

השפעת אישיות הדבורה על תפקוד קולקטיבי בכוורת
חישוביות וקוגניציה בבעלי חיים (6170)
שיר רשקוביץ וחושן לוגסי

תקציר:

בעבודה זו בחנו כיצד תכונות אישיות של דבורים החיות יחד בכוורת משפיעות על התפקוד הקבוצתי של הכוורת בתהליך איסוף מזון. בעזרת מידול של התנהגויות שונות של דבורים, המשקפות את רמות החברותיות, החקר והנועזות שלהן, בדקנו את ההשפעה של אישיות על יעילות איסוף המזון של הקבוצה, ועל אחוזי ההישרדות של הדבורים בכוורת, אשר חיוניים להמשך קיום הכוורת וחבריה. התוצאות מצביעות על כך שקיים יתרון לרמת הטרוגניות מסוימת בכוורת, ובכך מדגימות את ההשפעה החיובית של שונות בקבוצה. כמו כן, התוצאות מצביעות על כך שקיימים שילובי תכונות אופטימליים יותר מאחרים עבור כוורת הומוגנית. התוצאות שהתקבלו עשויות לתרום להבנת התפקוד הקולקטיבי במערכות חיות, אשר מושפע מתכונות אינדיבידואליות של הפרטים באוכלוסייה, וכן לניהול מערכות אקולוגיות והתפתחות אבולוציונית.

מבוא:

דבורת הדבש היא מין של דבורה החי בארגון חברתי משוכלל בכוורת, במושבות שמונות עשרות עד מאות אלפי פרטים, ובראשן הדבורה המלכה. כל מושבה מורכבת בעיקר מנקבות "פועלות", אשר אחראיות על ביצוע עבודות איסוף המזון, טיפול בצאצאים, שמירה ותחזוקה בכוורת. באופן מפתיע, הנקבות הפועלות, הן לרוב אלו אשר מחליטות את ההחלטות החשובות בכוורת, ולא המלכה. הן מחליטות היכן לחפש צוף, מתי כדאי לצאת לחפש כוורת חדשה ואיפה, ומה הוא הזמן המתאים להחלפת המלכה.ⁱ אחד מתפקידי הנקבה הפועלת הוא לצאת מחוץ לכוורת לחפש אחר אבקת פרחים וצוף, המזינים את הדבורים בכוורת, ומובילים לייצור של דבש. הדבש שהדבורים מייצרות הוא תוצר של צוף איכותי שאותו עליהן לאתר מבין מבחר עצום של פרחים, בהתאם לעונה ולתנאי הסביבה. כדי לייעל את תהליך איסוף הצוף, הדבורים הפועלות משתפות מידע בנוגע למקומות שבהם אפשר למצוא פרחים עם צוף מובחר על ידי ריקוד, המכונה מחול הדבורה.ⁱⁱ שיתוף פעולה עשוי להיות יעיל יותר מהתנהלות אינדיבידואלית. לצד זאת, קיימים מקרים בהם החלטה קבוצתית אינה אופטימלית. למשל, כאשר החלטה קבוצתית מובילה את האינדיבידואל להתנהל ביחס לעצותיהם של אחרים, בעוד שההחלטה העצמאית של הפרט מובילה לתוצאה טובה יותר.ⁱⁱⁱ

בשנים האחרונות החלו מדענים להכיר בכך שאפילו חרקים כמו דבורים יכולים להיות בעלי תכונות 'אישיות', כלומר עם שוני בהתנהגות בין פרטים מאותו מין (Wright et al., 2019). עם זאת, ההשפעה של הבדלי אישיות אלה על התנהגויות קולקטיביות, במיוחד קבלת החלטות במהלך חיפוש מזון, אינה מובנת היטב. כאשר מתארים אישיות של בעלי חיים, נהוג להתייחס למזג, הנטיית או הטבע של בעל חיים, אשר חוזרים על עצמם לאורך זמן ובסיטואציות שונות. דוגמאות בולטות הן אגרסיביות, נכונות לקיחת סיכונים, חברותיות, הימנעות מחידושים, חקר וחברתיות. הבנה של האופן בו תכונות אישיות של דבורים עשו להשפיע על התפקוד הקולקטיבי של המושבה, תוכל לקדם את ההבנה שלנו במערכות חברתיות מורכבות, בהתפתחות אבולוציונית, וכן בניהול מערכות אקולוגיות (Réale et al., 2007). כמו כן, לדבורי הדבש חשיבות

