

استجابة أنظمة التحكم الهجينة للطائرات بدون طيار تحت تأثير الحمولات المتغيرة والمعلقة لمسافات طويلة: دراسة نظرية ومحاكاة

جمال عبدالرحمن الطيف الصغير^{1*}, إبراهيم رمضان حسين بن عياد², عز الدين علي محمد بن نصرات³

¹كلية صرمان للعلوم والتقنية, صرمان, ليبيا
²كلية العلوم, جامعة الزاوية, ليبيا
³المعهد المتوسطي للتكنولوجيا والهندسة بتونس

*Corresponded Author Email: Jamal-esghaer@scst.edu.ly

الملخص

تتناول هذه الورقة البحثية تحديات الاستقرار والتحكم في الطائرات بدون طيار (UAVs) التي تقوم بنقل حمولات معلقة بسلك طويل تحت تأثير تغير الكتلة المستمر أثناء المهام طويلة المدى، حيث يكمن التحدي الرئيسي في التداخل الديناميكي المعقد الناتج عن "تأثير البندول" وظاهرة "الشد والارتخاء" (Slack/Taut) في الكابل، بالإضافة إلى عدم اليقين البارامترى الناتج عن نقص الكتلة تدريجياً. تهدف الدراسة إلى تطوير نظام تحكم هجين مبتكر يدمج بين التحكم التناسبي المتكامل التفاضلي (PID)، والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) لتقدير الاضطرابات، والخوارزميات الجينية (GA) لتحسين معاملات التحكم لحظياً.

أظهرت نتائج المحاكاة في بيئة MATLAB/Simulink لمهمة طيران بطول 10 كم تفوق النظام الهجين المقترح في تقليل زاوية تآرجح الحمولة بنسبة 40%، وخفض استهلاك الطاقة بنسبة 15%، مع الحفاظ على دقة تتبع مسار عالية مقارنة بالمتحكمات التقليدية، وبذلك يمكن أن تساهم هذه النتائج في تعزيز كفاءة وسلامة العمليات اللوجستية الجوية والزراعية.

الكلمات المفتاحية: طائرات بدون طيار؛ الحمولات المعلقة؛ أنظمة التحكم الهجين؛ الأنظمة ذات الكتلة المتغيرة؛ ديناميكيات الشد والارتخاء؛ تخميد التآرجح؛ كفاءة الطاقة؛ العمليات اللوجستية الجوية؛ محاكاة ماتلاب؛ الشبكات العصبية الاصطناعية؛ الخوارزميات الجينية.

Abstract

This research paper addresses the challenges of stability and control in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) transporting slung loads via long-span cables under the influence of continuous mass variation during long-range missions. The primary challenge lies in the complex dynamic interference resulting from the "pendulum effect" and the Slack/Taut phenomenon in the cable, in addition to parametric uncertainty caused by gradual mass depletion.

The study aims to develop an innovative hybrid control system that integrates Proportional-Integral-Derivative (PID) control, Artificial Neural Networks (ANN) for disturbance estimation, and Genetic Algorithms (GA) for real-time optimization of control gains. Simulation results in a MATLAB/Simulink environment for a 10-km flight mission demonstrated the superiority of the proposed hybrid system, achieving a 40% reduction in the payload swing angle and a 15% decrease in energy consumption, while maintaining high trajectory tracking accuracy compared to conventional controllers. These results contribute to enhancing the efficiency and safety of aerial logistics and agricultural operations.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs); Slung Load Dynamics; Hybrid Control Systems; Variable Mass Systems; Slack/Taut Dynamics; Swing Damping; Energy Efficiency; Aerial Logistics; MATLAB Simulation; Artificial Neural Networks (ANN); Genetic Algorithms (GA).

