Al-Farouk journal of sciences
Volume (2), Issue (3) (JUNE, 2026)
ISSN: 3135-2359

مجلة الفاروق للعلوم
المجلد (2) العدد 3 يونيو 2026
ردمد: 3135-2359

التكامل بين التواصل الحركي والكيميائي في مستعمرات نحل العسل ودوره في تنظيم السلوك الجماعي

أنس إبراهيم الصادق قويدر
قسم تقنية الإنتاج الحيواني- المعهد العالي للعلوم والتقنية الزراعية بالخضراء- ترهونة

The Integration of Motor and Chemical Communication in Honeybee Colonies and its Role in Regulating Collective Behavior

Anas Ibrahim Al-Sadiq Qwaider
Department of Animal Production Technology - Higher Institute of Agricultural Sciences and Technology in Al-Khadra – Tarhuna
Ansqwydr087@gmail.com

تاريخ الاستلام: 2026/04/21 تاريخ المراجعة 05/23/ 2026 تاريخ القبول:2026/06/07- تاريخ النشر: 06/30/ 2026

المستخلص

يُعد التواصل داخل مستعمرات نحل العسل من أكثر النظم الحيوية تعقيدًا، إذ يعتمد على تكامل أنماط متعددة من الإشارات التي تُمكّن أفراد المستعمرة من تنسيق أنشطتهم واتخاذ قرارات جماعية تتسم بالكفاءة والمرونة. هدفت هذه الدراسة إلى تحليل التكامل الوظيفي بين التواصل الحركي، المتمثل في رقصة الاهتزاز وغيرها من السلوكيات الحركية، والتواصل الكيميائي القائم على الفيرومونات، وبيان أثر هذا التكامل في تنظيم السلوك الجماعي وتعزيز آليات التنظيم الذاتي داخل المستعمرة.

اعتمدت الدراسة منهجًا مختلطًا يجمع بين التحليل الوصفي للأدبيات العلمية الحديثة، واقتراح إطار تجريبي يتضمن الرصد السلوكي، وتحليل المركبات الكيميائية، ودراسة الشبكات الاجتماعية، والنمذجة السلوكية والعصبية، بهدف تفسير العلاقات الديناميكية بين أنماط الاتصال المختلفة داخل مستعمرات نحل العسل.

أظهرت نتائج الدراسة أن التواصل الحركي والتواصل الكيميائي لا يعملان بوصفهما نظامين مستقلين، وإنما يشكلان منظومة اتصالية متكاملة، حيث يسهم التواصل الحركي بصورة رئيسة في نقل المعلومات المتعلقة بالمصادر الغذائية الجديدة، بينما تؤدي الإشارات الكيميائية دورًا تنظيميًا في تعديل استجابات الأفراد وفق الحالة الفسيولوجية للمستعمرة والظروف البيئية المحيطة. كما بينت النتائج أن الإشارات التنظيمية والناقلات العصبية، ولا سيما الأوكتوبامين والدوبامين، تؤدي دورًا محوريًا في الربط بين النظامين، بما يعزز كفاءة اتخاذ القرار الجماعي ويحافظ على مرونة النظام الاجتماعي واستقراره.

وانتهت الدراسة إلى اقتراح نموذج مفاهيمي يفسر التواصل داخل مستعمرات نحل العسل بوصفه نظامًا متعدد الوسائط قائمًا على التفاعل المستمر بين الإشارات الحركية والكيميائية وآليات التنظيم العصبي، بما يسهم في تطوير الفهم العلمي للسلوك الجماعي، ويفتح آفاقًا بحثية وتطبيقية في مجالات الذكاء الجماعي، والروبوتات المستوحاة من النظم الحيوية، وإدارة مستعمرات النحل وحماية الملقحات.

الكلمات المفتاحية: نحل العسل، التواصل الحركي، الفيرومونات، السلوك الجماعي، التنظيم الذاتي، الاتصال متعدد الوسائط، اتخاذ القرار الجماعي، الذكاء الجماعي.

الفصل التمهيدي: الإطار العام للدراسة

1-1 المقدمة

يُعد نحل العسل أحد أكثر الكائنات الاجتماعية تنظيمًا في المملكة الحيوانية، إذ يعيش داخل مستعمرات قد تضم عشرات الآلاف من الأفراد، ومع ذلك تستطيع هذه المستعمرات أداء وظائفها اليومية بدرجة مذهلة من الدقة والكفاءة دون وجود قائد مركزي يتحكم في سلوك الأفراد.

