

לך אל הנמלה עצל – שביל הזהב בין קונפורמיזם ואינדיבידואליות –

פרופ' ניר גוב, 17.11.2015

כמו שאתם ראיתם מהכותרת של ההרצאה – שזה נכתב כדי להביא אתכם לכאן – נמלים הם נושא שמעסיק את בני-האדם שנים רבות, ובני-אדם תמיד מסתכלים עליהם. גם אתם מאז ילדותכם בוודאי הסתכלתם בהערצה על התכונות הנפלאות של נמלים. אני לא מומחה לנמלים, אני פיסיקאי תיאורטי, אז מה לפיסיקאי ולנמלים? מקווה שיתברר במהלך הרצאה. פה יש ציטוט מוכר ממשלי, רגילים רק לחלק הראשון "לך אל נמלה עצל ראה דרכיה וחכם" – אל תתעצל בחייך ותעשה מעשים טובים. ההמשך – שבמקרה היה פה כבר מסומן בהדגשה, כפי שמופיע באתר האינטרנט – הוא "אין לה קצין שוטר ומושל". שמו לב שהפעולות של הנמלים, אפילו שהן פועלות ביחד ומבצעות את המעשים שלהן בצורה קבוצתית, לא נראה שיש על פניו מישהו שמכוון את ההתנהגות שלהן ונותן להן הוראות ברורות מה לעשות; לפחות לא ברמה אינדיבידואלית של כל אחת – את תלכי לשם, את תעשי את זה. אני מתייחס לנמלים כנקבות, כי כולן – כל הנמלים שאתם פוגשים בטבע – הן נקבות. הזכרים בעולם הנמלים חיים זמן קצר מאוד והם משמשים רק לרבייה. למעשה זו חברה שהיא לחלוטין נשלטת על-ידי נשים, אולי זו הסיבה שהן גם פועלות בצורה כל כך אפקטיבית.

אין לה קצין שוטר ומושל, תגידו: אבל יש מלכה. נכון שיש מלכה שיושבת בבטן האדמה, לא רואים את המלכה כשאתם מסתובבים על פני האדמה, המלכה יושבת בתוך הקן, היא באמת עוסקת בהטלת ביצים והיא מאוד חשובה כמובן, אבל לא נותנת הוראות לנמלים איך לפעול מעל הקרקע, במקום שאתם נתקלים בהן, ששם הן עושות פעולות חשובות כמו חיפוש מזון והבאתו לקן. כל הפעולה החשובה של חיפוש מזון – למצוא אותו ולהביא אותו פיסית לקן – הן עושות עצמאית, ויודעות לעשות זאת בצורה מצוינת. זה נושא המחקר שהצטרפתי אליו.

איך הן פועלות ללא מנהיג? בסוגריים כתבתי מנהיג קבוע, כי יש אלמנט מעניין של מנהיגות זמנית שהתגלה במחקר. זה נותן מחשבות לנושא של מנהיגות כתכונה לא קבועה.

עופר פיינרמן, חוקר פה במכון בפקולטה לפיסיקה, הוא איש הנמלים, יש לו מעבדה והוא חוקר תכונות מדהימות של נמלים. הצטרפתי לעופר במחקר של סחיבה קולקטיבית, היכולת של הנמלים לסחוב יחד חתיכת מזון – פה זה צ'יריו. והצ'יריו, למרות שהוא קטן עבורנו, רואים שהוא גדול ביחס לנמלים האלה, אלה נמלים שנקראות באנגלית "נמלים משוגעות", אבל הן לא משוגעות, הן חייבות לשתף פעולה כדי להביא מזון לקן.

יש הרבה סוגים של נמלים שלא יודעות לעשות סחיבה משותפת של מזון שנמלה אחת לא יכולה להזיז לבד. רוב הנמלים לא יודעות לעשות זאת, הן יותרו על משהו שהן לא יכולות לסחוב, ייקחו דברים קטנים. ותהיינה נמלים יותר גדולות שכל אחת יכולה לסחוב משהו משמעותי לקן. רק האדם והנמלים בעולם הטבע יודעים לבצע פעולה של לסחוב ביחד משהו שאחד לא יכול להזיז לבד על פני מרחק משמעותי. יש חיות שאוכלות ביחד, כמו זאבים שטורפים ביחד, אבל לא סוחבים את הדבר שטרפו שום מרחק, גם לא קופים; אין שום חיה אחרת מלבד הנמלים שגילו את האפשרות לעשות את זה, וגם אנחנו, שכך הקמנו את הפירמידות ועוד דברים. עוד הערה, הן לא אוהבות צ'יריו, אם תשאירו צ'יריו במטבח הן לא יאכלו אותו. את הצ'יריו הזה מרחו באוכל של חתולים שזה מריח להן טוב. הן אוכלות חרקים מתים, לא טורפות אלא מנקות את הסביבה מחרקים שמתו, הן אוהבות את הריח של משהו רקוב ומסריח.

פה במעבדה צילמו את האירוע ועקבו עם מחשב אחר התנועות של הנמלים. הן ממוספרות, אפשר לראות מתי נמלה מתחברת לקבוצה הסוחבת, מתי היא מתנתקת, אפשר לראות כמה נמלים סוחבות, את כיוון התנועה של פריט המזון, בזכות סימנים עם טושים רואים פה את הסיבובים שלהן.

כדי לסחוב לקן מזון שנמלה אחת לא יכולה לסחוב, הן חייבות לעבוד ביחד. השאלה איך הן עושות את זה. ברור שיש פה דרך – חייבת להיות קומוניקציה ביניהן, אי אפשר לעשות משהו ביחד בלי טיפה לתקשר מה רוצים לעשות. אפשרות הקומוניקציה ביניהן יכולה להיות מגוונת – דרך כימיקלים, ויש פה כימיקלים שאיתם הן מסמנות את הדרך לקן. אבל איך הן מתקשרות בתוך הקבוצה? זה יכול להיות באמצעות קול, הן יכולות לעשות טיקים קטנים, אולי אחת עומדת בצד וצועקת "כולם שמאלה". לא מצאנו שום דבר כזה נראה לעין, הנחנו הנחה פשוטה שהיא הכי טבעית לנו בתור פיסיקאים, שהאינטראקציות הן מכניות. כשנמלה מתחברת לפריט מזון היא מרגישה את הכוחות שאחרות כבר מפעילות על הגוף. מיד נגיע לזה. אבל לפני כן, יש אפשרות כמובן שבזכות זה שהנמלה מתקשרת עם האחרות ושמה לב מה הן עושות, היא פשוט מחקה אותן, היא תהיה קונפורמיסטית לגמרי.