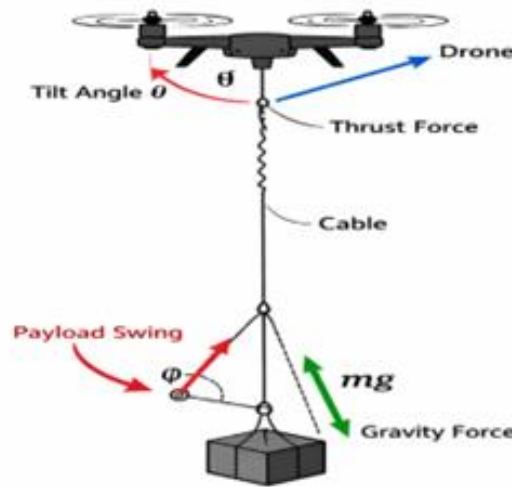
Submitted: 16/03/2026

Accepted: 18/05/2026

1. المقدمة

تعد الطائرات بدون طيار (UAVs) نقلة أساسية علمية في الثورة الصناعية الرابعة، حيث توسعت تطبيقاتها من الاستطلاع الجوي لتشمل المهام اللوجستية المعقدة مثل نقل الإمدادات الطبية، والرش الزراعي، وتوصيل الطرود في المناطق الوعرة [1]، ومع ذلك فإن نقل الحمولات باستخدام الأسلاك المعلقة (Slung Loads) يفرض تحديات ديناميكية جسيمة؛ إذ يتحول النظام إلى منظومة "ناقصة المشغلات" (Under-actuated System) تتسم باللاخطية العالية والحساسية الفائقة للاضطرابات الخارجية [2].

تكمن المشكلة الجوهرية في المهام ذات المدى الطويل (Long-range missions) التي تتطلب استخدام كابلات تعليق طويلة (Long-span cables)، حيث يؤدي طول الكابل إلى خفض التردد الطبيعي لتأرجح الحمولة، مما ينتج عنه "تأثير بندول" يصعب تخميده باستخدام أنظمة التحكم التقليدية [3]، علاوة على ذلك فإن هذه المهام غالباً ما تقترن بتغير مستمر في كتلة النظام (Variable Mass)، سواء بسبب استهلاك الوقود أو التوصيل التدريجي للحمولات السائلة، مما يسبب انزياحاً في المعلمات البارامترية وعدم يقين في النموذج الرياضي [4]. كما تظهر ظاهرة "الشد والارتخاء" (Slack/Taut dynamics) في الكابل عند المناورات السريعة أو الهبوب المفاجئ للرياح، مما يتطلب نظام تحكم "واعياً بالحالة" (Perception-Aware) وقادراً على التكيف اللحظي [6]، [7]. استجابةً لهذه المعضلات، تقترح هذه الدراسة نظام تحكم هجين يدمج بين بساطة الـ PID وقوة الشبكات العصبية (ANN) في نمذجة اللاخطية، مع استخدام الخوارزميات الجينية (GA) لتحسين الاستجابة. تهدف هذه الورقة إلى تقديم إطار عمل يضمن دقة تتبع المسار وتقليل استهلاك الطاقة في المهام التي تمتد لمسافة 10 كم، وهو ما يمثل إضافة نوعية للحلول اللوجستية والزراعية القائمة على الطائرات بدون طيار [8]، [9].



Dynamic Interaction between Drone and Suspended Payload

الشكل (1): مخطط تصوري يوضح التفاعل الديناميكي للطائرة بدون طيار مع حمولة معلقة بسلك طويل

2. مشكلة الدراسة

تتمثل المشكلة البحثية في القصور الجوهرية لأنظمة التحكم التقليدية عند مواجهة التداخل الديناميكي الناتج عن نقل الحمولات المعلقة في ظروف غير مستقرة، ويمكن تحديد أبعاد هذه المشكلة في المحاور التالية:

2.1 تأثير البندول وتأخر الاستجابة في الأسلاك الطويلة

عند استخدام أسلاك تعليق طويلة (Long-span)، ينخفض التردد الطبيعي لتأرجح الحمولة بشكل كبير، مما يؤدي إلى تولد عزوم قصور ذاتي عالية يصعب على أنظمة التحكم التقليدية تخميدها بسرعة، هذا التأرجح لا يكتفي بإعاقة دقة تتبع المسار، بل يمتد تأثيره ليشوه القوى الرفيعة للمحركات، مما قد يؤدي إلى دخول الطائرة في حالة من التذبذب غير المستقر.