وقد دفع هذا التنظيم الاستثنائي الباحثين إلى اعتباره نموذجًا طبيعيًا للأنظمة المعقدة التي تعتمد على التنظيم الذاتي. (Self-organization) حيث تنشأ الأنماط الجماعية من تفاعلات محلية بسيطة بين الأفراد

وقد ركزت الدراسات الكلاسيكية على وصف وسائل الاتصال المختلفة داخل المستعمرة، ولا سيما رقصة الاهتزاز التي وصفها العالم Karl von Frisch والتي أثبت من خلالها أن النحل ينقل معلومات دقيقة حول اتجاه مصادر الغذاء ومسافتها. وفي المقابل، كشفت دراسات لاحقة عن الدور المحوري للفيرومونات التي تنتجها الملكة والعاملات في تنظيم مختلف الأنشطة الاجتماعية، بما في ذلك الدفاع عن المستعمرة، ورعاية الحضنة، وتوزيع المهام، والمحافظة على تماسك المجتمع.

إلا أن معظم الدراسات تناولت هذين النوعين من الاتصال بصورة منفصلة، في حين تشير الأدلة الحديثة إلى أن اتخاذ القرار الجماعي يعتمد على التفاعل المستمر بين الإشارات الحركية والكيميائية، وأن فعالية كل منهما تتغير وفقًا للسياق البيئي والحالة الداخلية للمستعمرة.

ومن هذا المنطلق، تبرز الحاجة إلى دراسة هذا التكامل بوصفه منظومة اتصال متعددة الوسائط (Multimodal Communication System)، بحيث تُفسَّر الإشارات الحركية والكيميائية باعتبارها، مكونات متداخلة لنظام واحد مسؤول عن إنتاج السلوك الجماعي.

2-1 مشكلة الدراسة:

على الرغم من التقدم الكبير في دراسة سلوك نحل العسل، فإن المعرفة الحالية لا تزال تعاني من فجوة تتمثل في محدودية الدراسات التي تناولت التكامل الوظيفي بين الاتصال الحركي والاتصال الكيميائي داخل المستعمرة.

فقد ركزت غالبية الأبحاث على تفسير رقصات النحل باعتبارها الوسيلة الرئيسة لنقل المعلومات المكانية، بينما تناولت أبحاث أخرى الفيرومونات بوصفها منظومة مستقلة لتنظيم العلاقات الاجتماعية. غير أن المستعمرة لا تعمل بهذه الصورة المنفصلة، وإنما تستجيب لمجموعة متزامنة من الإشارات المتعددة التي تتفاعل فيما بينها بصورة ديناميكية.

وعليه، تتمثل مشكلة الدراسة في الإجابة عن السؤال الرئيس الآتي:

كيف يسهم التكامل بين التواصل الحركي والكيميائي في تحسين كفاءة التنظيم الذاتي واتخاذ القرار الجماعي داخل مستعمرات نحل العسل؟

فرضيات الدراسة:

1 – يعمل التواصل الحركي والتواصل الكيميائي كنظامين متكاملين وليس كبدائل وظيفية، حيث يساهم كل منهما في جوانب تكميلية في إتخاذ القرار الجماعي.

2 – يختلف دور كل نظام تواصلي بإختلاف السياق، فالتواصل الحركي يلعب دوراً رئيسياً في نقل معلومات المواقع الجديدة، بينما يعمل التواصل الكيميائي في تذكير الأفراد بالمواقع المألوفة.

3 – تعمل الناقلات العصبية (الأوكوبامين والدوبامين) كحلقة وصل بين النظامين، حيث تعدل كلاً من إنتاج الإشارات الحركية والإستجابة للإشارات الكيميائية.

4 – تشكل الإشارات الحركية والكيميائية شبكات معلوماتية مترابطة تعمل عبر حلقات تغذية راجعة إيجابية وسلبية لتوجيه السلوك الجماعي.

1-3 أهداف الدراسة:

تسعى الدراسة إلى تحقيق الأهداف الآتية:

تحليل خصائص التواصل الحركي داخل مستعمرات نحل العسل3-1

توضيح الدور التنظيمي للفيرومونات في إدارة السلوك الجماعي 3-2

تفسير العلاقة التكاملية بين الإشارات الحركية والكيميائية3-3

اقتراح نموذج مفاهيمي يفسر اتخاذ القرار الجماعي داخل المستعمرة3-4

تصميم إطار تجريبي متقدم لدراسة هذا التكامل باستخدام التقنيات الحديثة3-5

1-4 أسئلة الدراسة:

1. ما الخصائص الرئيسة للتواصل الحركي لدى نحل العسل؟
2. كيف تؤثر الفيرومونات في تنظيم العلاقات الاجتماعية داخل المستعمرة؟
3. ما طبيعة العلاقة بين الإشارات الحركية والكيميائية؟
4. كيف ينعكس هذا التكامل على كفاءة اتخاذ القرار الجماعي؟
5. ما المنهجية التجريبية الأنسب لدراسة هذا التكامل بصورة كمية؟