אדבר על קונפורמיזם מול אינדיבידואליות. לכאורה מוזר לכתוב את זה בכותרת על נמלים, כי חושבים שנמלים הן קונפורמיסטיות לגמרי ושאינן אינדיבידואליזם בעולם הנמלים. ארצה לשבור את ההנחה הזאת. מה המתח בין קונפורמיזם לאינדיבידואליות? אם אני מצטרף לסביבה, אני מסתכל מה כולם עושים ומעתיק את זה. זו דרך טובה לגייס אותי לעזור לאחרים. יש בעלי-חיים רבים שנוהגים כך. למשל קבוצות של להקות ציפורים או דגים, הציפורים נעות כגוש אחד על-ידי זה שכל אחת רואה את חברותיה ומנסה כמיטב יכולתה לעשות בדיוק מה שהאחרות עושות.

אבל יותר מדי קונפורמיזם יכול להיות לא מוצלח. למשל האגדה על המכרסם הזה, שחי באיזור סקנדינביה, כל כמה שנים הוא מתרבה יותר מדי ואז הם קופצים לעבר התהום בהמוניהם. פה הוא אומר: חכה רגע, משהו לא בסדר. אומרים לו: תסתום את הפה, זה לטובתך. אם אתה קונפורמיסט מוחלט, זה יכול להוביל את הקבוצה לאסון. אם אתה אינדיבידואליסט לגמרי, במקרה של הנמלים כל אחת תתחבר לפריט מזון, כל אחת תמשוך לכיוונה, הצ'יריו לא יזוז לשום מקום. כדי לעשות משהו ביחד, חייבים מידה מסוימת של הסכמה, קונפורמיזם, אבל האם קונפורמיזם מוחלט יכול להיות לא טוב בעולם הנמלים?

קודם כל, מהמחקרים של עופר, מאנליזה של סרטים כמו הסרט שהראיתי קודם, הגענו למסקנה שכאשר נמלה שמתחברת לפריט מזון, שזה עיגול צהוב כמו צ'יריו, יש לה שתי אפשרויות – היא צריכה להחליט בין משיכה להרמה. מסתבר שהן לא יודעות לדחוף. וגם אתם, כשאתם תופסים משהו כבד, מנסים למשוך ולא לדחוף, זה קל יותר. הן תופסות את הדבר עם השיניים, עם הפה, ומנסות למשוך או טיפה להרים. הרמה גם עוזרת, כי היא מקטינה את החיכוך של המזון עם הרצפה. אם מספיק ירימו את החגב הזה שמצאו בטבע, זה יעזור לכל השאר לסחוב. הרמה לא מזיזה אותו ימינה או שמאלה, אבל עוזרת לקבוצה. בנוסף לכך, נמלים יכולות להתחבר או להתנתק, זה תהליך נוסף.

במקרה זה יכולים לראות שהגוף נע בכיוון של החץ החזק הזה, V מסמנת את המהירות הטבעית בזמן T של הגוף. קדימה זה כיוון התנועה, זה הקדימה של פריט המזון. יש בעיקר נמלים כחולות שהן המושכות, ומאחורה יש בעיקר מרימות שהן מסומנות באדום. זה אומר שהקבוצה הזאת היא בקואורדינציה טובה, אין אף אחת מאחור שמנסה למשוך נגד הרוב. פה מסומנות שש נמלים בקונפורמיזם מוחלט, כולן עוזרות להרים ולמשוך.

בגדול יש להן יכולת החלטה בין שני התפקידים של הרמה ומשיכה. ההשערה היא שבחירה בין שתי תפקידים מתבצעת רק לפי כוח שהנמלה מרגישה שפועל עליה.

מה פועל על הנמלה ברגע שהתחברה לפריט מזון? סכום כל הכוחות של נמלים אחרות שמושכות. אם היא מתחברת לפריט מזון נייח, היא יכולה לקבל החלטה כרצונה כי אין קבוצה, היא בודדה. ברגע שיש קבוצה שמושכת באיזשהו כיוון, היא מרגישה את הכוח שבו נדחף או נמשך הגוף ולפי זה היא צריכה לקבל החלטה. אם היא בחלק הקדמי, אז היא צריכה לקבל החלטה בעדיפות גבוהה יותר להיות מושכת, ואם היא בחלק האחורי, היא צריכה – אם היא רוצה לעזור – לקבל החלטה להרים ולא למשוך. זאת ההנחה הבסיסית ביותר של המודל, ואת התכונות האלה הכנסנו למודל מתמטי, כך שבמתמטיקה כותבים פסיקה. יותר נכון לקרוא לזה מודל תיאורטי.

אז הקונפורמיזם לא מוחלט. אתם רואים עכשיו בשקף משוואה, אבל אל תיבהלו ואל תלכו לישון – זו המשוואה היחידה בהרצאה. לא אתן פה שום נוסחאות. רציתי להראות בכל זאת טיפה את המתמטיקה שמאחורי זה. רציתי בעיקר להראות שיש תכונה שמבטאת במספרים בדיוק את מה שאמרתי קודם, היכולת שלהן להניח לאיזה כיוון, איזו החלטה לקבל לפי הכיוון שבו הן נמצאות. יש פה את ה-P שמסמן את כיוון הגוף של הנמלה ביחס לראש שלה וביחס לפריט המזון שאליו התחברה. יש את ה-F, שזה הכוח שהיא מרגישה מכל הנמלים האחרות, ויש פה למטה במכנה פרמטר שכתוב עליו F_{ind} . ind מציינת את מידת האינדיבידואלים של הנמלה, ו-F בגלל שזה ביחידות של כוח. למעלה יש יחידות של כוח, P מסמן את הכיוון. F זה כוח. יש פה כוח חלקי כוח. מה המשמעות של הפרמטר F_{ind} ? הכוח שפועל על הנמלה זה סכום כל הכוחות במקום שהיא נמצאת. הכיוון תלוי באיפה התחברה, יהיו וקטורים לכיוונים שונים. מנח הגוף שלה ביחס למזון יהיה בכיוונים שונים. מה משמעות הפרמטר החופשי F_{ind} ? הוא מתפקד כמו טמפרטורה במוח של הנמלה. אם הפרמטר הזה הוא אפס, לא צריך את הפרמטר הזה. קח אותו לאפס, זה כאילו שהנמלים הן בטמפרטורה אפס, זה אומר שאני אף פעם לא עושה שגיאות, תמיד אני בוחר נכון, בחירה קונפורמיסטית. אני מאחור, אני מושך. אם אני מקדימה אני מרים. אם אני לוקח את הפרמטר הזה לאין-סוף, זה אומר שאני אינדיבידואליסט מוחלט, מתעלם לחלוטין מהכוח שאני מרגיש משאר הקבוצה, בתור נמלה אני מטילה מטבע כל פעם ומחליטה בצורה אקראית אם להיות מושכת או מרימה. מערכת נמלים שיש להן F_{ind} גבוה עושה שגיאות רבות, כי אפילו הנמלים מאחורה ימשכו ויתנגדו בהסתברות גבוהה. ככל שהפרמטר יותר גדול, ההסתברות היא שלא יפעלו לפי צו התנועה, לפי צו הקבוצה, שיעשו שגיאות. עכשיו כשאנחנו קצת מבינים מה הפרמטר החופשי במודל, שכל מה שהמודל לקח זה החלטה בינארית של כל נמלה להיות סוחבת או מרימה, זה מתורגם למודל מתמטי שאפשר לעשות איתו חישובים, לתת ניבוי איך המערכת תתנהג ולהשוות לתצפיות הניסוי.