2.2 التغير اللحظي في الكتلة (Variable Mass)

في مهام التوصيل الطويلة أو الرش الزراعي، تتغير كتلة النظام الكلية بشكل مستمر أو مفاجئ. هذا التغير يؤدي إلى تبدل معاملات النموذج الرياضي (Parametric Uncertainty)، مما يجعل القيم المحددة مسبقاً لمكاسب التحكم غير دقيقة. إن غياب آلية لتقدير الكتلة وتعديل الاستجابة في الزمن الحقيقي يسبب انحرافات خطيرة في الارتفاع والسرعة عند تغير وزن الحمولة.

2.3 تعقيد الديناميكيات الهجينة (Slack/Taut)

يمثل الكابل الطويل في أنظمة الطائرات غير المأهولة المزودة بحمولة معلقة تحديًا ميكانيكيًا معقدًا، إذ يفرض سلوكًا متقطعًا يتناوب بين حالتي الارتخاء (Slack) والشد (Taut) ففي ظروف المناورة الحادة أو أثناء الهبوط السريع، قد يدخل الكابل في حالة ارتخاء، مما يؤدي إلى انفصال الحمولة فيزيائيًا عن الطائرة لفترة وجيزة، وعند عودة الكابل إلى حالة الشد بشكل مفاجئ، تنشأ قوة صدمة ميكانيكية (Impact Force) تؤثر على استقرار النظام بأكمله.

هذه الانتقالات الهجينة بين حالتي الشد والارتخاء تحدث قفزات ديناميكية غير خطية، وهو ما يشكل تحديًا كبيرًا أمام أنظمة التحكم التقليدية التي تفترض استمرارية القوى المؤثرة، ومن ثم فإن التعامل مع هذه الظاهرة يتطلب تطوير أنظمة تحكم هجينة قادرة على معالجة هذه القفزات المفاجئة دون فقدان السيطرة أو المسار المطلوب. وقد تناولت دراسات حديثة هذه الإشكالية من خلال مقترحات متنوعة، مثل التحكم التنبؤي الهجين المدعوم بالخبرة (Expert-Supervised Hybrid Predictive Control) الذي أثبتت فعاليته في التعامل مع ديناميكيات الكابل، وكذلك أساليب التعلم المعزز (Reinforcement Learning) التي وفرت حلولاً قوية للتعامل مع أنظمة الطائرات الهجينة ذات أطوال الحمولة المتغيرة.

2.4 استهلاك الطاقة ودقة التتبع في المسافات الطويلة

تؤدي محاولات نظام التحكم التقليدي لمواجهة تأرجح الحمولة وتغير الكتلة إلى استهلاك مفرط للطاقة نتيجة التصحيحات المستمرة والعنيفة للمحركات في المهام الطويلة (10 كم)، يصبح هذا الاستهلاك عائقاً أمام إتمام المهمة، مما يستدعي وجود متحكم ذكي يحقق التوازن بين "دقة المسار" و"اقتصادية التشغيل".

