד שחסר במיומנות שזה לסובב, להקטין קצת טיפה נגיד,
1000	בטי: לא אנחנו יודעות לסובב
1001	חוקר: אתן יודעות, אבל כשאתן רוצות לראות משהו, הנה,
1002	שלי: לא, לא, איך יקשר? תראה איפה היא ואיפה היא .
1003	בטי: אין קשר,
1004	חוקר: אה אהה,
1005	שלי: אה אהה,
1006	חוקר: פתאום את אומרת לי את זה, מקודם לא אמרת לי את זה, כשהתחלת לסובב התחלת להגיד
1007	לי,
1008	בטי: אני אמרתי,
1009	חוקר: נכון? אז אתן יכולות להגיד בתשובה לשאלה? האחרונה?
1010	בטי: מה השאלה?
1011	שלי: הם שאלו איך אנחנו עושים את זה?
1012	חוקר: "תארו מה הפקודות", אהה "לפניכם מבנה מרחבי",
1013	בטי: לא
1014	חוקר: "ברצונכם לבדוק אם קיימים בו קשרי גופרית. תארו מה הפקודות"
1015	בטי: אה אם קיימים,
1016	שלי: אז אנחנו,
1017	חוקר: אז כתבו לכן, לא קיימים קשרי גופרית, נכון, הם לא קיימים
1018	בטי: לא קיימים,
1019	חוקר: אתם רוצים לבדוק אם קיימים בו קשרי גופרית, אז אמנם לא שאלו אתכם, אבל
1020	שלי: אז כאילו אנחנו אומרים, בשביל לבדוק זאת עשינו [מקלידה] סימנו את חומצות הציסטאין
1021	בחלבון בצבע ירוק,
1022	בטי: הצסטאין
1023	שלי: בצבע ירוק
1024	בטי: בצבע ירוק, וראינו שלא יכולות להיווצר,
1025	שלי: וראינו שהם ממש רחוקים אחד מהשני,
1026	בטי: שהן רחוקות מהשנייה לכן לא יכול להיווצר קשר גופרית ביניהם. זהו?
1027	שלי: כן,

אפיזודת שיח כמענה במשימת IPNS, שאלה 19 –הזוג MR:

1041	רחל: "בחלבונים רבים קיימים קשרי גופרית" [קריאה בשקט] "מבנה מרחבי של חלבון"
1042	[קריאה בשקט] "תארו מה הפקודות שעלכם לבצע על מנת לבדוק שאלה זו. קשרי הגופרית בסביבת
1043	העבודה Jmol מוצגים בצבע צהוב". קשרי גופרית הם בצבע צהוב, כל הצהובים הם קשרי גופרית.
1044	איך אנו בודקים אם קיימים בו קשרי גופרית, איזה פעולות אנחנו צריכים בשביל לבדוק אם קיימים
1045	קשרי גופרית?
1046	מאי: נראה לי גם לצבוע את הקשרי גופרית או משהו ,
1047	רחל: אז COLOR,
1048	מאי: איך עושים את זה?
1049	רחל: אין לי מושג, אוהד.
1050	מאי: אוהד, אם אנחנו לא יודעות, אנחנו נרשום לא יודעות?
1051	חוקר: אהה
1052	מאי: פשוט אין לנו מושג-
1053	רחל: איך אני בודקת את הקשרי-
1054	חוקר: אהה, אז שאלה אחרונה, אוקיי, יש לכם קשרי גופרית שם הייתן יכולות לראות אם יש קשרי

