

# תכנון מנגנונים אלגוריתמי



## מאת פרופ' נעם ניסן

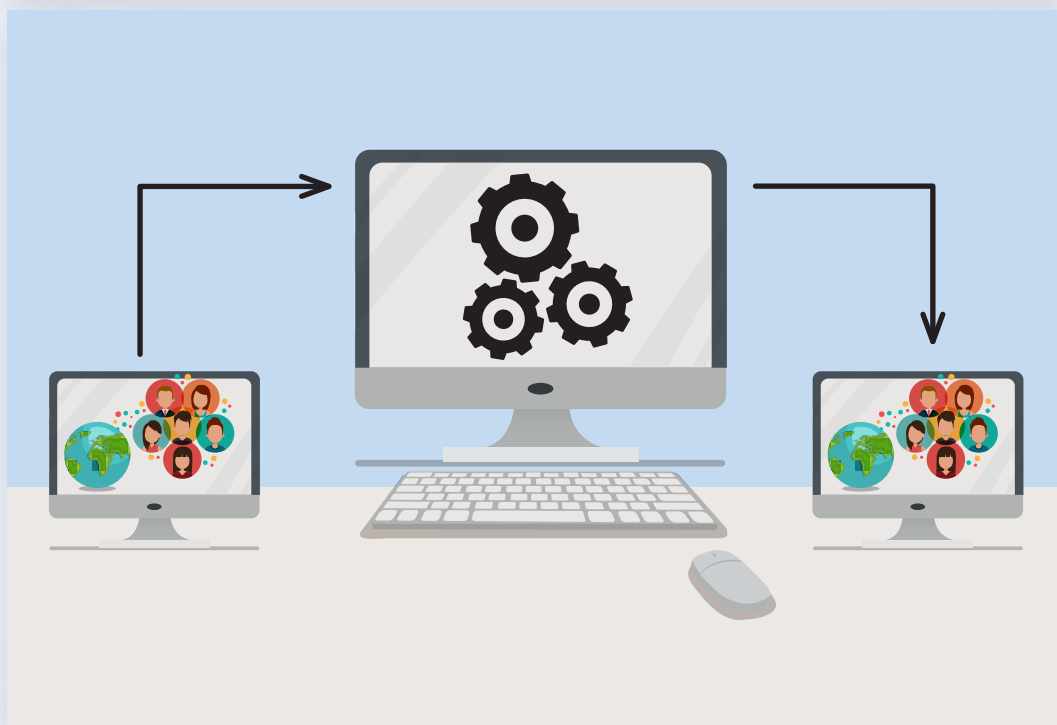
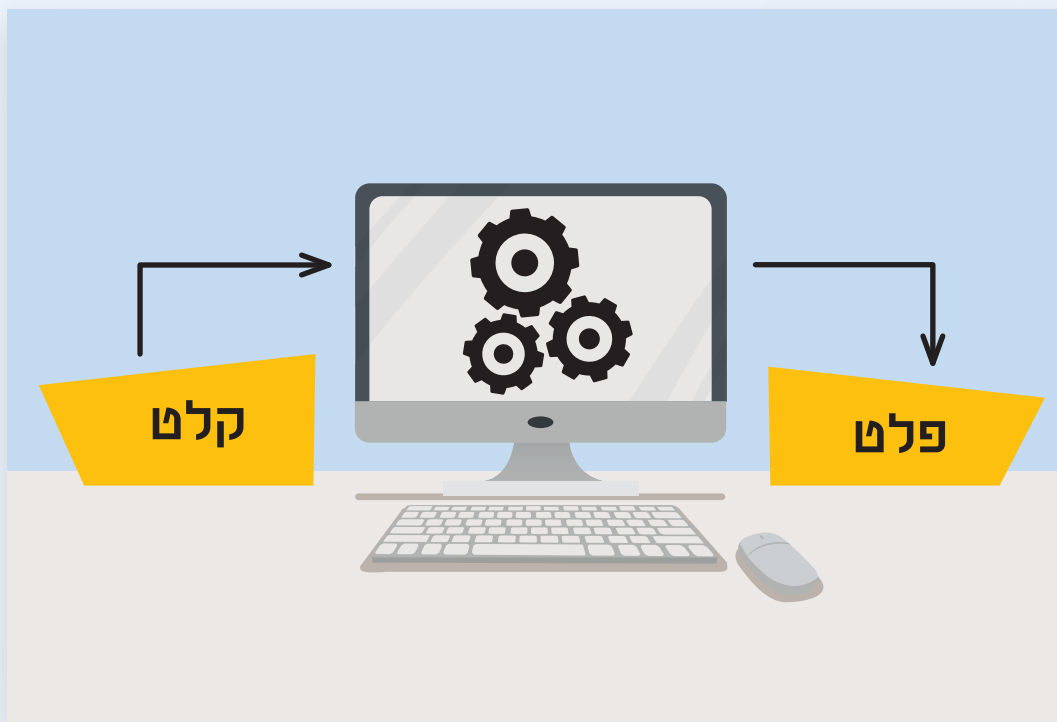
### מה השתנה במאה העשרים ואחת?