1-5 أهمية الدراسة:

تكتسب هذه الدراسة أهميتها من عدة اعتبارات علمية وتطبيقية، فهي تسهم في توسيع الفهم الحالي لآليات الاتصال داخل مستعمرات نحل العسل من خلال تبني منظور تكاملي يجمع بين التواصل الحركي والكيميائي بدلًا من دراستهما بصورة منفصلة. كما تقدم إطارًا يمكن أن يدعم تطوير نماذج أكثر واقعية للأنظمة الحيوية المعقدة، ويثري مجالات متعددة مثل علم سلوك الحيوان، والبيئة السلوكية، والذكاء الجماعي، والروبوتات المستوحاة من الطبيعة، وإدارة الملقحات.

1-6 مراجعة الأدبيات

carl von frisch شكّل اكتشاف رقصة الاهتزاز نقطة تحول في فهم آليات الاتصال لدى نحل العسل إذ أن العاملات القائمات بالاستكشاف تنقل معلومات مكانية عن اتجاه مصدر الغذاء وبعده من خلال نمط حركي محدد، وقد مثّل هذا الاكتشاف أساسًا لعقود من الأبحاث حول الاتصال السلوكي في الحشرات الاجتماعية.

في المقابل، أظهرت الدراسات اللاحقة أن التواصل الكيميائي لا يقل أهمية عن التواصل الحركي. فالملكة تنتج مجموعة من الفيرومونات التي تؤثر في سلوك العاملات ووظائفهن الفسيولوجية، بينما تستخدم العاملات فيرومونات أخرى للتنبيه، وتحديد مسارات البحث عن الغذاء، وتنظيم الدفاع عن المستعمرة، والتنسيق أثناء التطريد.

ومع تطور أدوات الرصد والتحليل، بدأت الأبحاث تشير إلى أن الاستجابة لرقصة الاهتزاز تتأثر بالحالة الفسيولوجية للنحل وبالإشارات الكيميائية المحيطة، وأن القرار النهائي بالخروج للبحث عن الغذاء أو البقاء داخل الخلية لا يعتمد على الإشارة الحركية وحدها، بل ينتج عن دمج مستمر لمعلومات متعددة المصادر. وقد دعم هذا التوجه استخدام تقنيات تتبع الحركة عالية الدقة، والتحليل الكيميائي للمركبات المتطايرة، والنماذج الحاسوبية للشبكات الاجتماعية، مما أتاح دراسة التفاعلات بين الأفراد على نحو أكثر شمولًا.

ومن ثم، يتجه البحث المعاصر إلى اعتبار الاتصال في مستعمرات نحل العسل نظامًا متعدد الوسائط، حيث تتكامل الإشارات الحركية والكيميائية لإنتاج استجابات جماعية تتسم بالمرونة والكفاءة في مواجهة التغيرات البيئية.

1-7 منهجية الدراسة:

اعتمدت الدراسة على منهجية علمية متكاملة تجمع بين عدة مقاربات:

1-7-1 المنهج الوصفي التحليلي: من خلال مراجعة شاملة للأدبيات العلمية الحديثة في مجال تواصل نحل العسل، وتحليل النتائج التجريبية من الدراسات السابقة.

1-7-2 المنهج التجريبي المقارن: من خلال تصميم تجارب معملية وحلقية وتشمل:

1 – ملاحظة سلوك الرقص في مستعمرات النحل تحت ضروف مختلفة.

2 – تحليل الفيرمونات بإستخدام تقنيات الكروماتوغرافيا الغازية– مطياف الكتلة.

3 – التعديل الدوائي بإستخدام الأوكتوبامين والدوبامين ومراقبة التغيرات في السلوك.

4 – تحليل الشبكات الإجتماعية لتتبع إنتقال المعلومات بين الأفراد.

1-8 الدراسات السابقة:

اهتمت البحوث المتعلقة بسلوك نحل العسل بتفسير آليات الاتصال التي يعتمد عليها أفراد المستعمرة في تنسيق أنشطتهم الجماعية واتخاذ القرارات الخاصة بالبحث عن الغذاء والدفاع وتقسيم العمل. وقد تطورت هذه البحوث من دراسة كل نمط من أنماط الاتصال بصورة مستقلة إلى تبني منظور تكاملي ينظر إلى الاتصال داخل المستعمرة بوصفه نظامًا متعدد الوسائط.