1055	גופרית שם?
1056	מאי: לא יודעת
1057	חוקר: בתוך החלבון
1058	רחל: כן, אבל אני לא יודעת איך עושים את זה. אני לא מכירה את התוכנה מספיק טוב. לא?
1059	חוקר: אוקיי אם את חושבת שאת לא יכולה, אוקיי אז זה משהו שבא ממך
1060	רחל: לא אני יכולה למצוא, רק תסביר לי איך עושים את זה
1061	מאי: הוא לא יכול, זו השאלה.
1062	חוקר: זו הייתה השאלה, לראות
1063	מאי: אין לך מושג
1064	רחל: לא אבל [לסלולרי] כן, תודה ביי. כן אבל כתבו לנו איך עושים את זה?
1065	מאי: אין לך מושג! את לא מבינה שאין לנו מושג! תרשמי לא יודעת, כי אני לא יודעת איך עושים את זה.
1066	רחל: למה? "תארו מה הפקודות שעליכם לבצע על מנת לבדוק שאלה זו?"
1067	מאי: את יודעת איזה פקודות צריך לבצע כדי-
1068	חוקר: אני רוצה להראות-
1069	רחל: איך בודקים
1070	חוקר: את הקשרים הדיסולפידים, אני רוצה להראות אם יש קשרים דיסולפידים, איך אני יכול להראות את זה?
1071	מאי: דיסולפידים זה לא מים?
1072	חוקר: זה קשר S-S-
1073	רחל: אני רוצה-
1074	חוקר: קשר בין גופרית לגופרית, בין ציסטאין לציסטאין יש אטומי גופרית
1075	מאי: אז נצבע את כל חומצות האמינו הציסטאין יש אפשרות כזאת?-
1076	רחל: יש אופציה קשרים?-
1077	מאי: כן משהו, משהו אם
1078	חוקר: אולי
1079	מאי: מה אמרתי, אמאלא שכחתי
1080	חוקר: אהממ
1081	מאי: רגע קשרים דיסולפידים-
1082	רחל: הנה DISULFIDE BONDS ורציתי לצבוע את זה באיזה צבע? צהוב. נכון? נכון? נכון?
1083	חוקר: אוקיי
1084	רחל: לא רגע, אמרו לנו את הגופרית בצהוב, גופרית, אה S זה גופרית, אה איזה טיפשה אני לומדת
1085	כימיה אלק [צחוק], COLOR
1086	מאי: העיקר הוצאת תשעים ותשע
1087	חוקר: מה בחרתם אבל? מה בחרתם? זו השאלה? מה כרגע יש לכם בחירה, 1 SELECT כתוב פה
1088	1 SELECT, זה אומר שכרגע רגע אטום אחד נבחר, איזה אטום נבחר שם בדיוק?
1089	מאי: מאיפה אנחנו יודעות?
1090	רחל: מה זה 1 SELECT? אני לא לחצתי על שום SELECT?
1091	חוקר: מה זה האחד הזה? מה הוא מראה?
1092	רחל: אהה
1093	חוקר: אם לא כתבו לכם זה כנראה לא דבר ש אבל יש לזה
1094	מאי: תעשי PROTEIN
1095	רחל: לא אנחנו צריכים קשרים
1096	מאי: אז אל תעשי קשרים, תעשי
1097	חוקר: רוצה קשרים או אולי אטומים קודם כל
1098	רחל: אולי אטומים קדם כל
1099	
1100	

1101	רחל: לא עדיף לסמן כבר את איך קוראים להם?
1102	חוקר: PROTEIN, יש לך ב RESIDUE ,RESIDUE NAME זה שייר
1103	רחל: מאיפה לי מה שייר, אה, זה, מה?
1104	חוקר: CYSTEIN
1105	רחל: איפה זה?
1106	מאי: איך הגעת ל CYSTEIN?
1107	רחל: הנה זה, ועכשיו אני אעשה BONDS COLOR , לא הנה DISULFIDE BONDS , לא?
1108	חוקר: הוא מראה לך?
1109	רחל: לא
1110	חוקר: אני לא רואה, אבל אם תעשי את מה שעשית מקודם, שזה בעצם היה A0.3 STYLE BONDS
1111	רחל: נכון
1112	חוקר: ואז היית עושה COLOR וצובעת את זה בצבע אחר, COLOR של ה- BONDS בצבע ORANGE
1113	רחל: הנה, כאן
1114	חוקר: שזה קצת לא מדהים ORANGE אבל אנחנו רואים פה, הנה אחד.
1115	רחל: אז אפשר,
1116	מאי: הנה שתיים
1117	חוקר: ואיפה השני?
1118	רחל: למטה
1119	מאי: כאן
1120	חוקר: יש קשר דיסולפידים בניהם?
1121	רחל: כן
1122	מאי: כן
1123	מורה : כן?
1124	רחל: אה לא, ביניהם לא!
1125	מאי: בניהם לא
1126	חוקר: תראו כאן איפה הם?
1127	רחל: הנה כאן וכאן הם ממש רחוקים אחד מהשני,
1128	חוקר: נכון, אז אם הייתי
1129	רחל: קיימים קשרים דיסולפידים אבל הם לא עושים ביניהם את הקשר.
1130	חוקר: זאת אומרת, בחלבון הזה האם יש קשר דיסולפידים?
1131	רחל: לא
1132	מאי: לא
1133	חוקר: אז אם היית עושה עכשיו, בחירה בניסיון לעשות קשר דיסולפידים זה היה מציג לך את זה? רחל: לא
1134	חוקר: לא, את עשית את זה.
1135	מאי: אז לרשום עשינו .
1136	רחל: לא, אז ניסינו לעשות , אבל ראינו שאי אפשר, בסדר ככה אפשר לכתוב את זה?
1137	חוקר: איך שאת רוצה,
1138	מאי: יאללה סיימנו?
1139	חוקר: אה, יש את הסוף פה "במשימה זו"
1140	רחל: [מקלידה]נסינו להראות, את הקשר בין קשרי ה

