

מצלמת הרנטגן תיעדה: כך נמלים מנהלות פרויקטים

מחקר חדש, שהציץ לעומק האדמה באמצעות מצלמות רנטגן מתקדמות, מגלה כיצד יצורים זעירים עם מוח בגודל גרגר אבק מצליחים לפתור משימות הנדסיות מורכבות בלי מנהלים, בלי הוראות מלמעלה ובלי פקקים

[יהוסף יעבץ](#) פורסם ו' כסלו התשפ"ו 26.11.25 10:35 **הדברות**

החוקר גור זיו סוקר מחקרים אחרונים שנעשו על נמלים, ומלמדים על היעילות המדהימה של הנמלים בתכנון פעילותם, לא פחות ממנהלי פרויקטים מודרניים.

מה אפשר ללמוד מנמלים על ניהול פרויקטים, רובוטיקה ויעילות של צוותים? מתברר שהרבה יותר ממה שנדמה. בזמן שאנחנו טובעים בישיבות אינסופיות, גאנטים מפורטים ומיילים שלא נגמרים, מתחת לפני הקרקע פועלת לה אחת המערכות היעילות בעולם – קן הנמלים. מחקר חדש, שהציץ לעומק האדמה באמצעות מצלמות רנטגן מתקדמות, מגלה כיצד יצורים זעירים עם מוח בגודל גרגר אבק מצליחים לפתור משימות הנדסיות מורכבות בלי מנהלים, בלי הוראות מלמעלה ובלי פקקים.

כדי להבין את גודל החידה, שווה להתחיל בדמיון מודרך קצר. דמיינו אתר בנייה גדול. עשרות עובדים, מהנדסים, מנהלי עבודה וקבלנים מנסים לתאם ביניהם חפירה של מנהרה או כריית יסודות לבניין. בשטח שומעים צעקות, רואים ידיים מסמנות, טלפונים מצלצלים, תוכניות בניין נפתחות ונסגרות. למרות כל זה – כמעט תמיד יש עיכובים, התנגשויות בין צוותים, טעויות בשטח וצווארי בקבוק. עכשיו נסו לדמיון את אותה משימה בדיוק, אבל בלי מלים, בלי תוכנית אב, בלי מנהל כזה שמקבל את כל ההחלטות, ועוד בתוך חלל צפוף וחשוך שבו כל תנועה מיותרת עלולה לגרום לקריסה. בעולם האנושי זה מתכון לכאוס מוחלט. בעולם הנמלים – זהו סדר מושלם.

כבר שנים שחוקרים מוקסמים ממה שמכונה "אינטליגנציה קולקטיבית" של נמלים – העובדה שאלפי פרטים יכולים יחדיו לייצר מערכת מורכבת, יציבה ויעילה, הרבה מעבר ליכולת של כל פרט בודד. אבל רוב הדרמה האמיתית מתרחשת מתחת לפני הקרקע, בתוך מנהרות צפופות ומפותלות שקשה מאד לצפות בהן בלי להרוס אותן. כאן נכנס לתמונה צוות חוקרים ממכון ג'ורג'יה טק, בהובלת הפיזיקאי דניאל גולדמן, שהחליט להתגבר על מגבלת ה"עפר האטום".

החוקרים בנו זירת ניסוי מיוחדת – מיכל שקוף שמולא בתערובת קרקע המדמה את סביבתן הטבעית של נמלי אש. מעל המיכל הוצבו מצלמת רנטגן רבת עוצמה וגלאים רגישים, שאפשרו לראשונה לראות "דרך האדמה" בזמן אמת. כך הצליחו לעקוב אחרי כל נמלה ונמלה, למדוד את תנועותיה ולבחון כיצד מתפתח קצב החפירה של המנהרה כולה, מרגע התחלת העבודה ועד שהיא מגיעה לעומק ניכר.

התוצאות הפתיעו אפילו את החוקרים עצמם. ההיגיון האנושי הפשוט היה מצפה לכך שככל שמוסיפים עוד נמלים למשימה, כך העבודה תתקדם מהר יותר. יותר "כוח אדם" – יותר תפוקה. בפועל התברר שקצב החפירה כמעט שלא השתנה, בין אם היו במיכל 15 נמלים, ובין אם היו בו 150. במקום לקבל האצה, המערכת שמרה על קצב יציב. הנמלים, כך

נראה, אינן מנסות "ללחוץ על הגז" בכל מחיר, אלא להתאים את עצמן למבנה המנהרה ולצפיפות הקיימת, כדי להימנע מפקקים.

