



**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  
**Haim Edri**

מאת  
**חיים אדרי**

מביאים את הנחות הפישוט לקדמת הבמה:  
פיתוח מבוסס מחקר של תכנית לימודים בפיסיקה חישובית בהקשרים כימיים וביולוגיים.

Bringing Simplification Assumptions to the Forefront in Chemical and  
Biological Physics: Research-Based Development of an Introductory  
Computational Science Curriculum.

Advisors:  
Prof. Edit Yerushalmi  
Prof. Bat-Sheva Eylon

מנחות:  
פרופ' עידית ירושלמי  
פרופ' בת-שבע אילון

July 2019

תמוז תשע"ט

## תקציר

בעולם המחקר והטכנולוגיה העכשוויים, הגבולות בין תחומי הדעת והמחקר הולכים ומיטשטשים. פיזיקה בפרט, משמשת לניתוח תופעות מורכבות במערכות מרובות חלקיקים הרלוונטיות לכימיה, ביולוגיה והנדסת חומרים, להמשגתן כמודלים מפורשים, ולחיזוי התנהגותן בכלים אנליטיים וחישוביים. מסמכי עמדה מרכזיים קוראים לשקף בצורה טובה יותר בתוכנית הלימודים של קורסי מבוא מדעיים, את העניין הגובר של מדע עכשווי בחיבור בין תחומי הדעת המדעיים, במידול מדעי, ובפרט במידול המשלב כלים חישוביים. כנגד, תוכנית הלימודים הנוכחית בבתי הספר התיכוניים אינה עוסקת בפישוט תופעות מורכבות, ואינה מציינת תלמידים בתשתית הידע המדעי ובכלים החישוביים הנחוצים לניתוח תופעות במערכות מרובות חלקיקים; ולפיכך, היא איננה מקנה לתלמידים המתעניינים במגוון תחומים מדעיים וטכנולוגיים את הבסיס האינטלקטואלי ללימודיהם ולעיסוקיהם המקצועיים בעתיד.

התוכנית החדשנית "מדע חישובי בינתחומי: פיסיקה כימית וביולוגית" (להלן, מ"ח בינתחומי) פותחה בשיתוף פעולה בין המחלקה להוראת המדעים, המחלקה לפיסיקה ביולוגית וכימית ומכון דוידסון לחינוך מדעי במכון ויצמן, במטרה לתת מענה לקריאות מסמכי העמדה. זוהי תוכנית תלת שנתית (י'-י"ב), המיועדת לתלמידי תיכון מוכשרים ומתעניינים, מתקיימת ככיתה על אזורית בקמפוס מכון דוידסון ברחובות ובאוניברסיטת חיפה (עבור המגזר הערבי), ומוכרת על ידי משרד החינוך כמקצוע מדעי המעניק 5 יחידות לימוד מדעיות. התוכנית משלבת הקנייה של התשתית המושגית הנחוצה לניתוח תופעות מורכבות במערכות מרובות חלקיקים במדע בינתחומי, ומשלבת עבודה פרויקטנטית הנותנת מענה לצורך של תלמידים אילו בבעלות ואוטונומיה בהתמודדות עם בעיות מורכבות. באופן מסורתי, מוצגת התשתית המושגית בקורסים מתקדמים לתואר ראשון ולתארים מתקדמים. האם וכיצד ניתן לעצב תכנית לימודים וסביבת למידה לקורס מבוא, שעניינו מידול פיסיקלי של תופעות מורכבות במערכות מרובות חלקיקים? בספרות מוכרות כמה תכניות לימוד שמטרתן לתת מענה לאתגר הזה, במסגרת קורסי מבוא בפיזיקה; אחדות מהן מופעלות בהצלחה במגוון אוניברסיטאות. תוכניות אלו מציגות רצף לימודי להוראת תרמודינמיקה סטטיסטית ברמת קורס מבוא, וחלקן אף מקנות כלים חישוביים; אלא שהן אינן מדגישות את תהליך הפישוט והמידול של תופעה מורכבת במערכת מרובת חלקיקים, ואינן מגיעות לניתוח היווצרות מבנים בחומרים. התוכנית מ"ח בינתחומי נבנתה על סמך תוכניות חלוץ אלו במטרה לתת מענה להיבטים החסרים.