אפיזודת שיח כמענה במשימת AFP, שאלה 4 –הזוג SB:

176	בטי: אוקיי הבנו את זה, [קוראת את
177	השאלה]... "בתצוגת מבנה החלבון ישנן גם מולקולות מים, כיצד הן מתוארות?" [קוראת מתוך
178	השאלה] "כדורים"?

179	שלי: זה זה [מצביעה על אחת מהתשובות]
180	בטי: בואי נראה, [מצביעה את הציין על כדור בצבע ירוק וקוראת במלבן הנפתח] לא...
181	שלי: הנה "כדורים כחולים המחוברים לכדורים אפורים או כדורים" מה לא? זה לא ה-H ₂ O?
182	בטי: [עוברת עם הציין לכדור כחול ולאחר מכן לכדור אפור] איך היא עשה את זה?
183	שלי: תעשי על האדום אולי
184	בטי: זה... [מצביעה את הציין על כדור בצבע אדום וקוראת במלבן הנפתח]... HOH-הנה-
185	שלי: הנה כן אדום,
186	בטי: "אדום המחובר ל"
187	שלי: [מאחורי הכדור האדום יש כדור אפור] כדורים אפורים,
188	בטי: אה הנה, לסובב? [מסובבת את המודל] אימאלה, זה? אבל זה לא מחובר לכלום [צחוק]
189	אה כן? אז זה זה [בוחרת את אפשרות ג' הנכונה]
190	בטי: סבבה [מדלגת על קטע הקריאה של המשוב לתשובה],

אפיזודת שיח כמענה במשימת AFP, שאלה 4 – הזוג MR:

275	מאי: טוב, בתצוגה-
276	רחל: "בתצוגה מבנה חלבון יש גם מולקולות מים, כיצד הן מתוארות? כדורים כחולים המייצגים את ה"-
277	מאי: אני רוצה לראות את זה
278	רחל: שנייה בואי נקרא את כל התשובות-
279	מאי: קראתי
280	רחל: "כדורים כחולים המחוברים לכדורים אפורים" כדורים אדומים ני ני [2 שניות]
281	מאי: תגדילי
282	רחל: לא זה מציק לי, אני רוצה אבל, ני [צחוק]
283	מאי: [צחוק], הוא מקליט
284	רחל: [מסובבת את התצוגה] אוווי
285	מאי: נראה לי המים, אה, המים... מה יש פה?... נראה לי הכחול
286	רחל: להגדיל?
287	מאי: כן, תגדילי לאחד כזה שנראה אותו ממש טוב,
288	רחל: הנה
289	מאי: מה את חושבת?
290	רחל: שזה כמו כדורים בג'מבורי,
291	מאי: נכון, אבל מה עוד את חושבת?
292	רחל: [צחוק]
293	מאי: מה הם רצו? את קשרי המים?
294	רחל: מולקולות מים
295	מאי: מולקולות מים [5 שניות] לדעתי באמת הכחול, כי הכחול זה מים כזה,
296	רחל: כן, אבל זה [קוראת אחת מהתשובות] כחול שמייצג את אטומי החמצן, או כחול שמחובר לאפור, ואז זה,
297	מאי: הראשון, תעשי [אפשרות] א'
298	רחל: נראה לי ש [אפשרות] ב'
299	מאי: לדעתי זה [אפשרות] א'
300	רחל: למה?
301	מאי: לא יודעת, תעני מה שאת חושבת, אני חושבת שזה [אפשרות] א', לא, לא תסמני [אפשרות] ב' כי
302	אם נטעה תאשימי אותי
303	רחל: אני לא אאשים אותך בשום דבר
304	מאי: אני פשוט חושבת כי זה כחול וחמצן מים
305	רחל: אבל שניהם כחולים
306	מאי: בסדר, לא נורא, תעשי הגש שאלה, [משוב מראה תשובה שגויה] שיט אוי איזה באסה.