במהלך שני הדורות האחרונים, ובייחוד מאז "התפוצצות" האינטרנט בעשור האחרון של המאה העשרים, הלכה וגדלה השפעתם של מחשבים על חיינו עד שניתן לומר שכיום, במאה העשרים ואחת, כמעט כל דבר אנושי מחובר למחשבים. לא רק שמחשבים שינו את אופיים של עולמות התעשייה והעסקים, המדע והרפואה, המלחמה והפוליטיקה, החינוך וההוראה ועוד, אלא שהם גם משפיעים על היבטים רבים של חיינו האישיים, כולל דרך ההתקשרות שלנו עם חברינו ועם משפחתנו, דרכי הבילוי שלנו את זמננו הפנוי, ואף את הדרך לפגישת בני או בנות זוג.

השפעתם העצומה של מדעי המחשב כיום על חיינו מאלצת את מדען המחשב להסתכל אל מעבר לשאלה הצרה של כיצד לחשב פלט רצוי מתוך

### מבוא: מדעי המחשב במאה העשרים

תחום מדעי המחשב נוצר במאה העשרים. שורשיו התאורטיים נעוצים בתחום הלוגיקה המתמטית של החצי הראשון של המאה העשרים, ובייחוד בעבודתו של אלן טיורינג, שביססה את המודל התאורטי לחישוב שעד היום משתמשים בו. סביב תאוריה זו התפתח גם מדע מעשי רחב היקף שעד ליום זה מרוכז בארכיטקטורת המחשב שהציע ג'ון פון נוימן באמצע המאה העשרים. באופן גס ניתן לומר שמדעי המחשב של המאה העשרים התרכזו בשאלה של הוצאת פלט רצוי מקלט נתון: איך אפשר לחשב מתוך קלט נתון  $X$  פלט רצוי  $f(X)$ ? עבור אילו פונקציות  $f$  בכלל ניתן לעשות זאת? כמה זמן חישוב יידרש לכך? כיצד ניתן לשפר את יעילות החישוב? איך נתכנת זאת באופן נוח ובטוח? כיצד נבנה מחשבים שיעשו זאת בדרך המהירה והחסכונית ביותר? וכן הלאה.



איור 1. (למעלה) מיקומו של החישוב באופן קלאסי: מקלט לפלט  
איור 2. (למטה) מיקומו של החישוב בעידן המודרני: הקלט מגיע מהעולם ומבני האדם שבו, והפלט משפיע עליהם.

באנשים או בגופים רציונליים (לפחות במידת־מה), ניתן להניח שהאנשים המשתמשים במערכת מחשבים שמשפיעה על חייהם לא בהכרח ידווחו למערכת את ה"אמת" אלא יכניסו כקלט למערכת מה שהם חושבים שיועיל להם. לדוגמה, אדם הקונה מוצרים בחנות מקוונת כלשהי ועולה השאלה: "כמה תהיה מוכן לשלם עבור החולצה הזו?" מן הסתם הוא לא יכניס כתשובה למערכת את הסכום המרבי שאותו הוא היה מוכן תאורטית לשלם אלא דווקא את הסכום המינימלי שהוא חושב שהחנות – סוכני המכירות שלה או התוכנה שמריצה את המערכת – תסכים למכור לו תמורתו את החולצה. כלומר, התורה עוסקת במצבים שבהם הקלט מגיע מגורמים שהתנהגותם "אנוכית" או "רציונלית" אך לא "כנה".