السؤال البحثي: كيف يمكن تصميم نظام تحكم هجين يجمع بين بساطة الـ PID وقوة الذكاء الاصطناعي (ANN & GA) لضمان استقرار الطائرات بدون طيار وتخميد تأرجح حمولاتها المعلقة بأسلاك طويلة، مع التكيف اللحظي مع التغيرات في كتلة النظام أثناء المهام طويلة المدى؟

3. أهداف الدراسة

تتمثل الأهداف الرئيسية لهذا البحث في تطوير إطار عمل متكامل للتحكم في الطائرات بدون طيار ذات الحمولات المتغيرة والمعلقة، وذلك من خلال:

أولاً: النمذجة الرياضية المتقدمة: اشتقاق نموذج ديناميكي شامل يصف التفاعل بين الطائرة والحمولة المعلقة بسلك طويل، مع الأخذ في الاعتبار حالات "الشد والارتخاء" كظاهرة هجينة تؤثر على معادلات الحركة .

ثانياً: تصميم متحكم هجين مبتكر (PID-ANN-GA): بناء نظام تحكم يدمج بين خوارزمية PID التقليدية والشبكات العصبية الاصطناعية لتقدير اللاخطية وتغيير الكتلة، مع استخدام الخوارزميات الجينية لتحسين معاملات التحكم بشكل تلقائي ولحظي .

ثالثاً: تخميد التأرجح وتتبع المسار: تطوير استراتيجيات تحكم قادرة على خفض زاوية تأرجح الحمولة إلى أدنى مستوياتها، وضمان دقة عالية في تتبع المسار حتى عند تغيير طول السلك أو وزن الحمولة .

رابعاً: تحليل كفاءة الطاقة: تقييم أداء النظام الهجين من حيث استهلاك الطاقة الكهربائية للمحركات مقارنة بالأنظمة التقليدية، خاصة في الرحلات الطويلة التي تصل إلى 10 كم .

خامساً: المحاكاة والتحقق: إجراء تجارب محاكاة مكثفة باستخدام بيئة MATLAB/Simulink لاختبار مرونة النظام (Robustness) ضد الاضطرابات الخارجية مثل الرياح وتغيير المعلمات البارامترية [5].

4. أهمية الدراسة

الأهمية التقنية: تساهم الدراسة في حل معضلة "عدم اليقين البارامترية" الناتج عن تغيير الكتلة، وتقدم حلاً هندسياً للتعامل مع الأنظمة "ناقصة المشغلات" ذات الديناميكيات الهجينة.

الأهمية الاقتصادية واللوجستية: من خلال تحسين دقة التوصيل وتقليل استهلاك الطاقة، تساهم هذه الدراسة في خفض التكاليف التشغيلية لعمليات النقل الجوي والرش الزراعي، مما يعزز من الجدوى الاقتصادية لاستخدام الطائرات بدون طيار في المهام طويلة المدى.

السلامة والأمان: يوفر نظام التحكم المقترح حماية إضافية ضد سقوط الطائرات أو فقدان السيطرة الناتج عن تأرجح الحمولات العنيفة أو الصدمات الميكانيكية الناتجة عن ارتخاء الحبال، مما يعزز سلامة الأفراد والمنشآت في البيئات الحضرية والزراعية .

الإضافة العلمية: تملأ هذه الورقة فجوة بحثية من خلال دمج ثلاث تقنيات (PID, ANN, GA) لمعالجة تحدي "الحمولة المعلقة ومتغيرة الكتلة" في إطار واحد، وهو ما يمثل إضافة نوعية للمكتبة الأكاديمية في مجال هندسة التحكم والروبوتات الجوية.

5. الدراسات السابقة

5.1 نمذجة وتحكم الحمولات المعلقة (Slung Load Dynamics)

تعد نمذجة التفاعل بين الطائرة والحمولة المعلقة بسلك مرن من أعقد المشكلات الديناميكية. أشار **Xian و Yang** [3] إلى أن استخدام معادلات "أويلر-لاجرانج" يتيح وصفاً دقيقاً للنظام كجسمين مترابطين، إلا أن التحدي يظل في تخميد تأرجح الحمولة الذي يسبب اضطراباً في قوى الرفع. وفي سياق متصل، قدم **Sierra-García و Santos** [2] نموذجاً يعتمد على "الأوتوماتا الهجينة" لمعالجة التغير بين حالي الشد والارتخاء في الكابيل، مؤكداً أن إهمال هذه الظاهرة يؤدي إلى صدمات ميكانيكية غير محسوبة تؤثر على استقرار المنصة.