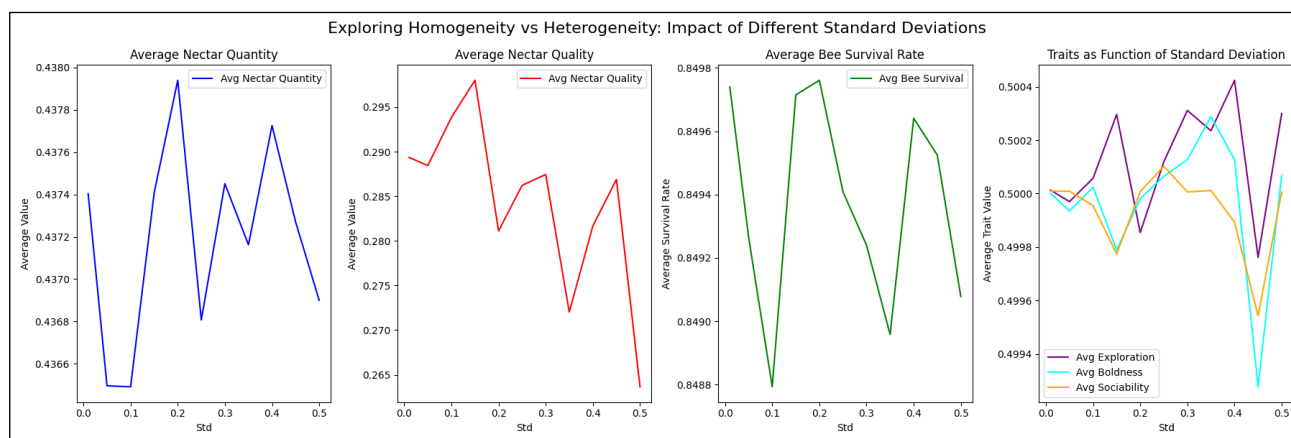
חקלאית וכלכלית אדירה כמאביק עבור גידולים חקלאיים וכן כיצור דבש (Hung et al., 2018), ולכן הבנה מעמיקה של תפוקת כוורת כתלות בתכונות אישיות של הדבורים המרכיבות אותה, עשויה לאפשר ייעול של תחומים אלה על ידי שימוש בכלים שונים, כמו למשל הנדסה ביו-טכנולוגית.

לכן, בעבודה זו ניסינו לשפוך אור על האופן שבו תכונות אישיות של דבורים בכוורת עשויות להשפיע על התפקוד הקולקטיבי של הכוורת, בהקשר של חיפוש ואיסוף מזון, כאשר בחרנו להתמקד בתכונות החברתיות, החקר והנועזות.

תוצאות:

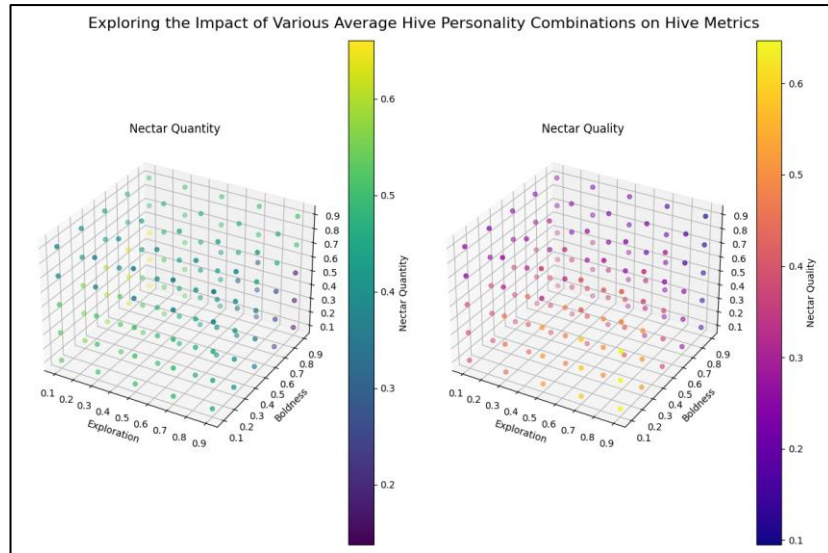
על מנת לבחון את שאלת המחקר, פיתחנו מודל התנהגותי של דבורים, כאשר הרמות השונות של תכונות האישיות של הדבורים מנחות את התנהגותן. באמצעות סימולציות חישוביות, ניתחנו מהו שילוב ערכי תכונות האישיות הממוצעים האידיאליים של הדבורים בכוורת הומוגנית, ביחס לכמות ואיכות המזון בכוורת. בנוסף, בדקנו את ההשפעה של הומוגניות מול הטרוגניות על התפוקה הקולקטיבית בכוורת. כלומר, בדקנו כיצד משפיע הגיוון, מידת השוני בתכונות האישיות בין חברות הדבורים בכוורת, על המזון שנאסף.