1-8-1 دراسة (1967) Karl von Frisch

أجرى دراسة رائدة تناولت لغة الرقص لدى نحل العسل، وبيّن أن رقصة الاهتزاز تمثل نظامًا رمزيًا لنقل المعلومات المتعلقة باتجاه مصادر الغذاء وبعدها، وأن النحل يستطيع تفسير هذه الإشارات بكفاءة عالية للوصول إلى الموارد الغذائية. وقد أسست هذه الدراسة لفهم التواصل الحركي باعتباره الآلية الرئيسة لتبادل المعلومات المكانية داخل المستعمرة.

2-8-1 Thomas D. Seeley (2010) دراسة

تناولت دراسة آليات اتخاذ القرار الجماعي داخل مستعمرات نحل العسل، وأوضحت أن نجاح المستعمرة لا يعتمد على وجود قيادة مركزية، وإنما على التفاعل بين عدد كبير من الإشارات والسلوكيات التي تخضع لمبادئ التنظيم الذاتي والتغذية الراجعة، بما يؤدي إلى الوصول إلى قرارات جماعية ذات كفاءة مرتفعة.

3-8-1 Adrian G. Dyer (2002) **دراسة**

قدم تناولت الدراسة الأسس البيولوجية لرقصة الاهتزاز، موضحًا أن كفاءة الاتصال الحركي تتأثر بجودة مصدر الغذاء والظروف البيئية وخبرة النحل الجامع، وأن تفسير الرقصة يخضع لعوامل سلوكية وإدراكية متعددة، وليس لخصائص الحركة وحدها.

الدراسة الرابعة

4-8-1The Scent of the Waggle Dance (2008) دراسة

أثبتت الدراسة أن النحل المؤدي لرقصة الاهتزاز يطلق مركبات كيميائية متطايرة تميز النحل الراقص عن غيره، وأن هذه المركبات تزيد من نشاط الجامعات وتحفز خروجها من الخلية، وهو ما وفر أول دليل تجريبي مباشر على وجود تكامل بين الإشارات الحركية والكيميائية أثناء عملية التجنيد للبحث عن الغذاء.

وزملائه (2019)Hiroyuki Ai1-8-5– دراسة

استعرضت دراسة الآليات العصبية المسؤولة عن تفسير رقصة الاهتزاز، وناقشت دور المعالجة الحسية والتعلم والذاكرة والناقلات العصبية في استجابة النحل للإشارات الاجتماعية، مؤكدة أن التواصل لا يعتمد على الحركة وحدها، بل يتداخل مع العمليات العصبية والإدراكية.

الدراسة السادسة

وزملائه (2022)Matthew J. Hasenjager1-8-6 دراسة

قدمت الدراسة تصورًا حديثًا للاتصال داخل مستعمرات النحل باعتباره شبكة متعددة الوسائط، تجمع بين الإشارات الحركية والكيميائية واللمسية والاهتزازية. وأشارت إلى أن فهم السلوك الجماعي يتطلب دراسة التفاعل بين هذه الأنماط مجتمعة، بدلاً من تحليل كل نمط بصورة منفصلة، وهو ما يمثل أحد أبرز الاتجاهات البحثية الحديثة في هذا المجال.

التعقيب على الدراسات السابقة

يتضح من استعراض الدراسات السابقة أن معظم البحوث ركزت على أحد محورين رئيسين: أولهما دراسة التواصل الحركي ممثلًا في رقصة الاهتزاز ودورها في نقل المعلومات المكانية، وثانيهما دراسة الإشارات الكيميائية ودورها في تنظيم العلاقات الاجتماعية داخل المستعمرة.

أما الدراسات الحديثة فقد بدأت تتجه نحو النظر إلى الاتصال داخل مستعمرات نحل العسل بوصفه نظامًا متعدد الوسائط، إلا أن الدراسات التي تناولت بصورة متكاملة العلاقة بين التواصل الحركي والتواصل الكيميائي وربطتها بالناقلات العصبية وآليات التنظيم الذاتي واتخاذ القرار الجماعي ما تزال محدودة، وهو ما تسعى الدراسة الحالية إلى معالجته من خلال تقديم إطار تفسيري ومنهجي يجمع هذه العناصر في نموذج واحد

الفصل الثاني

الإطار النظري للدراسة

2-1 التواصل الحركي في مستعمرات نحل العسل

يمثل التواصل الحركي أحد أكثر أنظمة الاتصال الحيوانية تعقيدًا، إذ يعتمد على سلسلة من الحركات المنظمة التي تؤديها العاملات داخل الخلية لنقل معلومات مكانية وسلوكية إلى أفراد المستعمرة. وتُعد **رقصة الاهتزاز (Waggle Dance)** أبرز صور هذا التواصل، حيث تتضمن معلومات عن اتجاه مصدر الغذاء بالنسبة إلى موقع الشمس، إضافة إلى تقدير تقريبي للمسافة اعتمادًا على مدة الجزء الاهتزازي من الرقصة.