כשהחוקרים ניתחו את תנועות הנמלים, הם גילו מנגנון חלוקת עבודה פשוט וגאוני. רק כשליש מן הנמלים היו "כורים" פעילים, שחפרו בקצה המנהרה. השאר עסקו בפינוי גרגרי העפר והרחקתם מאזור הפתח. אבל החלק המרתק באמת היה ההחלטה מי ייכנס למנהרה ומתי. נמלה שהתקרבה לפתח ו"ניסתה את מזלה" נבחנה על פי דבר אחד: צפיפות. אם היא נתקלה בנמלים רבות שיוצאות החוצה בתדירות גבוהה, היא פשוט הסתובבה, ויתרה על הכניסה וחיפשה משימה אחרת. בלי פקודה, בלי ויכוח, בלי "ישיבת סטטוס".

הכלל שהתברר מתוך ההתבוננות היה חד: אם צפוף – פונים אחורה. ברגע שהעומס קטן, חלק מן הנמלים חוזרות לנסות שוב. כך נוצר מנגנון ויסות אוטומטי של תנועת הנמלים פנימה והחוצה, שמונע מראש היווצרות של פקקי תנועה שעלולים לשתק את החפירה. גולדמן תיאר זאת כ"מערכת שמווסתת את עצמה באופן טבעי", ונראה שהנמלים פשוט "שונאות צפיפות", ומבזבזות מעט מאוד אנרגיה על התנגשויות וחסיונות.

נמלה בודדת, חשוב לומר, אינה גאון אסטרטגי. היא אינה רואה את התמונה הגדולה, ולא יודעת מה יהיה אורך המנהרה או הייעוד שלה. היא רק מגיבה לגירויים מיידיים: צפיפות, כיוון התנועה של שכנותיה, גדלי גרגרי העפר או ריכוז של פרומונים. אך מתוך החוקים המקומיים האלו נוצרת תופעה רחבה בהרבה – ארגון עצמי. זהו מצב שבו מערכת מורכבת מתארגנת מבפנים, מלמטה למעלה, ללא מתכנן-על. כפי שאמר שלמה המלך, "אין לה שוטר ומושל".

גיא תרולז, חוקר צרפתי להתנהגות קולקטיבית שלא השתתף במחקר, הסביר שהממצאים מדגימים באופן מרשים כיצד פתרונות אלגנטיים בטבע צומחים דווקא מפשטות, לא מהיררכיות כבדות. במילים אחרות: לפעמים הדרך הטובה ביותר לפתור בעיה גדולה היא לתת להרבה "שחקנים קטנים" לפעול לפי כללים פשוטים, במקום לרכז את כל ההחלטות ביד אחת.

מכאן קצרה הדרך לעולם הרובוטיקה וניהול הפרויקטים האנושי. תחום רובוטיקת הנחיל מנסה לחקות בדיוק את זה – לתכנת מאות או אלפי רובוטים קטנים לא לפעול לפי פקודות מדויקות מלמעלה, אלא לפי כללים מקומיים. אם רובוט נתקע באזור צפוף – הוא פונה אחורה. אם הוא מוצא נקודת עניין, הוא שולח "אות" לאחרים. כך אפשר לדמיין מערכת הצלה שמפעילה נחיל רובוטים קטנים מתחת להריסות בניין, או מערך ניקוי ושימור של חלליות, מבלי שאף מרכז שליטה יצטרך לעקוב אחרי כל יחידה ויחידה.

גם בעולמות מוכרים יותר – יציאה מאצטדיון מלא אדם, פינוי בניין בוער או ניהול צוותי עבודה – לקחי הנמלים רלוונטיים מאוד. במקום לתכנן הכול לפרטי פרטים ולנסות לשלוט בכל אדם בכל רגע, אפשר לבנות מרחבים ותהליכים "מעודדים" התפזרות, הפחתת עומס מקומי וקבלת החלטות בשטח על סמך מידע מיידי. במילים פשוטות: פחות פקודות מלמעלה, יותר אמון ביכולות של יחידות קטנות להגיב למציאות.

בסופו של דבר, המחקר על נמלי האש הוא תזכורת צנועה למדי: לפעמים מי שמחזיקים בתשובות לבעיות ההנדסיות והארגוניות שלנו אינם היועצים, המנהלים או התוכנות

המתקדמות ביותר – אלא יצורים זעירים שצעדיהם מתנהלים בשקט על המדרכה. בפעם הבאה שתראו שיירת נמלים מסודרת, אולי תביטו בה אחרת: לא רק כחרקים שמחפשים פירור, אלא כמודל חי למערכת פרויקטים יעילה, נטולת אגו, שפועלת על עיקרון אחד פשוט – לעשות את העבודה, בלי להפריע זה לזה.