גרף 1: הטרוגניות מול הומוגניות



גרף זה מציג את ההשפעה של רמת הגיוון באוכלוסייה, השונות בין התכונות של פרטים בכוורת, על כמות הצוף (הגרף הכחול), איכות הצוף (הגרף האדום), ואחוז ההישרדות של הדבורים בכוורת (הגרף הירוק), עבור כוורת עם דבורים שרמת תכונותיהן מתפלגת עם ממוצע חצי, שהיא נקודת האמצע, האיזון. כאשר אין שונות באוכלוסיית הכוורת, כלומר, כאשר הערך בציר האופקי שווה לאפס, מדובר בכוורת הומוגנית. ככל שהערך בציר זה גדל, ניתן לראות את תוצאות המודל עבור כוורת הטרוגניות יותר. על פי תוצאות אלה, אין מגמה אחידה שניתן להצביע עליה. אולם, ניתן לראות כי ישנם ערכים גדולים מאפס עבורם מתקבלים ערכים גבוהים באופן יחסי עבור כמות הצוף בכוורת, איכות הצוף בכוורת, ואחוז ההישרדות של הדבורים בכוורת. למשל, עבור סטיית תקן השווה ל-0.15.

גרף 2: שילובי תכונות אופטימליים



גרף זה מציג שילובי ערכים שונים של תכונות החקרנות, הנועזות והחברותיות של דבורים בכוורת, המיוצגים על ידי שלושת הצירים, על כמות הצוף (הגרף השמאלי), וכן על איכות הצוף (הגרף הימני) הממוצעים שנאספו על ידי חברות הכוורת. ככל שכמות ואיכות הצוף גבוהה יותר, כך הצבע בהיר יותר, עבור שילוב כלשהו של רמות ממוצעות של תכונות. בתוצאות שהתקבלו, ניתן להבחין במגמה, לפיה ישנם שילובים אופטימליים יותר מאשר אחרים, שילובי ערכי תכונות שונות אשר מביאות לתוצאות גבוהות יותר. למשל, השילוב עבור כמות צוף גבוהה ביותר בכוורת הינו 0.1 עבור חקרנות, 0.9 עבור נועזות, ו-0.3 עבור חברותיות. לצד זאת, השילוב האידיאלי עבור איכות צוף גבוהה בכוורת הינו 0.9 עבור חקרנות, 0.1 עבור נועזות, ו-0.5 עבור חברותיות.

שיטות:

נציע מודל המדמה התנהגויות של דבורים בכוורת בעת חיפוש מזון, המבטאות שלוש תכונות עיקריות: חקרנות, נועזות, וחברתיות, ונבחן כיצד התנהגויות שונות משפיעות על התפקוד הקולקטיבי של הדבורים. המודל יבחן כיצד הגיוון בתכונות אישיות של דבורים בכוורת, וכן רמות שונות ושילובים שונים של תכונות אישיות של דבורים בכוורת, משפיעים על תפוקת הצוף בכוורת. תפוקת הצוף נמדדת על פי כמות ואיכות הצוף הממוצעים שהתקבלו בתהליך איסוף מזון, כאשר דבורים שלא שורדות את תהליך חיפוש ואיסוף המזון, לא תורמות דבר. ראשית, עבור כל אחת מהדבורים, ועבור כל אחת מהתכונות, דגמנו מספר מהתפלגויות גאוסיאניות, אשר מייצג את מידת התבטאות התכונה אצל דבורה כלשהי. בכדי להבטיח שהטווח בו תכונה של דבורה יכולה להתבטא הוא בין אפס לאחת, ממוצעי ההתפלגות תמיד היו בין אפס לאחת, וכן דגימה אשר חרגה מתחום זה הוגדרה כאחד או אפס, לפי קצה הטווח אליו הייתה קרובה יותר. נפרט אודות ההתנהגויות של הדבורים במודל בעת חיפוש מזון, והאופן בו הן משקפות את תכונות האישיות שלהן, בהתבסס על דפוסי התנהגויות נחקרים וידועים (Forkosh et al., 2019):

