

# התוכן

פתח דבר  
לידתה של הבנה  
7

פרק ראשון  
אבולוציה  
הופעתה של המורכבות  
13

פרק שני  
דנ"א  
רציונליזציה של הביולוגיה  
62

פרק שלישי  
אנרגיה  
מציאת המטבע האוניברסלי  
109

פרק רביעי  
אנטרופיה  
המפתח לשינוי  
140

פרק חמישי  
אטומים  
הרדוקציה של החומר  
173

פרק שישי  
סימטריה  
כימות היופי  
207

פרק שביעי  
קוונטים  
פישוט ההבנה  
255

פרק שמיני  
קוסמולוגיה  
גלובליזציה של המציאות  
299

פרק תשיעי  
מרחב־זמן  
זירת הפעילות  
345

פרק עשירי  
אריתמטיקה  
גבולות ההיגיון  
393

אחרית דבר  
עתיד ההבנה  
446

לקריאה נוספת  
455

הבעת תודה  
460

מפתח  
463

# לידתה של הבנה

מדוע אצבעו של גלילאו? גלילאו מציין נקודת מפנה, נקודת זמן שממנה פנה המאמץ המדעי בכיוון חדש, שבה התנערו המדענים – מונח אנכרוניסטי כמובן לתקופה – מן הכורסה הנוחה, תהו על יעילות הניסיונות הקודמים לתפוס את טבע העולם באמצעות מחשבה והפעלת סמכות, וצעדו צעדים מהוססים ראשונים בנתיבו של המדע המודרני. בתהליך זה העזו לדחות את קביעותיהם שלא עמדו במבחן של בעלי הסמכות, ואף אם טרם השתחררו לחלוטין מהשערות הכורסה ומההתבוננות הפנימית, הרי שעיצבו ברית חדשה ורבת עוצמה עם שיטת התצפית הניסויית שהכול יכולים לאמתה. בהיבט הזה של אצבע גלילאו יכולים אנו להבחין כשהיא רוחשת בכל תבשיליו של המדע העכשווי. אנו רואים אותה בפזיקה שבה החלה לבחוש לראשונה; בכימיה שאליה מצאה את דרכה בראשית המאה ה-19; וגם בביולוגיה, במיוחד מאז חדלה הביולוגיה להיות רק מקור לפליאה, במהלך המאות ה-19 וה-20.

בקצרה, בספר זה נחגוג את יעילות אצבעו הסמלית של גלילאו בתהליך פיענוח האמת. העובדה שרק אצבע פיזית אחת השתמרה ואילו צאצאיה של שיטתו משגשגים, גם היא סמלית לקיומנו האישי בן-החלוף לעומת נצחיותו של הידע בן-האלמוות. אצבע גלילאו מייצגת אפוא אותו מושג מעורפל – "השיטה המדעית". גלילאו כמובן לא היה בודד בגישתו זאת לגילוייו של הידע, אף לא הראשון, אך די בשיעור קומתו בתולדות הרעיונות שיהיה זה מן ההגיון לאמץ אותו כסמל של הנהגתה. אחד ההיבטים של שיטה מדהימה בעוצמתה

זו, לחשיפת האמת על העולם, המבדילה את המדע מן המתחרה העיקרית – ההשערה המרשימה בניסוחה אך עקרה בסופו של דבר – הוא מרכזיותו של הניסוי. היציאה אל העולם ועריכת תצפיות בתנאים מבוקרים ובדקדקנות ממזערת ככל שניתן את הרכיב הסובייקטיבי בתפיסתנו וחושפת את התצפיות, לפחות עקרונית, לבחינה ציבורית. גלילאו פיתח גם את אמנות הפישוט, את בידודו של המהותי בבעיה הנתונה, את החדירה המחשבתית מבעד לעננים המסתירים בכל מערכת מציאותית את הפשטות שביסוד הדברים, ממש כפי שבטלסקופ הממשי שבנה צפה אל מעבר לעננים וראה את מורכבות השמים. הוא רחה לצדדים את העגלה החורקת הנגררת בכוץ, ובחר להתבונן בפשטותו של כדור המתגלגל במורד מישור משופע, בתנודותיה של מטוטלת המתנודדת על חוט ארוך. בידוד כזה של לב התופעה מכל החריקות והבלבול העוטפים אותה במציאות הוא רכיב מפתח בשיטה המדעית. המדען האמיתי רואה את הפנינה שבצדף את היהלום שבכתר.