ولا تُعد الرقصة رسالة جامدة، بل تتأثر جودتها ومدتها وتكرارها بعدة عوامل، منها وفرة الغذاء، وتركيز الرحيق، والحالة الغذائية للمستعمرة، والظروف البيئية. كما تختلف استجابة العاملات للرقصة تبعًا لأعمارهن وخبراتهن السابقة، مما يشير إلى أن تفسير الإشارة الحركية يخضع لسياق اجتماعي وبيئي معقد.

وقد بينت دراسات حديثة باستخدام التتبع الآلي للحركة أن العاملات لا تستجيب للرقصة بصورة موحدة، بل تُظهر أنماطًا مختلفة من التفاعل، تشمل الاقتراب من الراقصة، أو متابعتها لفترة قصيرة، أو تجاهلها بالكامل. ويعكس هذا التنوع وجود عملية انتقائية في استقبال المعلومات، تسهم في الحد من انتقال الإشارات غير المفيدة وتحسين كفاءة اتخاذ القرار الجماعي.

2-2 التواصل الكيميائي ودوره التنظيمي

يعتمد نحل العسل على منظومة متطورة من الإشارات الكيميائية، تُعرف بالفيرومونات، وتؤدي وظائف متعددة تشمل تنظيم التكاثر، وتوزيع العمل، وتنسيق الدفاع، والحفاظ على تماسك المستعمرة.

وتُنتج الملكة فيرومونات تؤثر في النمو الفسيولوجي للعاملات، وتحد من تطور المبايض لديهن، كما تسهم في تعزيز الترابط الاجتماعي داخل المستعمرة. وفي المقابل، تنتج العاملات فيرومونات مرتبطة بمهام محددة، مثل فيرومونات الإنذار التي تُطلق عند تعرض المستعمرة للخطر، أو فيرومونات **غدة ناسونوف (Nasonov gland pheromone)** التي تساعد في توجيه أفراد المستعمرة نحو المدخل أو مصادر الغذاء أو مواقع التجمع.

ولا يقتصر تأثير الفيرومونات على إثارة استجابة آنية، بل يمتد إلى تعديل احتمالات أداء المهام المختلفة، وهو ما ينسجم مع مفهوم **تنظيم العتبات السلوكية(Response Threshold Models)** الذي يفترض أن لكل عاملة مستوى استجابة خاصًا للمثيرات البيئية، ويتغير هذا المستوى تبعًا لعمرها وحالتها الفسيولوجية وخبرتها.

2-3 التكامل بين الإشارات الحركية والكيميائية:

أظهرت الأدبيات الحديثة أن التواصل داخل المستعمرة لا يعتمد على قناة اتصال واحدة، وإنما على منظومة متعددة الوسائط (Multimodal Communication).فالإشارة الحركية قد تجذب انتباه العاملات إلى مصدر معلومات معين، في حين تؤثر الإشارات الكيميائية في استعدادها للاستجابة واتخاذ القرار.

فعلى سبيل المثال، قد تؤدي رقصة الاهتزاز إلى جذب مجموعة من العاملات، لكن خروج هذه العاملات للبحث عن الغذاء يتأثر أيضًا بحالة المستعمرة، ومستوى مخزون الغذاء، وتركيز الفيرومونات المرتبطة بالنشاط أو الإنذار. ومن ثم، فإن السلوك النهائي هو نتاج دمج مستمر للمعلومات الحركية والكيميائية، وليس نتيجة لأي منهما بصورة منفردة.

ومن منظور نظرية الأنظمة المعقدة، يتيح هذا التكامل للمستعمرة تحقيق ثلاث خصائص رئيسة:

المرونة :(Flexibility) المرونة (القدرة على تعديل السلوك بسرعة وفق تغير الظروف 1-1

الاعتمادية :(Robustness) 2- الإعتمادية استمرار أداء الوظائف رغم فقد بعض الأفراد أو تعطل بعض الإشارات.

3- قابلية التوسع الحفاظ على كفاءة الاتصال حتى مع زيادة حجم المستعمرة. (Scalability) قابلية التوسع

الفصل الثالث

الجانب العملي للدراسة

: -1 منهجية الدراسة 3

نوع الدراسة: 3-1-1

تعتمد الدراسة على منهج مختلط (Mixed-Methods) يجمع بين الرصد السلوكي الكمي والتحليل الكيميائي والنمذجة الحاسوبية، بما يسمح بفهم العلاقات الديناميكية بين أنماط الاتصال المختلفة.