1. **תכונת החקרנות** בבעלי חיים מתבטאת בנטיית בעלי חיים לחקור את הסביבה שלהם, לחפש מקורות מזון חדשים, ולגלות את הסודות הנסתרים בסביבתם. נטייה זאת עשויה להוביל דבורה למצוא מקור מזון איכותי יותר, מאחר ויש לה היכרות נרחבת עם הסביבה, אך גם עלולה להוביל את הדבורה להיתקל ביותר סכנות. לכן, במודל שהצענו

תכונת החקר משפיעה על איכות הצוף אשר דבורה משיגה, ועל הסיכוי שלה לשרוד את החיפוש. כלומר, דבורים חקרניות יותר במודל הן בעלות סיכוי גבוה יותר להיהרג מסכנה בעת חיפוש המזון, אך גם בעלות סיכוי גבוה יותר למצוא מזון איכותי בעת חיפוש המזון בהינתן ונשארו בחיים.

2. **תכונת הנועזות** מתבטאת במידה בה בעליי חיים מציגים אומץ והתמודדות עם סיכונים ואיומים. הנועזות עשויה להתבטא במהלך הגנה על טריטוריה, חיפוש מזון או מאבק על שלטון בתוך הקבוצה. במודל, דבורים שאינן נועזות, ידבקו במקורות מזון מוכרים ופחות מסוכנים, שסביר כי יהיו מדוללים יותר, כלומר עם כמות צוף מעטה. לעומת זאת, דבורים נועזות אשר לא דבקות בפרח שמצאו, עשויות להביא כמות גדולה יותר של צוף. אולם, ייתכן כי חיפושים אלו יסתיימו באכזבה, ולא יובילו למקורות מזון נוספים. לכן במודל דבורים שאינן נועזות ישיגו מזון מדולל יותר, שיתבטא בכמות צוף בינונית, אך יציבה, ואילו דבורים נועזות יותר ישיגו מזון בכמות שנגריל באופן אקראי, המאפשר להשיג כמות גבוהה של צוף, אך יחד עם זאת קיים סיכון להשיג כמות מועטה במיוחד. כך המודל מביא לידי ביטוי את אי הוודאות שדבורה נועזת עלולה לחוות. בנוסף, על פי המודל שנבנה, לדבורה נועזת יש סיכוי נמוך יותר לשרוד, מכיוון שהדבורה עוברת בין פרחים ולא דבקה בפרח אחד, ועל כן סיכוייה להיתקל באויב גדלים.