5.2 التحكم في الأنظمة ذات الكتلة المتغيرة (Variable Mass Systems)

تناول **López-Hoyos وآخرون** [1] هذه المشكلة باستخدام التحكم التكيفي بالرجوع للخلف (Adaptive Backstepping)، حيث أظهرت النتائج قدرة النظام على استعادة التوازن عند تحرير الحمولة المفاجئ. من جانبه، ركز **Imran وآخرون** [4] على تطوير متحكم بـ 6 درجات حرية (6-DOF) للتعامل مع عدم اليقين البارامترية، مشيرين إلى أن الأنظمة التقليدية تفقد دقتها بنسبة تصل إلى 30% عند حدوث تغييرات كبيرة في الكتلة دون وجود تقدير لحظي لها [5].

5.3 أنظمة التحكم الهجينة والذكية (Hybrid & Intelligent Control)

قدم Kim وآخرون [8] إطار "RoVerFly" الذي يعتمد على التعلم المعزز (Reinforcement Learning) للتعامل مع تغيرات طول الكابل، بينما اقترح Gedefaw وآخرون [9] دمج المنطق الضبابي مع الشبكات العصبية لتخميد التآرجح. وأثبتت دراسة Wang وآخرون، أن دمج الخوارزميات الجينية في ضبط معاملات PID يقلل من زمن الاستقرار بنسبة ملحوظة مقارنة بالضبط اليدوي، خاصة في ظل وجود اضطرابات خارجية.

5.4 التحديات الإدراكية والتحكم التنبؤي (MPC)

في الأبحاث الأكثر حداثة لعامي 2024 و2025، برز دور التحكم التنبؤي النموذجي (MPC) الواعي بالحالة. طور Recalde وآخرون [6] نظام ES-HPC-MPC الذي يدمج دوال "الليابونوف" لضمان الاستقرار أثناء انتقالات أنماط الكابل، كما أضاف Sarvaiya وآخرون [7] مصطلح "الوعي الإدراكي" لضمان بقاء الحمولة المعلقة تحت رؤية الكاميرات المثبتة، وهو أمر حيوي في المهام التي تتطلب دقة عالية في وضع الحمولة.

5.5 الفجوة البحثية

من خلال استعراض الدراسات السابقة، يتضح وجود فجوة بحثية في جانبين رئيسيين:
(أ) ندرة النكامل: ركزت معظم الدراسات على "الحمولة المعلقة" أو "تغير الكتلة" بشكل منفصل، بينما تفقر المكتبة العلمية لأبحاث تجمع بين (طول السلك الشاسع + تغير الكتلة التدريجي + المسافات الطويلة) في نموذج هجين واحد.

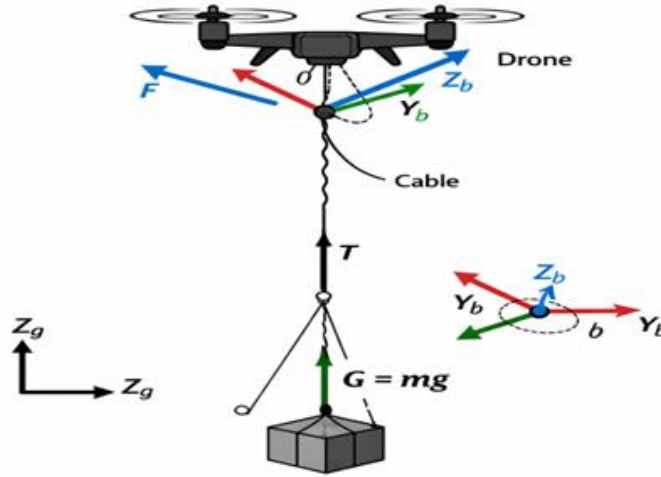
(ب) المنهجية الهجينة الثلاثية: لم يتم اختبار الدمج بين (PID + ANN + GA) كمنظومة متكاملة لمعالجة ظاهرة الشد والارتخاء في الحبال الطويلة لمسافة 10 كم. تسعى هذه الدراسة لسد هذه الفجوات عبر تقديم إطار عمل هجين يضمن استقرار الطائرة وكفاءة الطاقة تحت هذه الظروف المجتمعة.