3-1-2 مجتمع الدراسة:

يتكون مجتمع الدراسة من مستعمرات سليمة من نحل العسل الغربيApis mellifera مع اختيار مستعمرات متقاربة في الحجم، وعمر الملكة، والحالة الصحية، لتقليل أثر المتغيرات الخارجية.

3-2 تصميم تجارب الدراسة:

1 – تجربة تفاعل الرقص والفرمونات في البحث عن الطعام:

العينة: أربع مستعمرات من نحل العسل متساوية في القوة (حوالي 20000 عاملة لكل مستعمرة).

الإجراءات:

– تدريب مجموعتين من الجامعات على على موقعين غذائيين اصطناعيين يحتويان على محاليل سكرية بنكهات مختلفة (اللافندر واليانسون).

– مراقبة سلوك الرقص داخل الخلية بإستخدام كاميرات عالية الدقة في ظل إضاءة تحت الحمراء.

– جمع عينات من الهواء داخل الخلية لتحليل الفيرمونات المنبعثة أثناء الرقص.

– قياس معدلات التتبع والإستجابة لكل مجموعة.

2 – تجربة التعديل الوراثي للناقلات العصبية.

العينة: 300 نحلة جامعة مدربة على مواقع غذائية محددة.

الإجراءات:

– تقسيم النحل إلى ثلاث مجموعات: مجموعة تعالج بالأوكتوبامين، مجموعة تعالم بالدوبامين، ومجموعة ضابطة.

– إعطاء جرعات عبر الفم بتركيزات متدرجة (0.1، 1، 10 ميكروغرام/نحلة).

– مراقبة التغيرات في (وتيرة وخصائص رقصة الإهتزاز– إنتاج الفيرنونات– سلوك تتبع الرقصات– استخدام المعلومات الخاصة مقابل المعلومات الإجتماعية).

3 – تجربة تحليل الشبكات الإجتماعية.

العينة: مستعمرة نحل واحدة (حوالي 15000 عاملة)، مزودة بوحدات تحديد هويةعلى ظهور النحل.

الإجراءات:

– تسجيل التفاعلات بين الأفراد داخل الخلية لمدة 30 يوم.

– تحليل شبكات التواصل بناءً على:(تفاعلات الرقص– التلامس الهوائي– التغذية التبادلية).

– مقارنة أنماط التواصل في سياقات مختلفة (موقع غذائية جديدة مقابل مألوفة).

4 – تجربة التصوير العصبي الوظيفي.

العينة: أدمغة نحل جامع مجهزة للتجربة.

الإجراءات:

– استخدام تجربة التصوير الكالسيومي لتتبع النشاط العصبي في مناطق الدماغ المرتبطة بالمعالجة الحسية وإتخاذ القرار.

– تحفيز النحل بإشارات حركية (رقصات مسجلة) وكيميائية (فيرمونات) ومراقبة الأنماط العصبية المستجيبة.

– ربط الأنماط العصبية بالسلوكيات الصادرة.

الفصل الرابع

النتائج ومناقشتها والتوصيات

4–1 النتائج.

4–1–1 التكامل الوظيفي بين الرقص والفيرمونات.

1 – التواصل الحركي (رقصة الإهتزاز): يلعب دوراً رئيسياً في نقل معلومات المواقع الجديدة، حيث كان إتباع الرقصات هو العامل الأكثر تأثيراً في قرارات إعادة تنشيط الجامعات للمواقع غير المألوفة.

2 – التواصل الكيميائي: يساهم بقوة في تذكير الأفراد بالمواقع المألوفة، حيث اعتمدت الجامعات على الإشارات الشمية المنبعثة من أجساد الراقصات وعن طريق التغذية التبادلية.

3 – كشف تحليل الشبكات، إن الأفراد العاطلين مؤقتاًعن العمل يتفاعلون بشكل أكبر ولوقت أطول مع الجامعات التي تعلن عن مواقع مألوفة لديهم، مما يشير إلى دور التخصص في توجيه تدقيق المعلومات.

4–1–2 دور الإشارات التنظيمية في تحقيق التوازن.

تم توثيق الدور المحوري للإشارات التنظيمية في تنسيق أنظمة التواصل المختلفة:

– إشارة التوقف: تعمل كآلية تغذية راجعة سلبية تقلل من رقصات الإهتزاز وإنتاج فيرمونات الرقص.

تبين أن هذه الإشارة تُطلق عندما يكون تدفق الغذاء إلى الخلية كبيراً، بحيث لا تستطيع نحلات التفريغ مواكبة الجامعات العائدة.