307	רחל: [לוחצת על תשובה ב', משוב מראה תשובה שגויה] אוי
308	מאי: אז זה ד, [בלחש] זה ג אני מתה מצחוק [רחל לוחצת על אפשרות ד'] נו, הגש שאלה
309	רחל: [לוחצת, משוב מראה תשובה שגויה] זה [אפשרות] ג'
310	מאי: [צוחקת] סורי אוהד
311	רחל: ידעתי מהתחלה!
312	מאי: רגע בואי נראה, תעלי אני רוצה לקרוא
313	רחל: "ככדורים" [צחוק]
314	מאי: מאיפה אני אמורה לדעת? אני באמת יכולה, כשאני רואה את זה להבין מה, איזה מולקולה זה
315	מה?
316	רחל: אין לי מושג, גם אני לא ידעתי הייתי בטוחה שזה [אפשרות] ב', טוב לא נורא. אהה

אפיזודת שיח כמענה במשימת AFP, שאלה 10–הזוג SB:

478	בטי: הן עפות באוויר [צחוק]. טוב, "סביר להניח שמולקולות המים שנמצאות
479	בתצוגה זו קשורות אל החלבון בקשרי מימן. כיצד ניתן להסביר את הנוכחות של מולקולות מים
480	המרוחקות מתת היחידה A המוצגת?"
481	שלי: כי יש עוד תתי יחידה שם,
482	בטי: כי יש פה קשרי ואן דר וואלס. לא?
483	שלי: מה? מה? מה?
484	בטי: "כיצד ניתן להסביר את הנוכחות של מולקולות מים המרוחקות מתת היחידה A" כי אם פה יש ואן
485	דר וואלס, ופה אין
486	שלי: מי אמר לך שיש? לא! כאילו אלה! ש...למה הן מרוחקות ממנה?
487	בטי: אהה,
488	שלי: נראה לי כאילו אז, כי יש
489	בטי: כי הוצאנו את כל האלה-
490	שלי: כן, כי יש מבנים שהם פשוט,
491	בטי: [כותבת] יש עוד, כי יש
492	שלי: יש עוד תתי יחידות, הם
493	בטי: יש עוד תתי יחידות
494	שלי: הם פשוט מוסתרות, פשוט הסתרנו אותם.
495	בטי: שהסתרנו אותן [כותבת: כי יש עוד תתי יחידות שהסתרנו אותן].

אפיזודת שיח כמענה במשימת AFP, שאלה 10–הזוג MR:

634	רחל: "סביר להניח שמולקולות המים שנמצאות בתצוגה זאת קשורות אל החלבון בקשרי מימן, כיצד
635	ניתן להסביר את הנוכחות של [ממשיכה בשקט]
636	מאי: [לאחד מהתלמידים בכיתה] סתום!
637	רחל: "מולקולות מים המרוחקות מתת יחידה A המוצגת?", אוקי, למה יש מולקולות מים, יש אדומים,
638	שרחוקים מתת היחידה A?
639	מאי: אולי...יש מצב שמולקולות מים אחת טעונה במטען אחר?
640	רחל: אני,
641	מאי: מה?
	אפיזודה 33 קוטעת
647	מאי: צריך משהו עם מולקולות המים לעשות?
648	רחל: לא, עשיתי את זה כבר, שואלים אותנו את זה...תראי מה הקטע, זה תת היחידה A, עכשיו יש
649	מולקולות מים שמרוחקות ממנה שהן לא קרובות אליה בכלל. את רואה?