פה בשקף אני מראה גרפים, לא משנה מה הם אומרים. מה שחשוב זה לראות שבכל גרף יש חלק צבעוני – פה ירוק, פה כחול, פה ורוד, זה תצפיות של ניסוי, והקווים השחורים זה החיזוי של המודל המתמטי. רואים שעל פני מדדים שונים יש פה התפלגות מהירויות של נמלים. זו המהירות הסיבובית שבו הגוף מסתובב, כפונקציה, כתלות של מספר נמלים רגעיות שמחוברות לצ'יריו. בסך הכל המודל נתן הסבר די טוב והתאמה מצוינת לתצפיות. אגב, אני רוצה לציין כמה התצפיות האלה מסובכות מבחינת עופר; את התהליך של סחיבת האוכל לקן על-ידי נמלה, אי אפשר לבצע בתוך עיר הנמלים שיש לו במרתף של הפקולטה לפיסיקה, הוא חייב לעשות זאת בחוץ. בחוץ, גם בישראל החמה, נמלים הן בשנת חורף. עונת הניסויים נגמרה לפני כמה שבועות, עד הקיץ הבא אי אפשר לעשות ניסויים על השאלה של סחיבת מזון לקן. הכל מתבצע בחוץ, אולי ראיתם

סטודנטים של עופר ברחוב הנשיא הראשון או במכון ויצמן יושבים עם מצלמה ולוח לבן שעליו נמלים סוחבות. את כל זה מצלמים בחום, כיהן עושות את זה בימים הכי חמים של הקיץ. זו הערה על איך הנתונים האלה נאספו.

אחרי שראינו שיש התאמה, אפשר לשאול – אבל במודל היה פרמטר חופשי? מה הערך המספרי של הפרמטר כדי שתקבל את ההתאמות האלה? בערך עשר זה כוח נמלה. זה ה- F_{ind} . מה זה אומר? למה לא המספר אחד, למה לא עשירית ולא מיליון? מה מיוחד בערך הזה?

זאת שאלה שאתם שואלים ואנחנו שאלנו את עצמנו. פה אנחנו קצת תקועים, כי אם באמת הפרמטר הזה הוא פנימי בתוך המוח של נמלים, שאומר להן כמה פעמים לעשות שגיאות ולהתעלם מהכוח שהן מרגישות מהקבוצה – איך נשנה אותו בניסוי, איך נבדוק בניסוי שהמערכת מתנהגת אחרת אם אתה לוקח את הערך מעשר ל-100, או מאפס לאחד? היה רעיון לתת להן סמים אבל לא יודעים איך לעשות זאת, למשוח עליהם מריחואנה – אני לא יודע אם זה עוזר. אין דרך לעשות את השינויים בתוך המוח של הנמלה.

יש עוד דבר שלא סיפרתי לכם, שאולי כבר מרמז על הפיתרון האפשרי למה מיוחד בערך הזה של הפרמטר שמצאנו בניסוי. מה שלא סיפרתי, שכשהנמלים סוחבות – אולי שאלתם את עצמכם אבל התביישתם לשאול – איך הן יודעות לאן לסחוב? יש שביל של ריח שהשאירו אל הקן. הבעיה שכאשר נמלה מתחברת עם הפה שלה לחתיכת מזון מאוד מסריחה, כי כך היא אוהבת אותה, החושים שלה על פריט המזון, אין לה דרך להריח את דרכה חזרה לקן. היא סוחבת מצוין, אבל אין לה מושג לאן.

איך הנמלים מגיעות לקן? פה בשקף רואים דוגמה, שלמעשה לאורך קטעים של המסלול שאפשר לזהות אותם באופן מובהק – קטעים שאין עליהם צבע היה קשה יותר – בקטעים עם צבע אפשר לזהות שיש נמלה אחת שהתחברה לפריט מזון ומושכת את כל הקבוצה לכיוון הנכון של הקן. בעצם היא מתקנת את צורת הקבוצה בכיוון הנכון של הקן. כל הזמן במהלך התנועה של המזון אל הקן, מתחברות נמלים חדשות שקראנו להן ידעניות, הן יודעות את הדרך. איך הן יודעות את הדרך? או כי פשוט הגיעו טריות מהקן, או שאֵלָה נמלים שסחבו, עזבו את פריט המזון, חזרו וריחרחו את דרכן על חלק מהמסלול המסומן, שכל הזמן מסומן על-ידי נמלים, חזרו ועכשיו הן שוב הצטיידו במידע לאן מוביל השביל הנכון.

הנמלים הידעניות שמושכות מגיעות בקצב קטן לפעמים, אפשר לזהות ממש נמלה בודדת שמושכת. בנוסף, אחרי שהן התחברו לפריט המזון ומתחילות למשוך, אחרי משהו כמו עשר שניות הן מאבדות את הכיוון כי כל נמלה בקבוצה זזה ימינה ושמאלה; הן ידעו שהן צריכות ללכת לכאן, אבל ה"כאן" השתנה והן מאבדות את הכיוון. כל נמלה כזאת היא אולי מכוונת נכון, אבל פרק זמן קצר. אלו מנהיגים זמניים, הנהגה קצרה בזמן.

אני מראה פה סרטון קטן. תראו נמלה שמחפשת מקום להתחבר, בבת אחת כל הקבוצה נעה בכיוון שלה. אַרְאָה שוב. הנה היא מגיעה, מחפשת מקום להתחבר, מצאה מקום ומושכת את כל הקבוצה בכיוון שלה. לפעמים יש אירועים מובהקים שאפשר למצוא, שנמלה הגיעה ממש מכיוון הקן ועזרת לתקן – הקבוצה הלכה לכיוון שאיננו הכיוון של הקן, אבל עכשיו היא תיקנה את הכיוון.

מהקהל: רואים בסרטון שהנמלה שהולכת לכיוון הקן נוגעת מדי פעם בנמלים.

ניב: נכון. שמת לב שלפני שהיא התחברה היא נגעה להן מאחור בגוף, אולי העבירה להן אינפורמציה גם ככה. זו מחשבה נכונה, כי נמלים בקן מעבירות אינפורמציה על-ידי מגע. פה רואים התחברות של מחושים אל הטוסיק – ולא מחושים למחושים – אולי גם זה נותן מידע. אי אפשר לשלול זאת, אבל לא ראינו את זה בצורה מובהקת ולכן לא בטוח שזה נכון. בכל מקרה אי אפשר לשלול זאת, לנמלים יש עוד הרבה מה ללמד אותנו.

מהקהל: היא בדקה לאיזה כיוון הן הולכות?