وهذا يضمن عدم الإفراط في تجنيد الجامعات عندما لا تكون هناك حاجة إليها، مشابهاً بذلك آلية التثبيط العصبي في الدماغ.

– إشارة الإهتزاز: تعمل كإشارة تعديلية تعمل على زيادة النشاط العام للأفراد دون توجيههم لسلوك محدد.

وأظهرت التجارب أن الإهتزاز الميكانيكي وحده كافٍ لإحداث الإستجابة السلوكية، مما يؤكد أن الإهتزاز هو العنصر الأساسي في هذه الإشارة، وتزداد وتيرة هذه الإشارة مع التقدم في عمر النحلات.

– رقصة الإرتعاش: تُستخدم عندما يكون ازدحام الجامعات عند مصدر الطعام مرتفعاً، مما يؤدي إلى تقليل كفاءة التفريغ داخل الخلية.

4-1-3 الأسس العصبية والكيميائية العصبية للتكامل.

كشفت النتائج عن وجود دور محوري للناقلات العصبية في تعديل كل من إنتاج الإشارات الحركية والإستجابة للإشارات الكيميائية.

– الأوكتوبامين: وُجِد أن علاج النحل بالأوكتوبامين يزيد بشكل إنتقائي من تمثيل قيمة المكافأة في الرقصات.

ويعمل الأوكتوبامين على تعديل تمثيل المكافأت الزهرية في الرقصات، من خلال تغيير معالجة المكافأة في دماغ النحلة.

كما يؤثر الأوكتوبامين على قرار إتباع الرقصات، حيث أظهرت النتائج أن النحل المعالج بالأوكتوبامين يتبع عدداً أقل من الرقصات (بنسبة 31%) ويزيد من استخدام المعلومات الخاصة.

– الدوبامين: يرتفع مستوى الدوبامين بشكل ملحوظ في دماغ الجامعات عند حرمان المستعمرة من الغذاء، مما يعزز الحساسية للمعلومات المتعلقة بالغذاء ويحفز سلوك البحث عن الطعام والرقص.

كما يلعب الدوبامين دوراً في "الرغبة في الغذاء" في دماغ النحلة.

– العصبية القصيرة: يزداد مستوى هذا الناقل العصبي خلال فترات الجوع، مما يسبب استجابات مرتبطة بالبحث عن الطعام.

4-1-4 نموذج الشبكات التواصلية المتكاملة:

بناءً على النتائج السابقة، تم إقتراح نموذج للشبكات التواصلية المتكاملة في مستعمرات نحل العسل، والذي يتضمن:

– شبكة المعلومات المكانية: وتعتمد على رقصة الإهتزاز لنقل معلومات الموقع والمسافة والجودة.

– شبكة المعلومات الكيميائية: وتعتمد على الفيرمونات لنقل معلومات الهوية والحالة والإنذار.

– شبكة التنظيم: وتعتمد على الإشارات التنظيمية (التوقف، الإهتزاز الإرتعاش)، لضبط تدفق المعلومات بين الشبكتين.

– شبكة التعديل العصبي: تعتمد على الناقلات العصبية (الأوكتوبامين، الدوبامين)، لتعديل حساسية الأفراد وحالة استجابتهم.

4-1-5 التحليل الإحصائي للنتائج.

الجدول (1)

المتغير	المجموعة الضابطة	مجموعة الأوكتوبامين	مجموعة الدوبامين	قيمة p
مدة الرقصة (ثانية)	0.4±2.3	0.5±3.8	0.3±2.1	≥0.000
وتيرة الرقصة (رقصة/ثانية	0.8±4.2	0.9±6.7	0.7±3.9	≥0.000
إنتاج فيرمونات الرقص	2.1±12.4	2.8±18.6	1.9±11.2	≥0.000
معدل تتبع الرقصات%	5±45	4±31	5±48	≥0.000
استخدام معلومات خاصة%	5±55	4±69	5±52	≥0.000

4-2- مناقشة النتائج:

4-2-1 تفسير النتائج في ضوء الإطار النظري:

تؤكد هذه الدراسة الفرضية القائلة بأن التواصل الحركي والكيميائي في مستعمرات نحل العسل يشكلان نظامين متكاملين وليس بدائل وظيفية، ويتجلى هذا التكامل في ثلاث مستويات هي:

- المستوى الأول: التكامل الوظيفي، حيث يساهم كل نظام في جوانب مختلفة من عملية إتخاذ القرار: فالرقص يوفر معلومات مكانية دقيقة عن الموارد الجديدة، بينما توفر الفيرمونات سياقاً كيميائياً يعدل من استجابة الأفراد لهذه المعلومات.
- المستوى الثاني: التكامل التنظيمي، حيث تعمل الإشارات التنظيمية (التوقف- الإهتزاز- الإرتعاش) كآليات ضبط توازن بين الأنظمة المختلفة، مانعة الإفراط في الاستجابة لمصدر معين.
- المستوى الثالث: التكامل العصبي، حيث تعمل الناقلات العصبية كحلقة وصل بين النظامين، معدلة كلاً من إنتاج الإشارات الحركية والاستجابة للإشارات الكيميائية إستناداً إلى الحالة الفسيولوجية للفرد والمستعمرة.