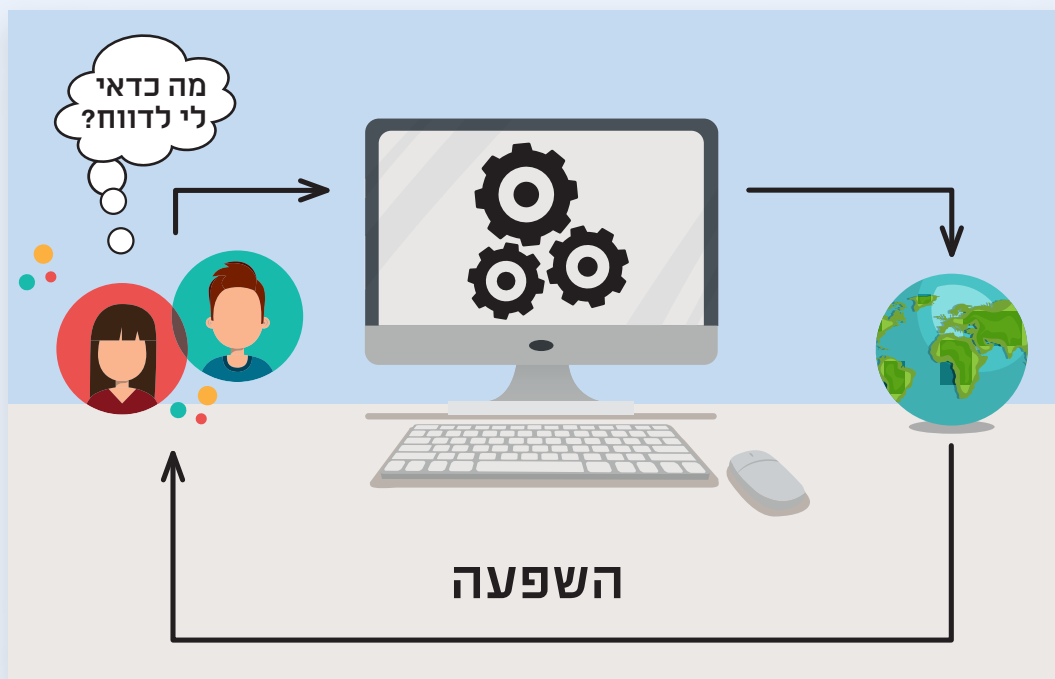
מצבים כאלה נפוצים מאוד באינטרנט. סוג ראשון של דוגמאות הוא כל פעילות מסחרית או עסקית אנושית המיושמת במערכות חישוב, למן חנויות מקוונות דרך מערכות הזמנה ושיבוץ אלקטרוניות ועד מנגנונים מסובכים למסחר בין חברות שיכולים לכלול אלמנטים מורכבים של הגשת הצעות, מכרזים, חוזים ועוד. מובן שבמצב של מסחר כל אחד מהמשתתפים מעוניין בעסקה הטובה ביותר מבחינתו, וכל פיסת מידע שיעביר משתתף זה למערכות המסחר תיבחר כדי להשיא את התועלת עבורו. סוג שני של דוגמאות מגיע מעצם פעולת המערכות הממוחשבות השונות שלמעשה "מפעילות" את רשת האינטרנט. מערכות אלו בנויות ממגוון שיתופי פעולה בין המחשבים השונים שמהם מורכבת רשת האינטרנט, העובדים לפי מגוון פרוטוקולים. על פרוטוקולים אלו להביא בחשבון את העובדה שכל מחשב ברשת שייך לגוף אחר, גוף שמן הסתם יפעיל עליו את התוכנה האופטימלית לבעלים – לא בהכרח לרשת בכללותה. על הפרוטוקולים להבטיח שגם בתנאים אלה של התנהגות אנוכית תמשיך המערכת בכללותה לתפקד היטב.

קלט נתון בצורה הטובה ביותר. עליו להתעניין גם בהקשר הרחב של אותם קלט ופלט. מאין מגיע הקלט הזה? האם הוא אמין או מוטא בצורה כלשהי? האם איסופו פוגעני במובן כלשהו, למשל האם הוא פוגע בפרטיות? מה ייעשה בפלט הזה? כיצד ישפיע על בני אדם? האם השפעה זאת רצויה או מוסרית, לדוגמה האם היא מפלה? האם באמת זה מה שאנו רוצים לחשב בהתחשב בהקשר החברתי? כיצד נסביר את התוצאות לאנשים המושפעים? מי ישלוט על כל זה?