פרופ' ניר גוב: יכול להיות. בטוח שהיא יודעת לאן היא רוצה למשוך. אולי כאן יש לנו התחלה של מחשבה לפיתרון, מה מיוחד בערך הזה שמצאנו בהשוואה בין המדידות והמודל של F_{ind} בערך עשר? המודל לימד אותנו משהו. מה הוא לימד? מה מיוחד בערך הזה?

פה יש כוח חזק של מודל תאורטי, כי לא יודעים לשנות את הערך F_{ind} שנמצא במוח של נמלה, אבל אפשר לשחק עם הערך כרצוננו בחישוב. חישבנו את התגובה של הקבוצה, יש פה קבוצה של כ-10-15 נמלים שסוחבות, אבל לא יודעות לאן, ואז מגיעה נמלה ידענית בודדת ומושכת אותן לכיוון הקן. נניח שהקן זה הכיוון שמצויר עם חץ (בשקף) למשך עשר שניות. אנחנו מריצים עוד ועוד סימולציות, אך כל פעם משנים את הפרמטר של אינדיבידואליות, של F_{ind} . הערך שמצאנו בניסוי הוא ערך, אפשר להגדיל או להקטין אותו מאוד, לבדוק מה תגובת הקבוצה לנמלה ידענית שמושכת, מה המרחק שהלכה הקבוצה עם הידענית.

רואים תוצאה של הגרף הבא – הערך שנמצא בניסוי הוא קרוב למקסימום תגובת הקבוצה למשיכה של ידענית בודדת. מה הסיבה למקסימום הזה? אפשר להבין זאת כך. אם הנמלים בקואורדינציה מוחלטת, אם האינדיבידואליזם הוא אפס, הן לא מגיבות למשיכה של נמלה אחת, הן 15-20 נמלים שמושכות ומרימות בצוות, רצות במהירות אדירה. אם הן רצות בכיוון הנכון, נמלה אחת לא יכולה לשנות את הכיוון. מצד שני אם האינדיבידואליזם מוחלט, כמובן שהן ללא שום קואורדינציה והתנועה רנדומית, הן כמעט לא זזות, כולם נלחמים זה בזה, מחליפים תפקידים, מושכים ומרימים בצורה אקראית, וגם כאשר מגיעה נמלה ידענית הן לא מגיבות, הן עושות מה שהן רוצות.

יש שביל זהב באמצע, שבו יש להן מידת קואורדינציה שמאפשרת לפעול ביחד, להזיז את הגוף בצורה יעילה, אבל עדיין הן מחליפות את דעתן בצורה מספיק מהירה, כך שכאשר נמלה אחת מגיעה היא יכולה להשפיע על כל הקבוצה. באינטואיציה, זו הסיבה למה זה קורה. מי שחושב בכיוון של פסיקה, זה מאוד דומה למה שקוראים מעבר פאזה, במערכת מסודרת של קואורדינציה מוחלטת ובמערכת לא מסודרת. רואים במערכות פסיקליות של מגנטים בטמפרטורה גבוהה, גם מגנטים על המקרר, שבטמפרטורה גבוהה הם יהפכו לפארה-מגנט שכל האלמנטים המגנטיים לא מסודרים, ובטמפרטורה נמוכה זה פרו-מגנט, שכל הפרמטרים מסתדרים באותו כיוון. פה זה קורה במוחות של הנמלים. אז מבינים למה פסיקאי תיאורטי יכול אולי להסביר משהו על נמלים.

מאחר שלא יכולים לשנות את F_{ind} , ראינו מהמודל שיש פרמטר שכן יכולים לשנות בניסוי – גודל הקבוצה. אם כל נמלה מגיבה לכוח שעובד עליה, אז סכום כל הכוחות, בביטוי המתמטי המופיע למעלה מחולק ב- F_{ind} – ואפשר להקטין את F_{ind} שמופיע במכנה. אמרנו מה קורה אם כל הקבוצה סוחבת טבעת, יש הרבה יותר נמלים שסוחבות טבעת גדולה מאשר טבעת קטנה – לכן לקחנו טבעת גדולה, כדי לראות מה קורה בקבוצה גדולה יותר של נמלים – ותראו מה זה אומר לנמלה ידענית שמושכת אותם עשר שניות. הגודל של צ'יריו פה קרוב למקסימום של עצמו, מקסימום הוא אחד סנטימטר. מצאנו שכשמדובר בחפצים גדולים וקבוצה גדולה של נמלים שסוחבת, הן יהיו הרבה יותר קונפורמיסטיות; ה- F_{ind} האפקטיבי יהיה קטן יותר. נמלים בקואורדינציה מושלמת זה בדיוק היפוך של מה שהיה קודם – נמלים ללא קואורדינציה, קבוצה קטנה אינדיבידואליסטית, שה- F_{ind} האפקטיבי שלה גדול יותר.

עשינו חישוב במודל, ביצענו ניסויים והסתכלנו על התוצאות. פה אפשר לראות כמה סרטים שמדגימים את ההתנהגות הזאת. בקבוצה קטנה, יותר קטנה מהאופטימום שדיברנו עליו, פריט מזון קטן מסנטימטר, שתי

נמלים יכולות לסחוב אותו, אבל כמעט כל הזמן זה הופך למלחמה, אין קואורדינציה בתנועה וזה לא אפקטיבי. יש מעט מדי נמלים ויותר מדי משיכות מכל כיוונים, אז גם ידענית לא יכולה לכוון אותם. גודל אופטימלי – איך בחנו שהוא אופטימלי? אם המערכת יודעת להגיב לידענית, איפה נראה את זה? אם הנמלים הולכות כל הזמן באותו כיוון לא נוכל להבחין, אם נשים להן מחסום – והדרך היחידה להגיע לקן זה לעקוף את מחסום – נוכל לבחון אם הן יודעות להגיב לידעניות שמגיעות מדרך חדשה שנפתחה. נראה שקבוצה בגודל אופטימלי יודעת להגיב לידעניות בצורה הכי טובה, לעקוף את המחסום יותר טוב מאשר קבוצה גדולה שמגיבה פחות טוב לידעניות. ניסוי כזה נעשה על-ידי עופר פיינרמן, אפשר לראות את המחסום שהוא גוף פלסטי, הן לא מיד מצליחות למצוא את הדרך, והנה הן מצאו את דרכן מסביב למחסום. דבר ראשון הן מתנגשות במחסום, התנועה ימינה-שמאלה היא אקראית, באיזשהו שלב יש מספיק נמלים שמגיעות מעבר למחסום כדי לעקוף אותו.