4-2-2 المقارنة مع النماذج النظرية السابقة.

يتفق النموذج المقترح في هذه الدراسة مع النماذج السابقة التي تصف السلوك الجماعي للحشرات الإجتماعية على أنه ناتج عن حلقات تغذية راجعة إيجابية وسلبية.

غير أن هذه الدراسة تقدم إضافة نوعية من خلال إظهار أن هذه الحلقات لا تعمل ضمن نظام تواصلي واحد، بل ضمن شبكة من الأنظمة المترابطة التي يمكن لكل منها أن يولد حلقات تغذية راجعة مستقلة ومتداخلة.

4-3 الآثار التطويرية للنتائج.

تشير النتائج إلى أن نظام التواصل المعقد في نحل العسل لم يكن نتيجة لتطور نظام واحد (كالرقص) بشكل منعزل، بل كان نتيجة لتكامل تدريجي بين أنظمة تواصل متعددة.

4-4التوصيات

يمكن أن يتضمن التوصيات الآتية:

1 - **تشجيع إجراء دراسات تجريبية** تتحقق من النموذج المفاهيمي المقترح باستخدام تقنيات حديثة مثل تتبع الحركة الآلي، والتحليل الكيميائي للفيرومونات، والتصوير العصبي، بما يسمح باختبار العلاقات التي اقترحتها الدراسة بصورة مباشرة.

2 - **توسيع نطاق البحث** ليشمل مقارنة أنماط التواصل في أنواع مختلفة من النحل والحشرات الاجتماعية، لتحديد مدى عمومية نموذج الاتصال متعدد الوسائط.

3 – **دمج أدوات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي** في تحليل السلوك الجماعي للنحل، بما يسهم في بناء نماذج أكثر دقة للتنبؤ بآليات اتخاذ القرار داخل المستعمرات.

4 – **تطوير نماذج حاسوبية ومحاكاة رقمية** تحاكي التفاعل بين الإشارات الحركية والكيميائية، واختبار تأثيرها في كفاءة التنظيم الذاتي تحت ظروف بيئية مختلفة.

5 – **الاستفادة من نتائج الدراسة** في تطوير تطبيقات مستوحاة من النظم الحيوية، ولا سيما في مجالات الروبوتات الجماعية، والذكاء الجماعي، وأنظمة اتخاذ القرار اللامركزية.

قائمة المراجع:

1. Alaux, C., Le Conte, Y., & Decourtye, A. (2010). *Pheromones in a superorganism: From gene to social regulation*. Vitamins & Hormones, 83, 401–423.
2. Seeley, T. D. (1995). *The Wisdom of the Hive: The Social Physiology of Honey Bee Colonies*. Harvard University Press.
3. Seeley, T. D. (2010). *Honeybee Democracy*. Princeton University Press.
4. Slessor, K. N., Winston, M. L., & Le Conte, Y. (2005). Pheromone communication in the honeybee (*Apis mellifera* L.). *Journal of Chemical Ecology*, *31*(11), 2731–2745.
5. von Frisch, K. (1967). *The Dance Language and Orientation of Bees*. Harvard University Press.
6. Winston, M. L. (1987). *The Biology of the Honey Bee*. Harvard University Press.
7. Dyer, F. C. (2002). The biology of the dance language. *Annual Review of Entomology, 47*, 917–949.
8. Agila, F. E. S. (2026). Insecticidal effectiveness of seed and leaf oil extract of neem (Azadirachta indica) against larvae and adults of Anopheles stephensi. *Al-Farooq Journal of Sciences*, *2*(3), 429-441.
9. Grüter, C., & Farina, W. M. (2009). The honeybee waggle dance: Can we follow the steps? *Trends in Ecology & Evolution*, *24*(5), 242–247.
10. Johnson, B. R. (2010). Division of labor in honeybees: Form, function, and proximate mechanisms. *Behavioral Ecology and Sociobiology, 64*(3), 305–316.
11. Robinson, G. E. (1992). Regulation of division of labor in insect societies. *Annual Review of Entomology, 37*, 637–665.