יהיו כמובן מי שיטענו שכאן נעוצה חולשה מהותית. הבנה אמיתית, יטענו, תבוא רק מתוך הרעש וההמולה של המציאות: העגלה התקועה בכוץ, האוהב המקונן על אוכתו, העפרוני הממריא. העובדה שמדענים חוקרים פרפר כדי להבין את מנגנונו, יטענו, היא הכחשה עצמית של ההבנה. את הביקורת הזאת עלינו לבחון בפרספקטיבה, ולא לדחותה כלאחר יד. רוב המדענים, בהיותם בני אדם, מסכימים שרגשות הם מרכיב נפלא ביחסי הגומלין שלנו עם העולם, אך רק מעטים יסכימו שהם דרך אמינה להשגת האמת. הם מעדיפים להתיר את המורכבות העצומה של העולם, לבחון בכל פעם פיסה מבודדת אחת שלו, ואז לבנותו מחדש, כמידת יכולתם, מתוך הבנה עמוקה יותר. הם חוקרים את התנהגותו של כדור על מישור משופע כדי להבין את העגלה במורד הגבעה; הם חוקרים את המטוטלת כדי להבין את תנודת רגלו של האתלט. מתנגדיהם יזעקו כאן שהבנת הפיזיקה של התנודות אינה זורעת אור על חדרות המוסיקה וכי פירוקה של סימפוניה לערימה של תווים הורסת את הבנת הקומפוזיציה. תשובתו של המדען היא שתחילה עלינו להבין מהי מהותו של תו, אחר כך לנסות ולהגיע

להבנה מדוע אקורדים מסוימים נעימים לאוזנינו ואחרים דיסוננטיים, ורק אחר־כך – אולי רק כעבור עשרות שנים – לנסות ולהבין את השפעתה הפסיכולוגית והאמנותית של סדרת אקורדים. המדע שואף להבנה יסודית ומעמיקה. לעולם אינו מסיר את מבטו מן המטרה הסופית אך גם אינו נחפז לרוץ אליה בטרם הבשילה. האם יגיעו אי־פעם המדענים להבנת החרווה שבתפיסתנו את העולם, את ההנאה בהתנהלות חיינו בתוכו וכל שאר השאלות הגדולות שהפילוסופים, האמנים, הנביאים, והתיאולוגים רואים בהן את תחום השיח השמור להם הוא עניין להשערות סרק. וכולנו יודעים עד כמה מועילות היו אלה בעבר.



באומרי רעיון גדול, כוונתי היא למושג פשוט המגיע רחוק, גרעין של רעיון שאילן רחב צמרת של יישומים מסתעף ממנו, רעיון־עכביש המסוגל לטוות רשת נרחבת וללכוד באמצעותה שפע של הסברים. נאלצתי להיות בררני, ואין לי ספק שאחרים היו מגיעים לעכבישי־על אחרים שמצדם היו לוכדים זוכי מדע עסיסיים שונים. אולם זאת הבחירה שלי.

התרכותי ברעיונות ולא ביישומים. כתבתי מעט על חורים שחורים ועל מסעות בחלל, וכמעט שלא כתבתי מאומה – מלבד באחרית הדבר ובמבט לאחור – על השינוי הנפלא בפרדיגמות ההסבר שאנו חווים ממש כעת בדמות טכנולוגיות המידע והמחשוב. מטרתי הייתה לזהות את הרעיונות המבהירים את ההתקדמות הטכנולוגית ובמרבית המקרים גם משמשים לה בסיס. צאצאו האינטלקטואלי עתיר הדמיון של גלילאו, פרימן דייסון (Dyson), מבחין בין מדע מונע־מושגים לבין מדע מונע־מכשירים. הדיון שלי הוא, כמעט כולו, מונע־מושגים. בהבחנתו זאת של דייסון מהדהדים דבריו של הוגה דעות נכבד אחר, פראנסיס בייקון (Bacon), שסיווג את הרעיונות לכאלה שהם נושאי פירות (fructifera) וכאלה שמחוללים הארה (lucifera). אני התרכזתי באחרונים. השאלה אם הביולוגיה המולקולרית וכל הנובע