זה נראה טריוויאלי אבל כשמסתכלים על קבוצה גדולה, רואים שזה ממש לא טריוויאלי. בסרטון הבא רואים טבעת גדולה, היא זזה מצוין (במציאות זה קורה הרבה יותר לאט), והיא לא מצליחה למצוא דרכה מעבר למחסום, למרות ששולי המחסום – באופן יחסי לגודל הטבעת – קטנים יותר מאשר במקרה הקודם שהיה מחסום עמוק. בכל זאת זה נשאר תקוע שעות, בעוד שבקבוצה הקודמת הן עברו את המחסום תוך חמש דקות. זו עדות ניסיונית לכך שהחישוב שהראה שהגודל משנה את הקונפורמיזם האפקטיבי הוא באמת נכון. זו כנראה הסיבה לכך שיש להם F-IND של עשר בערך.

יש עוד ניסוי חמוד שחשבתי להראות, אולי קצת יותר מציאותי במובן שבמציאות הן צריכות לקחת פריט מזון ולהביא לקן דרך תוואי מאוד מסובך שיש בטבע – סלעים, ענפים שנפלו. הן צריכות כל הזמן להיות מסוגלות לשנות כיוון תנועה ולא להישאר עם ראש בקיר, להיות גמישות מספיק כדי לשנות כיוון, להגיב מהר ובאופן אופטימלי לנמלים ידעניות שמגיעות מהכיוון החדש הפתוח שאליו אפשר ללכת.

מהקהל: אתה אומר שהן יודעות את גודל העצם ולמצוא נתיב פתוח?

פרופ' ניר גוב: נכון. הן לא יודעות את גודל העצם, הן יכולות להיתקע. אבל ברגע שזה נתקע מדי זמן, כמות הנמלים על העצם גדלה מאוד, כי הוא ניח, ואז הן מתחילות לנוע לאורך הכיוון הפתוח. הן לא מנסות לחזור לחור, אלא תופסות אזימוט שאולי לא הכי קרוב לפתח האמיתי, אבל מחלץ אותן מהבורך. הן לא יכולות לדעת אפריורי מאיפה יהיה פתח מספיק גדול.

מהקהל: תפקיד הידענית שונה לגמרי, לא כיוון הקן.

פרופ' ניר גוב: הידענית פתחה עוד כיוון שממנו הנמלה יכולה להגיע לקן, אם הולכים אחריה כן מגיעים לקן. היא לא יודעת להעריך את גודל הפתח.

דובר: בניסוי עם שתי נמלים, יש גודל מסוים שנמלה בודדת יכולה להרים ולסחוב לקן. אני רואה את זה בחצר, כשאני מסתכל זה נראה כאילו שתי נמלים לוקחות, אבל בעצם אחת מגיעה ראשונה לאוכל הזה. היא מרימה, באה שנייה ואז הן כאילו הן רבות מי יסחוב את זה, כי בקן הן יקבלו צוף או משהו.

פרופ' ניר גוב: אתה צודק שגם הנמלים האלה, כמה שהן קטנות, אם הן מוצאות פריט מזון פִּיצִי הן מרימות אותו לבד ולוקחות לקן. זו דרך יעילה להביא לקן, הן הולכות עם הפנים ישר לקן, כל הזמן עם מחושים פנויים כדי להריח את הדרך לקן, לא צריך שום ידעניות. אבל אלה פריטי מזון קטנים. יש נמלים גדולות שכל אחת יכולה להרים פריט מזון גדול, שגם פה אין בעיה. הפסוק ממשלי שציטטנו, ובחז"ל הביאו דוגמה שנמלים

מביאות כל הזמן אוכל לקן, ולא רואים שנמלה שמגיעה מהקן ריקה תופסת את המזון של מישהי שמביאה ושהן נלחמות. לכן אמרו שצריך ללמוד מנמלים לא לגזול אחד מהשני.

דובר: לפי מודל זה נמלה בודדת לא תוכל להביא לעולם מזון, כי אף אחד לא מראה לה את הדרך. פרופ' ניר גוב: אתה יודע שהיא כן יכולה.

דובר: אולי אם היא הולכת אחורה, כשהיא הולכת לבד היא הולכת קדימה ולא שוכחת.

פרופ' ניר גוב: זה גם הכיוון שהולכים אליו וגם כאשר פרי המזון הוא קטן, אז המחוששים שלה פנויים להריח את דרכם.

עכשיו יש שאלה - לנמלים בטבע יש ערך של אינדיבידואליזם שנותן מקסימום תגובה של הקבוצה כשפריט המזון הוא אחד סנטימטר. למה, מה מיוחד בזה? רוצים לנחש?

התשובה שהגענו אליה היא פשוטה – הפתח של הקן. יש פה עוד אילוץ – הפתח של הקן. גם אם נביא טריליון נמלים שיסחבו ממותה, הן לא יצליחו להכניס אותה לקן. אז למה לא להגדיל את פתח הקן? כי אז ייכנסו מים בגשם, ייכנסו טורפים. באבולוציה יש כמה אילוצים שנבנים אחד על גבי השני. אפשר לשאול למה כל כך חשוב להן להיות באופטימום, למה חשוב שיצליחו לעקוף מכשולים הכי מהר? כשהן סוחבות את פריט המזון, הן אמנם עובדות ביחד, אבל נמלים מקינים אחרים רוצות לגזול מהן את האוכל, לכן לבלות הרבה זמן בדרך לקן זו טעות; מה גם שציפורים באות ואוכלות את פריט המזון ביחד עם הנמלים. אז עדיף להגיע לקן כמה שיותר מהר.

עוד דבר, בהתחלה נתקלנו בפרמטר במודל שבו F_{IND} הוא כעשר כוחות נמלה. אחד הדברים שאנשים אמרו – אין שאלה של למה, המוח של נמלה הוא קטן ומוגבל בקבלת החלטות, יש קבלת החלטות רועשת, הן היו רוצות להיות בקונפורמיזם מושלם, אבל זה מה שהשיאות במוח שלהן מסוגלות לעשות. אנחנו אומרים שאולי האבולוציה בחרה את המספר הזה כדי להיות אופטימלי למשהו. אני חושב שהשתכנענו שגם זה. בעולם המדע מנסים להבין האם דברים בעולם החי הם אקראיים כתוצאה מאילוצים, לאו דווקא אבולוציה. אבל במקרים רבים לאבולוציה היה מספיק זמן לקחת התכונות של הנמלים ולהביאן לערך האופטימלי המושלם. זה יתרון לשרידות.

מהקהל: נמלה לא קונפורמית מחכה שתבוא נמלה אחרת שיודעת את הכיוון?

פרופ' ניר גוב: כל הנמלים קונפורמיות ולא קונפורמיות באותה מידה, אותו F_{IND} לכולם. זה אומר שנמלה מקבלת החלטות בצורה קצת רועשת, כי הטמפרטורה היא לא אפס, יש הסתברות לא אפס שנמלה מאחור תהפוך פתאום להיות מושכת, זה הורס ומאט את תנועת הקבוצה שמושכת לכיוון השני. לכאורה לא טוב להיות כך, אבל זה כן טוב כי בכך מרוויחים שהקבוצה מגיבה באופן מקסימלי למשיכה של ידענית. זה הכי חשוב פה, כי בלי הידעניות האלה לא יגיעו למקום.