650	מאי: אולי כי הן קשורות לתת יחידה אחרת
651	רחל: למה? אבל אין, הורדנו את כל היחידות, השארנו רק את A
652	מאי: הם אמורים להיות שם
653	רחל: אבל העפנו אותם
654	מאי: אבל תראי, הם עם הצורה של ה...
655	רחל: אני יודעת, הם גם נראים כמו צ'ורוסים [צחוק]
656	מאי: כן, אז אולי באמת הן קשורות לתת-יחידות אחרות
657	רחל: אבל הן לא פה!
658	מאי: אז מה אם הן לא פה. הן קיימות! פשוט לא רואים אותן
659	רחל: כי הוצאנו אותם
660	מאי: נכון, אבל לא הוצאנו את המים, הוצאנו את תתי היחידה, לא הוצאנו את המים, אז זה לא הגיוני
661	רחל: שוב גשם אני הולכת ברגל...אוהד [קוראת למורה]...
662	מאי: מה את רוצה שהוא יענה לך את התשובה?
663	רחל: לא, אני אשאל אותו אם זה הגיוני, נכון הוצאנו את תת היחידה, B, C, ו-D?
664	מאי: נכון שיש מצב שזה פשוט מים שקשורים לתת יחידה אחרים? יופי הוא הנהן, תרשמי
665	רחל: אבל הם לא קיימים!
666	מאי: הם קיימים! הם פשוט לא מוראים פה כי הוצאנו אותם.
667	רחל: נו, אז אם הוצאנו אותם אז למה זה יקשר?-
668	מאי: את הוצאת את התת יחידה אבל את המים את השארת. את הוצאת את ה...נכון שאני אומרת
669	משהו נכון?
670	חוקר: אני שומע, אני מקשיב לכן, זה הכול.
671	מאי: אני חושבת שהוצאנו את המבנה עצמו אבל לא את מה שקשור אליו מסביב.
672	חוקר: את אוהבת להשאיר את זה סטטי? או שאת אוהבת להזיז את זה?
673	מאי: להזיז, זה ממש נחמד להזיז את זה.
674	רחל: מה את זה?
675	חוקר: כן' כן
676	רחל: כן, כל הזמן לעשות ככה.
677	חוקר: אבל להזיז את זה לאט.
678	רחל: כן, כן, גם ככה, אתה רוצה לראות איך זה נראה כמו צ'ורוס? [צחוק]
679	חוקר: לא...כאילו אני שואל את עצמי האם מה שמאי אומרת יכול לדבר אלייך יותר אם את תזיז את
680	הדברים האלה?
681	מאי: כן כי אתה רואה ממש את הצורות שלהם, לדעתי לפחות. אז זה נכון מה שאני אומרת?
682	חוקר: מה שאת חושבת...
683	מאי: די, טוב בואי נרשום את מה שאנחנו חושבות,
684	חוקר: בסופו של דבר את יודעת אצלך בראש אם את צודקת או את לא צודקת-
685	מאי: תאמת אין לי מושג
686	חוקר: את לא צריכה מורה בשביל זה
687	מאי: אתה רומז לי שאני צודקת [צחוק] אוהד קלטתי אותך, בקיצור מה אמרתי שכחתי
688	רחל: שהם נקשרים לתת יחידה.
689	מאי: אהה, [10 שניות, מקלידה] קשורות או קשורים,
690	רחל: קשורות,
691	מאי: [15 שניות] יאללה מקווה שזה מספיק טוב [מקלידה את התשובה: אותן מולקולות מים קשורות לתת-יחידה
692	אחרים בחלבון ממוצג בגימול].

מדינת ישראל
משרד החינוך
לשכת המדען הראשי

כ"ה. בסלו. תשע"ז
07 דצמבר 2015
תיק 8915 רו 627

היתר לאיסוף מידע לצורך המחקר בנושא
"אפיון תהליכי למידה בקרב תלמידים המפעילים מודלים ממוחשבים של חלבוניים במסגרת
לימודי ביו-טכנולוגיה"

בביצועם של פרופסור ענת ירדן ומר אוהד לבקוביץ'

ההיתר בתוקף החל מתאריך כתיבת מסמך זה ועד לסוף שנת הלימודים תשע"ז בלבד.

במסמך זה ההתייחסות לכל אלה שלא מוזהים לפי שם היא בלשון זכר. זאת מטעמי נוחות בלבד, כאשר הכוונה היא גם לנקבת, אם לא מצוין אחרת.

לצורך הכניסה לבית הספר יש להמציא העתק של מסמך זה למנהל בית הספר

המסגרת שבה נערך המחקר: עבודתם האקדמית של עורכי המחקר במכון ויצמן למדע

אלה עיקרי המרכיבים של המחקר לעניין היתר זה:

הנבדקים: תלמידי כיתות י"א במגמת ביו-טכנולוגיה

הליך איסוף המידע וכלי המחקר:

1. הקלטות שמע של שיח בין תלמידים במהלך פעילויות חקר קבוצתיות בכיתת הלימוד בנושא העומד

לבדיקה

2. העברת מבחן המתמקד באוריינות חזותית, בשני מועדים - לפני ביצוע פעילויות החקר הנ"ל ומיד עם סיומן.
המידע ייאסף באופן המזהה את התלמידים הנבדקים בפני עורכי המחקר, לצורך הצלבת המידע שייאסף מהנבדק ועל אודותיו בזמנים וממקורות שונים.

הבקשה לביצוע המחקר הנ"ל נבדקה על ידי לשכת המדען הראשי ונמצאה עומדת בכל התנאים הנוגעים בדבר הקבועים בנהלי משרד החינוך לפעילות מחקרית במערכת החינוך,¹ לרבות הסכמתו של המנהל לחינוך דתי לאיסוף המידע המבוקש בבתי הספר שבמיקוחו. לאור זאת הוחלט להיתר את איסוף המידע המבוקש שלעיל בקרב תלמידי כיתות י"א במגמת ביוטכנולוגיה בבתי ספר ממלכתיים ובבתי ספר ממלכתיים דתיים בכלל הארץ.