מידיעת מבנהו של הדנ"א משתייכים למחוללי האור או לנושאי הפירות, והאם הם מונעי־מושגים או מונעי־מכשירים, ומכאן האם צריכים הם להיכלל כאן, הם עניינים שניתן לדון בהם. אני בחרתי באפשרות הראשונה, מפני שאין עוד תגלית שתרמה תרומה גדולה כל כך להבנתנו בכיולוגיה וליישומה, והיה זה בלתי סביר במידה קיצונית שלא לכלול אותה. בכיולוגיה המולקולרית אנו רואים אולי את מיוזגם של מחוללי האור ונושאי הפירות למדע בעל דינמיות שלא היה לה תקדים.



תיאור מדעי אינו דומה לקריאת סיפור עלילה שבו האירועים נפרשים בפשטות בזה אחר זה. כדי להבין רעיון מדעי תצטרכו אולי לקרוא פעם אחת במהירות, לדלג על הקטעים הנראים תובעניים מדי או (ישמרני האל) משעממים מדי. ואכן, אף שסבורני כי ישנם רצפים טבעיים של הצגת הדברים, כמו טיפוס מאפלולית היסודות אל אור היום של המופך או חתירה מן המוכר למטה אל הבסיסי (אני אימצתי את הגישה האחרונה), פרקי הספר פחות או יותר בלתי תלויים זה בזה וניתן לקוראם בכל סדר שתחפצו.

ההיבט השני שיש לזכור הוא מגמת ההפשטה המתמשכת המאפיינת את המדע המודרני. הפשטה היא עוד היבט חשוב של אצבע גלילאו, ועלינו להיות קשובים לתפקיד שהיא ממלאת ולחשיבותה. ראשית, הפשטה אין פירושה דבר חסר תועלת. להפשטה יכולה להיות משמעות מעשית עצומה מפני שהיא מצביעה על קשרים בלתי צפויים בין תופעות ומאפשרת שימוש ברעיונות שפותחו בתחום אחד גם בתחום אחר. אך חשוב מכל, הפשטה היא האופן שבו אנו מתרחקים מעט מאוסף של תצפיות ומתבוננים בהן בהקשר רחב יותר. אחד מרגעי ה"אָאוּרְקֶה!" המספקים ביותר במדע, וגם בקריאה על מדע, היא החוויה דמוית זו שחווה קורטז כשראה את האוקיאנוסים מתמזגים לשלמות כוללת אחת, וההכרה בקשר שבין תופעות שנדמו עד כה נבדלות לחלוטין. כוונתי היא לקחת אתכם למסע אל פסגותיו

הנישאות של המדע שם נוכל לחוות את הסיפוק העצום של התמזגויות אלה, ובמהלך המסע נחשוף בהדרגה את ההנאה שבהפשטה ההולכת וגדלה. לכן אתחיל בקופים ואפונים, נעבור על פני האטומים לעבר היופי אחר־כך דרך המרחב־זמן ולבסוף נעפיל אל הפסגה מלאת ההוד של שיא ההפשטה, המתמטיקה. אם תקראו את הפרקים כסדרם, תגלו שכל פרק נוסף יעמיק את הבנתכם בנאמר לפני כן.



אנו עומדים לצאת לדרך למסע מאתגר שיעניק לנו בסופו של דבר סיפוק עמוק. המדע הוא פסגתה של רוח הרנסאנס, עדות יוצאת דופן לרוח האדם ולעוצמתה של יכולת ההבנה של המוח האנושי הדל. תקוותי העיקרית היא כי עם התקדמות מסענו, שבו אוביל אתכם בזהירות אל פסגת ההבנה, תחוו את חדות ההארה העמוקה שרק המדע לבדו יכול להעניק.