מדעני המחשב אינם יכולים לברוח משאלות כאלו בה במידה שמתכנני מכוניות אינם יכולים לברוח משאלות הנוגעות לבטיחות הנוסעים ברכב ולנוחותם או למצב הכבישים, לחוקי התנועה ולהתנהגות הולכי הרגל. בהקשר של מדעי המחשב שאלות כאלו משלבות בצורה הדוקה את השאלות האלגוריתמיות והטכניות הנוגעות לחישוב עם שאלות חברתיות רחבות הנוגעות להשפעות החישוב. לעיתים קרובות לא ניתן לפצל את השאלה ולהפריד בבירור את ההיבטים הטכנולוגיים־מתמטיים מאלו החברתיים, ובמקרים אלו אין מנוס מלטפל בשני ההיבטים במשולב, דבר שדורש יצירת תחום דעת משולב. אכן, בעשור האחרון או בשניים האחרונים אנו רואים עוד ועוד תחומי מחקר המשלבים את מדעי המחשב עם תחומי דעת נוספים, כגון רפואה חישובית, אתיקה בחישוב, פרטיות בחישוב, כלכלה ומחשבים, משפט ומחשבים ועוד.

### תורת תכנון המנגנונים האלגוריתמי

תורת תכנון המנגנונים האלגוריתמי (Algorithmic Mechanism Design) מתמקדת בהיבט אחד של ההקשר האנושי של החישוב: העובדה שהקלט לחישוב מגיע מבני אדם (או מגופים אחרים) שלהם אינטרסים ורצונות משלהם. מכיוון שמדובר



איור 3. מיקומו של החישוב בתכנון מנגנונים אלגוריתמי: הקלט מגיע מגופים שיש להם אינטרס בפלט.

שלו באמצעות התבוננות בבעיה הבסיסית ביותר בתחום, זו של מכירת מוצר יחיד. אנו נתבונן בבעיה הזאת: מוכר יחיד (נניח הממשלה) מחזיק במוצר יחיד (נניח תמונה) ומעוניין למכור אותו לאחד מכמה קונים אפשריים (נניח מוזאונים). לשם הפשטות אנו מניחים שלמוכר אין כל עניין במוצר, ואילו הקונים מוצאים בו ערך, כלומר הם יכולים להפיק תועלת מסוימת מהמוצר, ויתר על כן, כל קונה יכול לכמת את אותו ערך במונחים כספיים. לדוגמה, לכל מוזאון יש תחזית אמינה מה תהיה תוספת ההכנסות שלו ממבקרים אם יציג את התמונה אצלו. נוסף על זה נניח שהמוכר אינו חושב על הרווח שלו מהמכירה אלא פועל לטובת החברה ככלל ומעוניין למכור את התמונה לאותו מוזאון שהערך שלו מהתמונה הוא הגדול ביותר. מובן שיש מכרזים שבהם הנחות אלה אינן תקפות. לדוגמה: אם הקונים אינם יכולים לכמת כספית את הערך שלהם או אם תקציבם מוגבל או אם המוכר

לקראת סוף שנות התשעים של המאה הקודמת הציעו חוקרים שונים ממגוון תחומים ממדעי המחשב ומכלכלה גישות שונות לטיפול במצבים כאלה. ב-1999 הצעתי, ועימי תלמיד הדוקטורט בהנחייתי אמיר רונן, מודל מתמטי מסודר לטיפול בסוגיות כאלה שמשלב את תורת האלגוריתמים הקלאסית עם תחום בכלכלה ובתורת המשחקים שנקרא "תכנון מנגנונים" וקראנו לתחום המשולב "תכנון מנגנונים אלגוריתמי". מאז אומצה נקודת המבט המשולבת הזאת על ידי קהילה רחבה של חוקרים, ותחום המחקר המשולב התפתח הן מבחינה תאורטית והן מבחינת השפעתו בפועל על המוצרים של חברות האינטרנט הגדולות.