מהקהל: במקרה מגיעה ידענית ומושכת?

פרופ' ניר גוב: האירועים שבהם ידעניות מושכות הם אירועים אקראיים. אם הנמלים הולכות מהקן, אם שמת אותן במקום רחוק מהקן שאין בו אף ידענית שמגיעה, הן יעשו תנועה אקראית במרחב.

מהקהל: מה גורם לזה שנמלה לא קונפורמית מתלכדת עם ידענית?

פרופ' ניר גוב: כל הנמלים קונפורמיות ולא קונפורמיות באותה מידה, הן כן מגיבות לכוח שהן מרגישות. ברגע שידענית מושכת, כולן מרגישות את זה וכולן מגיבות. היא פשוט לעשר שניות יודעת לאן היא מושכת, שאר הנמלים לא. מבחינה פיזית הידענית לא יותר חזקה מנמלים אחרות.

מהקהל: איך יודעים מי הידענית? אולי היא לא יודעת?

פרופ' ניר גוב: קודם כל, לא כל נמלה שמתחברת היא ידענית. יש נמלים שהתנתקו, לא התרחקו מספיק כדי ללמוד את הכיוון הנכון לקן, ועדיין הן לא ידעניות. ידענית היא נמלה שהגיעה טרייה מהקן, או שהתרחקה מהן ואספה פרמונים עם ידע לאן למשוך. איך יודעים שקיימת ידענית? מאירועים שצפינו בהם, אחרי התחברות של נמלה, ראינו שברוב המקרים רוב הנמלים שמתחברות הן ידעניות, ויש שינוי בכיוון התנועה של החפץ ביחס לכיוון הקודם. הוא נע הרבה יותר בכיוון הקן שאנחנו יודעים איפה הוא, מאשר לפני ההתחברות של אותה נמלה. כמה זמן מחזיק השיפור? עשר שניות. זו המדידה שמדדנו. נכון שיש מקרים של התחברויות של נמלה אחת שאינה ידענית והיא מיד מתנתקת שוב. ברוב המקרים, מי שהתנתקה הולכת אחורה לקבל מידע וחוזרת כידענית.

מהקהל: אנחנו בדרך כלל רואים שנמלים נעות בטור, או בכמה טורים, על פני השטח ומביאות את הפריטים שהן אוספות. פה במקרה הזה, אלה נמלים שהן קבוצות נעות והשביל ריק? פרופ' ניר גוב: בשביל יש כל הזמן מה שרגילים לראות, נמלים שהולכות ומגיעות. קבוצה נוצרת רק סביב פריט מזון.

דובר: הידע יכול להתקבל גם מצורת התנועה של נמלים אחרות?

פרופ' ניר גוב: ידענית מגיעה עם מידע איפה השביל לקן.

דובר: אני מבין שהיא יודעת זאת לא רק מהריח, אלא גם מהתחברות עם אחרות.

פרופ' ניר גוב: אבל בעיקר מסימונים.

דובר ב': אני מבין שהגוף (טור הנמלים) נכנס לתנועה מעגלית, לכן נמלה שהיתה מאחורה תמצא את עצמה קדימה.

פרופ' ניר גוב: הגוף עושה קצת סיבובים אבל מעטים, למעשה הן נלחמות נגד הסיבובים אלה, אין להן אינטרס להיכנס למצב של סיבוב, כי זה לא עוזר להגיע לקן.

מהקהל: איך ידענית יודעת איזה צד להתחבר?

פרופ' ניר גוב: היא מתחברת למקום פנוי. באופן סטטיסטי היא מגיעה לכיוון שממילא הגוף נע אליו. בדרך כלל היא מתחברת מהצד כי שם פנוי, מסובבת טיפה את הגוף כך שהיא תהיה בקדמה שלו.

מהקהל: למה קראת ל- F_{ind} טמפרטורה?

פרופ' ניר גוב: ההשפעה של הטמפרטורה היא עצומה. למעשה נמלה שלא כמו היונקים, שלא כמוכם, אין לה טמפרטורת גוף נשלטת, היא בטמפרטורה של הסביבה, כלומר שהמוח צריך לעבוד גם כשהיא יוצאת לחפש מזון ב-28 מעלות, שאז המוח שלי כבר מת, ועד 40 מעלות. בכל הטמפרטורות האלה בקיץ יש נמלים שסוחבות. יש השפעה, לא כימתנו אותה באופן מושלם, זה משהו שאנחנו רוצים לחקור. מה שמעניין זה לקשור את הטמפרטורה הזאת לטמפרטורה שנגרמת מהסביבה, שיודעים שהיא משפיעה על תכונות התאים, פתיחת תעלות, הקצב של הניורונים, פתיחה של ממברנות, ויש קשר למיקרוסקופיה של הפעולה המוחית.

אסיים עם ניסוי חמוד, מה קורה אם פריט המזון הזה שרואים פה – זו טבעת, הן חושבות שזה מזון – קשור בחוט. הנה החוט. החוט כאן, כיוון הקן הוא שם, מה קורה אם הן סוחבות אבל באיזה שלב ייתקעו עם החוט? כותרת השקף קצת מסבירה מה יקרה. זה מתחיל לעשות תנועת מטוטלת, אך לא תמיד. בדיוק מתי זה כן ומתי לא? כרגע גוף הנמלים נע חופשי, החוט נמתח, הן לא יכולות להמשיך לנוע לקן, מתחילות לעשות תנועת מטוטלת, תנועה מעניינת שלא תמיד קורית. המודל מנבא שאם גודל הגוף קטן מספיק, התנועה תפסיק. מצד שני, אם נחליף את החוט במוט קשיח והגוף יהיה מספיק גדול, הן יוכלו להיכנס לסחרור שלם אפילו הרחק

מהקן. את הדברים האלה ראינו בניסויים שנעשו בקיץ האחרון. אבל אז נגמרה העונה, וצריך לחכות בסבלנות עוד שנה. בשקף רואים את הניסוי ואת המודל.

אני לא יכול שלא לסיים עם מחשבות על בני-אדם, שמאוד מתרשמים מהנמלים מאז אבותינו הקדמונים. מה אפשר ללמוד מכל המחקר הזה על חברת בני-האדם? אולי כלום, כי אנחנו לא נמלים בסופו של דבר, אנחנו לא עברנו אבולוציה שכיוונה אותנו להיות באופטימום רק לביצוע משימה אחת, במקרה הזה סחיבת אוכל לקן. ברור שאנחנו חיה חברתית, רק בני-אדם ונמלים יכולים לסחוב ביחד, ובחברה יש כל הזמן מתח בין קונפורמיזם ואינדיבידואליות. אתם בוודאי חושבים שאתם אינדיבידואליסטים, אבל אתם מתלבשים דומה, מדברים דומה. על כך מתבססת החברה.