עבודה זאת מתמקדת בעיצוב מבוסס מחקר של היחידה הראשונה בתוכנית מ"ח בינתחומי, הנקראת "דינמיקת חלקיקים", הנלמדת לאורך שנת לימודים אחת (כיתה י') ומתחשבת בידע המצומצם עימו מגיעים התלמידים מחטיבת הביניים. ביחידה זו תלמידים עוסקים בבניית סדרה של מודלים חישוביים עבור תנועה בראונית ודיפוזיה. ניתוח ההתפתחות בזמן של מסלולי חלקיקים מתבצע בסקלות מרחב וזמן שונות במידול גס ועדין (coarse-grained and fine-grained modeling). הנחות הפישוט בסקלות הזמן והמרחב השונות מסייעות להבהיר ולהצדיק את המעבר ממודל דטרמיניסטי לתנועת חלקיקים בריק (המתבסס על ידע מוקדם של תלמידים במכניקה ניוטונית), למודל אקראי עבור תנועת חלקיקים קולואידיים בממס. מהלך ההוראה מחזין את שלב הפישוט בבניית המודלים, ומאתגר תפיסות נאיביות של תלמידים לגבי מודלים מדעיים. השימוש בכלים חישוביים מאפשר לתלמידי תיכון לחקור את התנהגותן של תופעות במערכות מרובות חלקיקים, ולבנות עבורן מודלים חישוביים בכוחות עצמם, שכן מידול אנליטי של תופעות מורכבות כאלה מצריך ידע מתמטי מתקדם, שאינו בהישג ידם.

המחקר המוצג בעבודה זו מורכב משני חלקים: החלק הראשון מתמקד בהערכה מעצבת, שליוותה את פיתוח תכנית הלימודים, במספר גרסאות שלוטשו במהלך שלושה מחזורי הפעלה. החלק השני כולל מחקר עיצובי, הבוחן את תפיסות התלמידים לגבי מידול מדעי שנוצרו במהלך האינטראקציה שלהם עם הגרסה המגובשת של תוכנית הלימודים. המחקר חושף כיצד תלמידים מבחינים בין ההליך החישובי, העקרונות הפיסיקליים, וההמשגה האפיסטמית (בפרט הנחות פישוט), בהקשר של מערכות של שני חלקיקים ומערכות מרובות חלקיקים.

למחקר תרומה מתודולוגית ותיאורטית. התרומה המתודולוגית כוללת מערכת של קטגוריות שפותחה בהתאם לתפישות מומחים ושיכולה לשמש כלי לניתוח של: סוגי מוטיבציות להנחות פישוט; מרכיבי הנחות הפישוט; ופישוט הליך הפתרון. התרומה התיאורטית מתייחסת לניתוח נתונים שנאספו באמצעות מבחן אמצע וראיונות עם תלמידים על פרויקט הגמר שלהם. הניתוח מאפיין את תפישות התלמידים ובוחר את האופן שבו הם מתייחסים להנחות הפישוט ומשתמשים בהן, לאחר שלמדו במהלך השנה תכנים המשלבים ידע פיזיקלי, תכנות ומידול מדעי. הממצאים מראים שלפחות חצי מהתלמידים שהשתתפו בתוכנית הצליחו בסוף השנה לפתח תמונה עשירה ומורכבת של הליך הפישוט הכוללת המשגה של מטרות המידול ביחס לתופעה; שימוש בסקלות זמן בכדי לאפיין את המודלים; והבנה של המאפיינים המרכזים במידול גס ועדין. מחקר זה מצביע על כך שתלמידי תיכון מוכשרים המתעניינים במדעים, יכולים לפתח תפישות של פישוט המתקרבות לאלה של מומחים, הכוללות תפישה של מידול גס ועדין.