### כל התורה על רגל אחת: מכרז מחיר שני

אף שתחום תכנון המנגנונים הוא רחב ומתוחכם מתמטית, ניתן להסביר בפשטות יחסית את הליבה

המוגזם, והתועלת שיקבל מהמוצר לא תוכל לפצות אותו על התשלום המופרז, ולכן בסך הכול יצא מופסד. מנגד, עולה הבעיה הזאת: כדאי לקונים דווקא להמעיט בערך המוצר עבורם. במקרה שבו קונה יצהיר את ערך המוצר האמיתי עבורו, גם אם יזכה, ייאלץ לשלם את אותו הערך שיקבל מהמוצר, ולכן התועלת הכללית שלו תהיה אפס. במקרה של מכרז מחיר ראשון כל קונה ינסה למעשה לנחש את הערך הנמוך ביותר שיוכל להצהיר ועדיין לזכות בזכותו. ניחוש זה אינו פשוט, שכן גם הוא דורש הערכת הערכים של הקונים הפוטנציאליים האחרים, ואף יותר מזה, התחשבות באסטרטגיה שלהם, שגם לפיה יהיה מן הסתם ניסיון להכריז ערך נמוך מהערך האמיתי לפי הערכות שלהם, שבתורן תלויות גם באסטרטגיה של הקונה שלנו, וחוזר חלילה. אכן, במקרה השכיח שבו לקונה אין מידע מלא על הערכים של הקונים האחרים אלא רק על הערך שלו, קשה מאוד לקונה להכריז הכרזה מושכלת במכרז מחיר ראשון, ולכן גם אין כל ביטחון שהקונה שלו הערך הגבוה ביותר הוא שיצהיר את הערך הגבוה ביותר.

הינה פתרון מפתיע בפשטותו שהגה, בשנות השישים של המאה העשרים, הכלכלן ויליאם ויקרי, שגם זכה בפרס נובל, במידה רבה על תגלית זאת ועל הבנת העקרונות הכלליים שנגזרים ממנה. ויקרי הציע מנגנון של "מכרז מחיר שני", שבו כל קונה מצהיר על הערך של המוצר עבורו. הזוכה הוא מי שהכריז את הערך הגבוה ביותר, אך ה"טוויסט בעלילה" הוא שכאן הזוכה לא ישלם את הערך שהצהיר אלא דווקא את הערך השני בגובהו שהוצהר. כלומר, למעשה התשלום של הזוכה הוא הערך שהצהיר המפסיד הגדול ביותר. כלל זה נראה משונה ביותר, וממבט ראשון לא ברור כלל מה היתרון שבו. אך התכונה הקריטית של מכרז זה היא: זמן תמיד כדאי לכל קונה להצהיר את ערכו האמיתי. במכרז מחיר שני לעולם לא יוכל קונה בעל ערך

מתעניין ברווח שלו ולא בתועלת הכללית. למרות זאת המודל הפשוט שלנו מתאים למקרים רבים, ובייחוד הוא מעניין אותנו ככלי פדגוגי שמטרתו להציף את הנקודה המרכזית. השאלה היא כיצד נתכנן מנגנון מכירה כזה.

ליבת הקושי כאן היא שכל קונה יודע מהי התועלת שיפיק מהמוצר אך למוכר אין המידע הזה. לו היה המוכר יודע את ערך המוצר עבור כל קונה, הוא פשוט היה נותן אותו – בחינם – לאותו קונה שיפיק את התועלת הרבה ביותר, ובכך היה משיג את המטרה שהגדרנו בצורה פשוטה ומושלמת. הפתרון הראשון שניתן לחשוב עליו הוא פשוט: אם המוכר איננו יודע מהן התועלות של המוצר לקונים, שישאל אותם, וברגע שיקבל את המידע הדרוש, ייתן את המוצר לקונה שיפיק את התועלת המרבית, כמו שנאמר לעיל. הבעיה בפתרון זה היא בדיוק בחוסר הכנות של הקונים: כל קונה מבין שכדי שהוא יהיה הזוכה, עליו להגזים בתועלת המוצר שעליה הוא מדווח. לכן כל קונה לא יציין בדיווחו את הערך האמיתי של המוצר אלא הגזמה כלשהי. עד כמה כדאי להגזים? יותר מההגזמות של האחרים. מכיוון שאין כל סיבה לקשר בין ההגזמה של קונה לתועלת האמיתית שלו, אין כל סיבה לחשוב שבדרך פלא דווקא הקונה שלו באמת הערך הגבוה ביותר הוא שיזכה.