ההיתר כפוף לכל התנאים המפורטים להלן שלקיומם אחראים עורכי המחקר והנהלת בית הספר הנוגע בדבר, אלא עם כן נקבע אחרת בתנאי עצמו:

¹ הנהלים מורסמו בחוזר המנהלת הכללית - הוראות קבע - עה/9/02, מחדש מאי 2015 ומופיעים גם באתר לשכת המדען הראשי.

מדינת ישראל
משרד החינוך
לשכת המדען הראשי

1. **הורי התלמידים המועמדים להשתתף במחקר אינם כפופים לעורכי המחקר או לכל אדם הפועל מטעמם. כמו כן, ההורים והתלמידים המועמדים ליטול חלק במחקר אינם תלויים בעורכי המחקר או בכל אדם הפועל מטעמם בכל דרך אחרת.**
2. **איסוף המידע לא ייערך בפועל על ידי בעל תפקיד בבית הספר או על ידי תלמיד הלומד במוסד.**
3. **אם איסוף המידע מתוכנן להתבצע על ידי נציגים של עורכי המחקר יהיה על הנציגים להציג להנהלת בית הספר ייפוי כוח הנוגע בדבר בחתימתם של עורכי המחקר.²**
4. **ההשתתפות באיסוף המידע לא תפגע בהכנותיהם של הנבדקים לבחינות הבגרות ובהשתתפותם בהן. האחראיות לקיום תנאי זה היא של המנהל.**
5. **תכובד זכותם של ההורים וילדם המועמד להיבדק להחליט שהתלמיד לא ישתתף באיסוף המידע המבוקש לצורך המחקר. כמו כן, תכובד זכותם של התלמידים הנבדקים להפסיק את השתתפותם באיסוף המידע בכל עת שירצו. כל זאת מבלי שהתלמיד ייפגע בעקבות החלטותיו או החלטות הוריו באופן כלשהו. את הנ"ל יבהירו עורכי המחקר לתלמידים המועמדים להיבדק לפני תחילת איסוף המידע.³**
6. **במחקר ישתתפו אך ורק תלמידים שהוריהם נתנו את הסכמתם לכך בכתובים. לצורך קיום תנאי זה תיערכנה פעולות אלה:**
 - א. **עורכי המחקר יספקו להנהלת בית הספר את הכמות הנחוצה של מכתבי הפנייה להורים (מצ"ב הנוסח של המכתב ושל כתב ההסכמה עם חותמת לשכת המדען הראשי, שאותם יש להפיץ בקרב ההורים).**
 - ב. **הנהלת בית הספר תפיץ את המכתבים הנ"ל להורים, באמצעות התלמידים.⁴**
 - ג. **ההורים אשר מסכימים להשתתפות ילדם במחקר יחזירו את כתבי ההסכמה החתומים להנהלת בית הספר בצירוף המעטפה ובה השאלון שמילאו, והיא תמסור את כתבי ההסכמה והמעטפות לעורכת המחקר ותשמור העתק של כתבי ההסכמה ברשותה.⁵**
7. **העברת המבחנים בקרב הנבדקים תיערך במסגרת כיתתית במהלך יום הלימודים בתאום עם המורה.**
8. **תלמידים שאינם משתתפים במחקר יורחקו מהמיקרופון בעת הקלטת הפעילות בקבוצות המחקר בלי שהדבר יפגע בהשתתפותם בפעילויות החקר העומדת לבדיקה.**
9. **אם בשל טעות הוקלט במהלך פעילויות החקר העומדות לבדיקה פרט המזהה תלמיד או בעל תפקיד שאינו נמנה עם הנבדקים יימחק הפרט המזהה הנ"ל מההקלטה מיד בתום הפעילות המתועדת.**

² במקרה זה יחולו על הנציגים שלעיל כל תנאי החיתור הנוגעים לפעולה המתבצעת על ידם ושנקבע כי יחולו על עורכי המחקר.

³ להורים מובהרות זכויות אלה במסגרת המכתב המופץ בקרבם.

⁴ בהעדר הסכמת ההורים אין לאפשר לעורכי המחקר נגישות לפרטים מזהים כלשהם על אודות ההורים, כולל לאלה שהיו נחוצים להם לצורך הפצת המכתב בכוחות עצמם.