3. **תכונת החברתיות** מתבטאת בנטיית בעלי חיים לחיות בקבוצות ולשתף פעולה עם חבריהם. התנהגות זו יכולה להיות במטרה להגן על עצמם, לשתף משאבים, לחפש מזון או לטפח יחסים חברתיים. במודל, רמת החברתיות של דבורה מתבטאת במידה בה היא משתפת פעולה להשגת מזון. המידול מתייחס לאפשרות של דבורה לחפש מזון לפי מחול של דבורה אחרת בכוורת, או לפי יכולותיה האישיות. דבורה חברתית תסייע לדבורה חברתית אחרת להביא צוף מאותו הפרח, כאשר שיתוף הפעולה יהיה עם תיעדוף עבור דבורה חברתית אשר מצאה מזון איכותי יותר. כאשר דבורה מחפשת מזון לפי הנחיותיה של דבורה אחרת, היא תספק את אותה איכות צוף, מאחר שהיא אוספת מזון מאותו הפרח. כמו כן, במקרה משתפת פעולה ואוספת מזון על פי הוראותיה של דבורה אחרת בכוורת, תכונותיה באות לידי ביטוי באופן מעט שונה. כך למשל, אין ביטוי לתכונת החקר, מאחר והדבורה בסך הכל נשמעת להוראות של דבורה אחרת, ואין תהליך של חקר הסביבה בחיפוש אחר פרח מובחר. לצד זאת, נועזות הדבורה עדיין עשויה לבוא לידי ביטוי, למשל במשך הזמן שהיא שוהה מחוץ לכוורת באיסוף המזון. כך, דבורה נועזת צפויה להישאר זמן רב יותר מחוץ לכוורת, ולכן סיכוייה לאסוף כמות גבוהה של צוף גדולים יותר. לעומת זאת, דבורה פחות חברתית, לא תקשיב לדבורים אחרות, אלא תחפש צוף לבד ובאופן עצמאי, ותמצא איכות וכמות צוף אשר תלויים בתכונות האישיות שלה, כפי שתיארנו.

במודל המוצג, אחוזי ההישרדות במקרה שדבורה מחפשת מזון על פי יכולותיה האישיות בלבד, מושפע הן מנועזות והן מחקר. לא מעורבות אינטראקציות באופן ישיר בין התכונות השונות, אך למשל דבורה חברתית במיוחד, בעלת סיכוי גבוה יותר ללכת לחפש מזון לפי דבורה אחרת בכוורת, ועל כן תכונת החקר לא תבוא לידי ביטוי, לעומת במצב בו הדבורה אינה תתבטא. לאחר מכן, יצרנו סימולציה של כוורת המכילות כאלף דבורים, כל אחת עם רמות מסוימות של תכונות אישיות, ודימינו את פעולת חיפוש המזון של הדבורים בכוורת, אשר הושפעה מההתנהגות

של הדבורים בכל שלב, אשר נקבעו על פי התכונות. במהלך סימולציה זו, כל אחת מן הדבורים מחפשת אחר מזון, ומסיימת עם כמות ואיכות מסוימות של צוף שהיא השיגה עבור הכוורת. דבורים שלא שורדות את החיפוש לא תורמות צוף לכוורת כלל. בתום פעולת חיפוש המזון, חישבו את אחוזי ההישרדות של הדבורים בכוורת, ואת איכות וכמות הצוף הממוצעת שנאספה, אשר יהוו את מידת ההצלחה של הכוורת, המכילה דבורים עם רמות ממוצעות מסוימות של חקרנות, נועזות, וחברתיות. המיצוע היה על פני אלף, כמספר הדבורים בתחילת הסימולציה, ולא על פי מספר הדבורים ששרדו. לכן התוצאות של תפוקת המזון מושפעות גם מאחוזי ההישרדות של הדבורים בכוורת בתהליך החיפוש. בכדי להסיק מסקנות המתבססות על מגמה שנצפית, ולא על מקריות, כל שאלה שבחנו, וכן הגרפים שיצרנו המציגים את תוצאות המודל, מתבססים על מיצוע של המשתנה התלוי על פני מספר רב של כוורות.

דיון:

תוצאות הסימולציה מספקות תובנות על היתרון בחיים במסגרת חברתית מורכבת, וכן על היתרון בשונות בין הפרטים במסגרת. ניתן ללמוד זאת מכך שקיבלנו כי מידה מסוימת של מגוון ושונות בתכונות אישיות בתוך מושבה מגביר את יעילותה בתפוקה המתקבלת מחיפוש מזון, ובסיכוי הממוצע של דבורה לשרוד. למשל, עבור סטיית תקן 0.15, כאשר טווח של תכונה נע בין 0 ל-1, כבר מייצר שונות לא מועטה באוכלוסיית הכוורת. כמו כן, התוצאות מלמדות שהתפקוד הקולקטיבי, האופן בו הדבורים משתפות פעולה במחול הדבורה, בעל תפקיד חיוני בהצלחת הכוורת. ניתן להסיק זאת מן הגרף השני, לפיו רמות חברתיות מסוימות בכוורת, הגדולות באופן ניכר מאפס, משפרות את הביצועים של איסוף המזון. בנוסף לכך, התוצאות שהתקבלו עבור שילובים אידיאליים של רמות ממוצעות של תכונות בכוורת, מצביע על כך שקיים טרייד-אוף בין תכונות החקר והנועזות, כך שכוורת שמתפקדת באופן מאד טוב היא או נועזת במיוחד וחקרנית במידה מועטה, או חקרנית במיוחד ונועזת במיטה מועטה. כלומר, כוורת אשר בממוצע מאד נועזת וגם חקרנית, תתפקד באופן פחות טוב, וכן עבור הקיצון השני. זה מעיד על כך שישנן אינטראקציות מורכבות שונות אשר נוצרות בין התנהגויות המבטאות תכונות אישיות, אשר משפיעות על התפקוד הקולקטיבי של הכוורת.