אנו כבר רואים – מה שדי ברור אינטואיטיבית – שכדאי לדרוש תשלום מהקונה, שאם לא כן קשה לראות כיצד ייווצר קשר בין ערך המוצר מבחינתו של הקונה להכרזתו. הפתרון הטבעי הוא מנגנון שנקרא "מכרז מחיר ראשון": על כל קונה להצהיר את ערך המוצר עבורו, והזוכה במכרז יהיה הקונה שהצהיר את הערך הגבוה ביותר, והוא יידרש לשלם את הערך שהכריז. לא יהיה כדאי אפוא לקונים להגזים בערך המוצר, שכן אם קונה יזכה בגלל הגזמה כלשהי, הוא ייאלץ לשלם את המחיר

אלא איזושהו ערך  $Y$  שכדאי לו. הפתרון הבסיסי של תחום תכנון המנגנונים האלגוריתמי הוא לתכנון פונקציית תשלום  $P$  ולדרוש מכל משתתף לשלם את התשלום הזה. לב העניין הוא לדאוג שפונקציית התשלום הזו תבטיח שתמיד יהיה כדאי לכל משתתף להצהיר את ערך  $X$  האמיתי שלו ולא כל מינפולציה  $Y$  אחרת. מסתבר שהתובנות שניתן להפיק מהמכרז מחיר שני הפשוט שראינו לעיל מאפשרות לנו לעשות "פלא זה" במגוון מקרים חשובים, שוב תוך כדי שימוש בניתוח מתחום תורת המשחקים.

האתגרים המיוחדים שמייחדים את תחום תכנון המנגנונים האלגוריתמי מתחום תכנון המנגנונים הקלאסי בכלכלה נובעים בייחוד מהמורכבות של אותן פונקציות  $f(X)$  שאנו פוגשים בהן בקונטקסטים חישוביים. ברוב המקרים מדובר בבעיות אופטימיזציה בעלות מספר רב של משאבים ואילוצים קומבינטוריים מורכבים הנגזרים מאופי הבעיה החישובית שבבסיסן. לכך נדרש גם השילוב של מדעי המחשב עם תורת המשחקים. אתגרים נוספים נובעים פשוט מתכונותיהם של השימושים שאנו רואים במערכות מחשבים, כגון כמויות המידע העצומות. התחום עודנו בתנופת מחקר, ובעיות רבות עדיין דורשות תשובה. ■

כלשהו להרוויח מאיזושהי מינפולציה – מהצהרה שאינה הערך האמיתי. זהו משפט מתמטי שניתן להוכיחו בקלות יחסית, וההיגיון שבו הוא כזה: כל הצהרה כוזבת שתגרור זכייה של הקונה שלנו לא תשנה את המחיר המשולם, שכן מחיר זה נקבע על ידי התחרות והוא אינו תלוי כלל בהצהרתו של הזוכה. ברגע שלמכרז יש התכונה הזאת, והקונים מודעים לכך, אין להם כל סיבה לבצע מינפולציות בהצהרות, ולכן יצהירו את הערכים האמיתיים אשר לפיהם יחלק המכרז את המוצר, ובכך יממש את מטרתנו המקורית.

### ואיך זיל גמור

מסתבר שהעקרונות שבבסיס מכרז מחיר שני ניתנים להכללה רחבה מאוד. תחום המחקר שנקרא "תכנון מנגנונים", שהוא תת-תחום בכלכלה, פיתח את הנושא למגוון שאלות ואתגרים שמעניינים כלכלנים בהתבסס על תורת המשחקים, שמאפשרת ניתוח של התנהגויות רציונליות של המשתתפים. תחום "תכנון המנגנונים האלגוריתמי" מתרכז בהכללות שנדרשות בהקשרים חישוביים. נחזור לאתגר הבסיסי שלנו של חישוב פלט רצוי  $f(X)$  מתוך קלט  $X$ , כאשר הקלט נמצא אצל משתמש אשר לא בהכרח ידווח לנו את הערך האמיתי  $X$