האם המיקס של אינדיבידואליות וקונפורמיזם שיש בחברה האנושית, גם עבר אופטימיזציה עבור השרידות שלנו כקבוצה בסוואנה באפריקה לפני חצי מיליון שנה? השאלה אילו יתרונות יש לשילוב של קונפורמיזם מול אינדיבידואליזם שאנחנו מוצאים בחברה האנושית. אין לי תשובה, אני לא יודע איך אפשר לבדוק זאת בניסוי פשוט כמו נמלים, אבל אלו מחשבות.

עוד מחשבה – לגבי הסדר החברתי בחברה האנושית, לאו דווקא לגבי גנטיקה אלא סידורים חברתיים. התגובה של הנמלים למצבים משתנים, כשהן צריכות לעקוף מכשולים, היתה אופטימלית כאשר הן לא קונפורמיסטיות ולא אינדיבידואליסטיות באופן מושלם. האם אפשר ללמוד מזה על הסידור החברתי המוצלח לבני-אדם? נמלה ידענית, ברגע שהיא משכה, כולם הרגישו אותה. אצל נמלים יש חופש העברת מידע מיידי. גם מיעוט, אחת מתוך הרבה, יודעת מה הדבר הנכון לעשות וכולן מיד נחשפות למידע הזה. זאת תכונה שאולי כדאי לאמץ מהן – להביע עמדה ולאפשר מעבר מידע ורעיונות באופן חופשי; גם אם למישהו אחד יש רעיון, לתת לו את הבמה שיגיד אפילו דבר הזוי, שאנחנו חושבים שהוא הזוי והוא לא. מנהיגות מתחלפת – אולי גם זה משהו שצריך לאמץ. אנחנו מאפשרים מידה מסוימת של אינדיבידואליות, לא מכריחים את כולם לעשות מה שהקבוצה עושה, מאפשרים לעשות דברים אחרים.

דמוקרטיה כמובן, זה אולי הסידור החברתי שפחות או יותר בני-אדם מצאו שמאפשר זאת. דמוקרטיה זה לאו דווקא דמוקרטיה מבנית כמו באתונה, אלא גם במשפחות מורחבות ושבטים בסוואנה; אולי החלטות לא התקבלו רק על-ידי מנהיג אחד, אלא על-ידי צוות אנשים, חכמים זקנים של השבט. זה סוג של חלוקת קבלת ההחלטות בפורומים גדולים יותר, אולי זה נתן ביטוי לגמישות הזאת של שינוי דעה – האפשרות לשנות החלטה בהתאם לתנאים משתנים. זה יתרון גדול בשרידות לעומת קבוצות שהלכו הראש בקיר, גם כשתנאים השתנו, ונעלמו. זה מה שיש לי לספר. תודה.

מהקהל: יש גבול? נניח שידענית אחת נוספה ל-15 נמלים, מה גבול הרגישות של קבוצה לתוספת של ידענית שהולך וקטן מול מספר הפריטים?

פרופ' ניר גוב: גם לקבוצה גדולה יכולות כל רגע להתחבר יותר ידעניות. זה משום שידעניות מגיעות בקצב קבוע, ועל פני גוף גדול יש יותר מקום להתחבר. לכן קצב ההתחברות יותר גבוה. ראינו שבכל זאת הקבוצה לא הצליחה לצאת מהמחסום, לא כי יש מחסור בידעניות, אלא כי קבוצה גדולה הופכת להיות כמו פרו-מגנט – מצב שבו קשה להחליף כיוון.

מהקהל: יש מסקנה על הגודל האופטימלי של קבוצה?

פרופ' ניר גוב: כן, אם רוצים להקים ועדה של בני-אדם שיגיעו למסקנות אופרטיביות, יש גודל שזה עובד. פורום גדול מדי לא יעיל. בפורום קטן אין מספיק מגוון רעיונות. תמיד מוצאים את שביל הזהב, אופטימום. השיקולים די דומים.

דוברת: נשאלה פה שאלה איך טמפרטורה משפיעה. רציתי לדעת איך דברים סביבתיים כמו בצורת או פיגוע טרור יכולים להשפיע?

פרופ' ניר גוב: הן נקראות נמלים משוגעות, כי אם באים אליהן במהלך סחיבה, כשרואים הרבה נמלים במקום אחד, תופסות את החגב שהן מחזיקות – אם אתם תזיזו את זה ותנערו, תראו שהנמלים נפוצות לכל עבר, רצות בתזזית. יש להן עוד יכולות התנהגות, לא רק סחיבה והרמה, אבל בהקשר של עולם שקט שאפשר להתחבר לקבוצה, אלה שתי ההחלטות שהן צריכות לקבל. עם זאת, מגוון ההתנהגויות שיש לנמלה כזאת קטנה הוא הרבה יותר רחב מאשר כל החיים רק להחליט אם היא סוחבת או מרימה. הן מאוד מושפעות מעוד דברים, אבל בעולם שקט שאין בו הפרעות, קבלת ההחלטות היא יחסית פשוטה ויכולה להיות בינארית כזאת. גם זה לא נכון במאה אחוז.

מהקהל: במודל שלך הנמלים הן כאילו זהות גנטית. לא בטוח שזה נכון, אבל זה משנה אם לא? פרופ' ניר גוב: לגבינו במודל, האם F_{IND} זהה לכולן? אם ההתפלגות לא רחבה, זה לא משנה הרבה. אם יש הרבה יותר קונפורמיסטיות מאשר לא קונפורמיסטיות – האינדיבידואליות לא מקלקלות, הן פשוט לא משתתפות. הקונפורמיסטיות הן בעייתיות; אם יש יותר מהן, הן יכולות להטות כל הקבוצה לאיזור קונפורמיסטי, שבו התגובה לידיענית מתמוטטת ואז הן יכולות להיתקע סביב מכשולים בדרך במשך שעות, וזה יותר חמור. קונפורמיסטים הם יותר מזיקים לקבוצה מאשר אוסף של אינדיבידואליסטים שלא משתתפים ולא עוזרים. אולי גם אצל בני-אדם זה ככה.

דובר: ראיתי סרט טלוויזיה על הנושא. בסרטון הראשון פה היו נמלים עם נקודות לבנות. פרופ' ניר גוב: פה זה לא נקודות לבנות. מה שראיתם זה באנליזה של המחשב, אלו נמלים בגודל שני מילימטר. יש יותר גדולות, עליהן אפשר לעשות סימונים על הגב. עושים את זה, אבל לא על הנמלים האלה. מהקהל: עוד שאלה אחת בקשר למה שראינו כאן. הידעניות הרי באות כדי להתחבר לצ'יריו. תמיד הידענית השנייה והשלישית נוגעות באלה שסוחבות את פריט המזון?

פרופ' ניר גוב: לא. כמעט כל מי שמגיעה היא ידענית, והיא לא נוגעת בפריט. מהקהל: למה תמיד ידענית אחת? מה קורה כשיש גוף גדול ואז יש יותר נקודות חיבור, ומתחברות יותר מידענית אחת פר זמן?