יחד עם זאת, קיימות מספר מגבלות במודל המוצע, והן מספר צעדים משמעותיים להמשך. ראשית, על אף שמצאנו הבדלים בתפוקת המזון כאשר בחנו גיוון בכוורת, ההבדלים הם בסקאלה יחסית קטנה. כמו כן, המחקר לא מתייחס לציון של תפוקת המזון שנאסף במונחי השוואה בין איכות וכמות המזון, ויש צורך במחקר המשך אשר מיישב לבטים אלו בכדי לקבוע מסקנות מעבר למגמה שנצפתה, בנוגע לאופטימליות של ערכים מסוימים. בנוסף, על מנת להבין את התפקוד הקולקטיבי של הכוורת לאורך זמן, ולהסיק מסקנות איכותיות על היכולת של דבורים לשרוד ולאסוף מזון, יש לדמות סביבה וירטואלית של פרחים, אשר מתחשבת באופן התרבותם, אשר מושפע מאד מהאבקה של דבורה המגיעה לביקור, וכן מתנאים סביבתיים נוספים. כמו כן, האופן בו התכונות מאופיינות במודל הינו חלקי, ולא נאמן באופן מוחלט למציאות. כמו כן, כל תכונה עשויה להתבטא באמצעות מגוון רחב של התנהגויות, ובמודל המוצע ההשפעה של כל תכונה על תהליך חיפוש המזון אופיינה באופן מוגבל. כמו כן, ישנן תכונות אישיות נוספות אשר לא התייחסנו אליהן במודל, המאפיינות את הדבורים בכוורת. התחשבות בנסיבות נוספות אלה,

עשויה להשפיע במידה משמעותית על התפקוד האישי והקולקטיבי בעת איסוף המזון בכוורת, ולפיכך על תפוקת המזון ואחוזי ההישרדות בכוורת, ולכן על שילובי תכונות ורמת גיוון אופטימליים בכוורת. במודל אשר ישקף באופן מהימן יותר את המציאות, יש להתייחס לנקודות הללו. על אף המגבלות, העבודה מציעה מודל אשר מתבסס על התנהגויות ידועות המאפיינות דבורים החיות יחדיו בכוורת, ומציע תובנות מעניינות על היתרונות של שונות בין פרטים בני אותו המין, שיתוף פעולה, ומציע השערה לפיה ישנם שילובי תכונות שעשויות להגביר את התפוקה של דבש בכוורת.

Product vs Strategy. (n.d.). *SISolutions*. Retrieved August 2, 2023, from <https://www.sisolutions.co.il/post/product-vs-strategy>

Collective decision making. (n.d.). In Wikipedia. Retrieved August 2, 2023, from ⁱⁱⁱ
https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A7%D7%91%D7%9C%D7%AA_%D7%94%D7%97%D7%9C%D7%98%D7%95%D7%AA_%D7%A7%D7%91%D7%95%D7%A6%D7%AA%D7%99%D7%AA

Hung, K. L. J., Kingston, J. M., Albrecht, M., Holway, D. A., & Kohn, J. R. (2018). - The worldwide importance of honey bees as pollinators in natural habitats. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1870), 20172140.

Forkosh, O., Karamihalev, S., Roeh, S., Alon, U., Anpilov, S., Touma, C., ... & Chen, - A. (2019). Identity domains capture individual differences from across the behavioral repertoire. *Nature neuroscience*, 22(12), 2023-2028.

GitHub Repository - Cognition and Computation in Animals