⁵ המסמכים הנ"ל יישמרו על-ידי הנהלת בית הספר ובאחריותה לצמיתות במקום מאובטח

מדינת ישראל
משרד החינוך
לשכת המדען הראשי

10. **באחריותו של מנהל המוסד לקבוע את משך הזמן המרבי שניתן להקדיש לפעולות איסוף המידע בקרב התלמידים לצורכי המחקר במוסדו, ובאחריות עורכי המחקר לוודא את עמידת פעולות איסוף המידע בקרב התלמידים במסגרת הזמן המרבי שנקבעה עבורן.**
11. **בעת הכניסה לבית הספר על עורכי המחקר לשמור על הופעה ההולמת את המקובל במוסד.**

עוד יובהר כדלהלן:

- עורכי המחקר התחייבו בכתובים למי לשכת המדען הראשי:

א. לשמור בקפדנות על החיסיון של הקלטות השמע וכל יתר הנתונים המזוהים שייאספו במסגרת המחקר ולהשמיט לצמיתות את הפרטים המזוהים של הנבדקים מהנתונים שייאספו ומהקלטות השמע שבוצעו מייד עם תום עיבוד הנתונים, ובכל מקרה לא יאוחר מהתאריך 31.3.2019, במועד המוקדם מבין השניים.

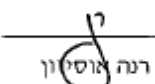
ב. לא לפרסם את ממצאי המחקר באופן שיאפשר את זיהוי הנבדקים.

- ההיתר ניתן אך ורק לאיסוף המידע במתכונת שהותרה לביצוע על ידי לשכת המדען הראשי.

- אם קיימות זכויות יוצרים בנוגע לכלי המחקר או בנוגע לתשובות או לתוצרים האחרים של הנבדקים הנוצרים במסגרת המחקר ו/או הנמסרים לעורכי המחקר במסגרתו, באחריותם הבלעדית של עורכי המחקר להסדיר את הנושא בהתאם לכל הוראות החוק/ים הנוגעים בדבר.

- אין במסמך זה משום חיווי דעה של לשכת המדען הראשי על איכותו של המחקר.

- לא נדרש היתר נפרד מטעם המחוז.


רנה אוסישון
מרכזת בכירה (בקרה ומעקב)

תפוצה:

פרופסור ענת ירדן, מכון ויצמן למדע
מר אוהד לבקוביץ, מכון ויצמן למדע
הרב דוד עצמון, מפקח תכניות לימודים במנהל החינוך הדתי
הרב זכריה טובי, אחראי על מחקרים עבור מנהל החינוך הדתי
מנהלי המחוזות

מדינת ישראל
משרד החינוך
לשכת המדען הראשי

עמוד 1 מתוך 2
י"ז טבת, תשע"ח
4 ינואר, 2018
תיק 9738 רו

היתר איסוף מידע לצורך המחקר בנושא
"אפיון רכישת ידע מדעי בקרב תלמידי תיכון המשתמשים בכלים ביו-אינפורמטיים"
בביצוע של פרופסור ענת ירדן ומר אוהד לבקוביץ'
ההיתר בתוקף החל מהתאריך הרשום לעיל ועד לסיום שנת הלימודים תשע"ט בלבד.

לצורך הכניסה לבית הספר יומצא העתק של מסמך זה למנהל בית הספר

המסגרת שבה נערך המחקר: עבודתם האקדמית של עורכי המחקר במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע

עיקרי המרכיבים של המחקר לעניין היתר זה:

הנבדקים: תלמידי כיתות י"א ו-י"ב הלומדים במגמות ביולוגיה וביו-טכנולוגיה

פעולת איסוף המידע הנוגעת להיתר זה:

הנבדקים יתבקשו לבצע מבדק ידע ממוחשב בנושא העומד לבדיקה בשני מועדים במהלך שנת הלימודים.

הבקשה לביצוע המחקר הנ"ל נבדקה על ידי לשכת המדען הראשי ונמצאה עומדת בכל התנאים הנוגעים בדבר הקבועים בנוחלי משרד החינוך לביצוע פעילות מחקרית במערכת החינוך,¹ לרבות הסכמתו של המנהל לחינוך דתי לאיסוף המידע המבוקש במוסדות החינוך שבפיקוחו.
לאור זאת הוחלט להתיר את איסוף המידע המבוקש שלעיל בקרב תלמידי כיתות י"א ו-י"ב במגמות ביולוגיה וביו-טכנולוגיה בבתי ספר ממלכתיים ובבתי ספר ממלכתיים-דתיים בכלל המחוזות.
ההיתר כפוף לכל התנאים המפורטים להלן, אשר אותם על עורכי המחקר לקיים, בשיתוף עם הנהלת בית הספר הנוגע בדבר, אלא אם כן נקבע אחרת בתנאי עצמו:

- מנהל המוסד החינוכי והתלמידים המועמדים להשתתף במחקר אינם כפופים לעורכי המחקר או לכל אדם הפועל מטעמם, לרבות בגין יחסי תלות.
- איסוף המידע ייערך אך ורק על ידי עורכת המחקר עצמה או על ידי מי מנציגיהם.^{2,3,4}
- לקראת איסוף המידע יתארו עורכי המחקר לתלמידים המועמדים להיבדק את מטרת המחקר ואת הפעולה, שבה יתבקשו להשתתף במסגרתו. כמו כן, יבהירו להם את זכותם שלא להשתתף בפעולות איסוף המידע המבוקשת וכן את זכותם של אלה שהחלו להשתתף בה להפסיק את השתתפותם באמצע, מבלי שייפגעו מהחלטותיהם בדרך כלשהי.

¹ הנתלים פורסמו בחוזר המנהלת הכללית – הוראות קבע – עז/99, מחודש מאי 2015 ומופיעים גם באתר לשכת המדען הראשי.

² בשום מקרה לא יוכל איסוף המידע להיערך בפועל על ידי מי מחברי צוות בית הספר.

³ איסוף המידע על ידי נציג של עורכי המחקר מחייב הצגה בפני המנהל של ייפוי כוח מטעמם של עורכי המחקר.

⁴ אם איסוף המידע ייערך על ידי נציג של עורכי המחקר, יחולו גם על הנציג הנ"ל כל תנאי ההיתר הנוגעים למעולה המתבצעת על ידו ושנקבע כי יחולו על עורכי המחקר.

מדינת ישראל
משרד החינוך
לשכת המדען הראשי

עמוד 2 מתוך 2

4. כלל זכויותיהם של המועמדים להיבדק ושל הנבדקים עצמם יישמרו בקפידה.
5. איסוף המידע ייערך במסגרת כיתתית במהלך יום הלימודים בתאום עם המורה.
6. הנבדקים יונחו שלא לציין לצורך המחקר כל פרט מזהה לא יתועד כל פרט מזהה לצרכיו על ידי עורכי המחקר.
7. לצורך הצלבת המידע שייאסף מאותו נבדק בשני המפגשים המתוכננים, יזינו הנבדקים למחשב בשני המפגשים הנ"ל צופן שרירותי אותו המציאו בעצמם.⁵
8. משך הזמן המרבי שיותר לאיסוף המידע לעורכי המחקר ייקבע על ידי מנהל בית הספר.
9. כלל הפעולות הקשורות למחקר ייערכו בשפת ההוראה העיקרית הנהוגה בבית הספר.⁶
10. בעת הכניסה לבית הספר על עורכי המחקר להקפיד על הופעה הולמת את המקובל במוסד.

עוד יובהר כדלהלן:

- עורכי המחקר התחייבו בכתובים לפני לשכת המדען הראשי לא לפרסם את ממצאי המחקר באופן שיאפשר את זיהוי הנבדקים.
- ההיתר ניתן אך ורק לאיסוף המידע באמצעות כלי המחקר שחוצצו לבדיקה בלשכת המדען הראשי, בנוסח ובמתכונת ההעברה שהותרו לשימוש.
- ככל שקיימות זכויות יוצרים בנוגע, לכלי המחקר או בנוגע לתשובות או לתוצרים האחרים של הנבדקים הנוצרים במסגרת המחקר ו/או הנמסרים לעורכי המחקר במסגרתו, באחריותם הבלעדית של עורכי המחקר להסדיר את הנושא, בהתאם לכל הוראות החוק/ים הנוגעים בדבר.
- אין במסמך זה משום חיווי דעה של לשכת המדען הראשי על איכותו של המחקר.
- לא נדרש היתר נפרד מטעם המחוז.

רנה אורטגון
מרכז בכירה (בקר) ומעקב

תמוז:

פרופסור ענת ירדן, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע
מר אוהד לבקוביץ, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע
הרב דוד עצמון, מפקח תכנית לימודים במנהל החינוך הדתי
הרב זכריה טובי, אחראי על מחקרים עבור מנהל החינוך הדתי
מנהלי המחוזות שלעיל

⁵ במועד המפגש הראשון יתבקש הנבדק לשמור את חקוד שהמציא במחברת הלימוד שלו, לצורך חזרת רוד זה גם במועד המפגש השני.

⁶ אם שפת החוראה איננה עברית, תאחריות לתרגום כלי המחקר והתאמתם לנוסח שהותר על ידי לשכת המדען הראשי בשפת העברית, חלה על עורכי המחקר.