פרופ' ניר גוב: בגופים שהם קטנים, יש אופטימום של גודל החור לקן ובדרך כלל אין מקום ליותר מידענית אחת בכל רגע. הקושי הגדול לנווט לקן, זה כשהנמלים רחוקות מהקן והקצב שמגיעות ידעניות טריות מהקן הוא נמוך; שם הסכנה גדולה לאבד את הדרך. במרחק חצי מטר מהקן, כמות הנמלים הזורמות לקן היא גדולה ויודעים איפה הוא, כמו בקו ישר. זה ליד החור, כמו בגולף. במקומות שמצאו חגב מת בגינה רחוק מהקן ושם הנמלים מהקהל מעטות, זה החלק הקשה של לא לבזבז זמן ולהגיע לקן.

מהקהל: יש החלפה של ידעניות במהלך הדרך?

פרופ' ניר גוב: יש התנתקויות והתחברויות כל הזמן, בכל זאת הנמלים הולכות לאט יותר מאשר אילו הלכו בעצמן.

מהקהל: יש קשר בין הטמפרטורה לגודל הקבוצה?

פרופ' ניר גוב: כפונקציה של גודל הקבוצה, אינדיבידואלית לכל נמלה זה לא משנה. עדיין הן מתנהגות כאילו האפקטיביות משתנה. אין דרך ישירה למדוד זאת, חושבים על דרכים, כי המניפסטציה שלו זה פעולה של הקבוצה. לא קל למדוד את זה. היית רוצה למדוד ישירות את הכוחות שהן מפעילות בכל רגע נתון, יש לעשות זאת באמצעים מכניים שעובדים עליהם, עם קפיצים רגישים, כי מדובר בכוחות חלשים. עדיין אתה רוצה למדוד בלי להפריע, כי על-ידי זה שהכנסת התנגדות, זה משפיע על הפעולה של הנמלים. לעופר פיינרמן יש מחשבות על זה, אבל עוד לא עשו זאת בשום מעבדה בעולם. לא כרגע.

מהקהל: למה הנמלים לא יכולות גם לדחוף, חוץ מלמשוך ולהרים?

פרופ' ניר גוב: כנראה שהיכולת הזאת לא התפתחה אפקטיבית. כל אלמנט של סחיבה קולקטיבית – אם זה חתיכת מזון קטנה, היא מרימה וסוחבת ישר. איפה רואים התנהגות של לתפוס ולמשוך אחורה? כשנמלים מגינות על הקן מפני פולשים. הן תופסות מין פולש מכל הכיוונים וכולן מושכות, עובדות בחוסר קואורדינציה, רוצות לנטרל אותו או לקרוע אותו, אם זה צרעה או משהו כזה. תכונה כזאת קיימת בצורה רחבה בעולם הנמלים. המחשבה היא שזאת התנהגות בסיסית שבמשך האבולוציה השתכללה בחלק מהמינים, שהם מושכים אבל לא כולם מושכים, אלא אלה שמאחור מרימים. אולי זה התפתח מתכונה קדומה שמטרתה להגן נגד פולשים, שם רוצים לתפוס ולמשוך, למתוח את הזרועות של הצרעה עד שנקרעות לה הזרועות.

מהקהל: אולי הסחיבה התחילה קודם?

פרופ' ניר גוב: אבל סחיבה יש בצורה מצומצמת יותר מאשר הרמה. סחיבה זו תכונה נפוצה יותר בעולם הנמלים, לכן אולי היא הקדומה יותר. בכל אופן, זה לא נבדק אבולוציה מול גנטיקה.

מהקהל: מה קורה אם הנמלה לא יכולה להידבק עם הפה לפריט המזון?

פרופ' ניר גוב: אם הנמלה לא מסוגלת להידבק לפריט עם הפה, היא לא יכולה. כנראה שהן לא פוגשות במציאות אוכל שהוא טפולן.

מהקהל: הן לא אוכלות בזמן הסחיבה?

פרופ' ניר גוב: לא. יש סוג אחר של נמלים שאם ייתקלו במשהו גדול, יבואו כולן, יקרעו לגזרים או יחתכו חתיכות וייקחו לקן. אבל הנמלים האלה לא אוכלות תוך כדי סחיבה.

מהקהל: המצבים שהדגמת היו מעגליים. מה קורה כשיש עצם ארוך וצר, חד מימדי. אז הרעיון של להרים ולמשוך לא יעבוד.

פרופ' ניר גוב: בחנו מקרים כאלה, שמנו להם חתיכות פלסטיק בכל מיני צורות, בגדול המודל עובד, זה עדיין מה שהן עושות – מושכות או מרימות. אבל לא בניצב. זה הוצג בתחילת המצגת – אני לא יודע אם שמתם לב – אבל הן לא תמיד רדיאליות. נמלה יכולה להתחבר פה (מראה בשקף), להיות בזווית אל הרדיוס, לא תמיד בכיוון רדיאלי. נמלה יכולה להתחבר בכיוון שאליו היא רוצה למשוך. זה גוף ארוך, הן יכולות להתחבר לאורכו כמו משוטים בצורה יעילה. מה שכן גילינו, בעקבות כל מיני עצמים מוזרים שנתנו כל מיני צורות לא קונברסיות, וגם עצמים ששמנו עליהם פִּיבוט בנקודה מסוימת – שיש להן צורה מזרזה של הליכה, הליכה על הצד. הן יודעות ללכת ככה, אם אין להן ברירה אחרת זה מה שיעשו. בכל הזדמנות אחרת, אם אפשר ללכת רגיל – הן ילכו רגיל, זה הכי יעיל. אם ביטלת את כל האפשרויות, יש להן אפשרות ללכת על הצד תוך כדי שהן מחזיקות. לא חקרנו לעומק, צריך עוד לחקור, אבל זה אומר שקבלת החלטות שלהן יותר מסובכת מאשר רק בינארית.

מהקהל: עליות או ירידות בשטח משפיעות עליהן?

פרופ' ניר גוב: הן יכולות להחליק. אם זה רק מועך את הנמלים שמחזיקות למטה, זה ייתן איזון לכיוון התנועה, אבל לא עשו ניסויים כאלה. בעיקרון, במשוואות כל נמלה מרגישה את הכוחות שפועלים עליה, גם כבידה. אם יש עלייה – ה-FIND שלהן זה תכונה מוחית פנימית, גילינו מה שהתגלה כאן מהשוואה לניסויים במישור; אני מניח שהוא קצת יזוז בעלייה או בירידה, אבל במציאות הן נעות רוב הזמן על משטח שטוח. יש קצת עליות וירידות, אבל הן לא יעשו לעצמן אופטימום ל-60 מעלות כי הן לא גרות בעולם כזה. מסמנים לי שעליי לסיים. מי שרוצה, יכול לשאול אותי אינדיבידואלית. תודה רבה.