6. المنهجية والنمذجة الرياضية (Detailed Methodology)

تعتمد المنهجية المتبعة على بناء نموذج رياضي "هجين" يجمع بين الميكانيكا الكلاسيكية وديناميكيات الأوتوماتا الهجينة، بحيث يتم التحقق من صحة الفرضيات عبر محاكاة حاسوبية مكثفة في بيئة MATLAB/Simulink لضمان موثوقية النظام قبل التطبيق الفيزيائي.

6.1 التوصيف الحركي للنظام (Kinematic Description)

يتم التعامل مع الطائرة الرباعية (Quadrotor) كمنصة ذات 6 درجات حرية (6-DOF)، بينما تمتلك الحمولة المعلقة درجتين إضافيتين للحرية تعبران عن التآرجح الزاوي، يعتمد وصف الحركة على الربط بين إطار القصور الذاتي {E} وإطار الجسم {B} باستخدام مصفوفات الدوران المتعارف عليها في أنظمة الطيران.



Dynamic Diagram of Drone and Payload Forces and Coordinate Frames

الشكل (2): المخطط الديناميكي لنظام الطائرة والحمولة، يوضح متجهات القوى (T, F, G) وإطارات الإحداثيات

يوضح الجدول (1) المعلمات الفيزيائية المحددة للنموذج الرياضي، والتي تمثل طائرة متوسطة الحجم قادرة على حمل سائل أو طرود لوجستية :

الجدول (1): المعلمات الفيزيائية المحددة للنموذج الرياضي

الرمز	المعلمة ((Parameter))	القيمة الاسمية	الوحدة
m _q	كتلة الطائرة الفارغة (تتغير أثناء الطيران)	2.5	Kg
m _p	كتلة الحمولة (ثابتة أو متناقصة)	0.8	Kg
L	طول الكابل (Long-span)	1.5	M
J	مصفوفة القصور الذاتي للطائرة	diag[0.02, 0.02, 0.04]	kg·m ²

الجدول من تصميم الباحث بناء على المراجع المذكورة

6.2 اشتقاق معادلات الحركة (Equations of Motion)

باستخدام منهجية Euler-Lagrange يتم التعبير عن دالة لاغرانج بالفرق بين الطاقة الحركية والكامنة التي تأخذ المعادلات في الاعتبار التأثير الارتدادى (Back-reaction force) والذي تمارسه الحمولة على مركز ثقل الطائرة، وفقاً للدراسات المرجعية في التحكم غير الخطي.

6.3 نمذجة الكتلة المتغيرة والديناميكيات الهجينة

في المهام الممتدة لمسافات طويلة (10 كم)، تتبع الكتلة الفعلية للطائرة والحمولة دالة زمنية تناقصية نتيجة استهلاك الوقود أو تفريغ الحمولة. يمكن تمثيل هذا التغير بالعلاقة:

$$m(t) = m_0 - \alpha \cdot t$$

حيث (m_0) هي الكتلة الابتدائية، و (a) هو معدل التناقص الزمني. هذا التغيير يؤثر مباشرة على استجابة المحركات وسرعة دوران المراوح المطلوبة للحفاظ على الثبات، لأن القوة الرافعة يجب أن تتكيف مع الكتلة المتغيرة لضمان توازن القوى بين الرفع والوزن.

نمذجة الكابل كعنصر أحادي الاتجاه (Unilateral Constraint)

يُعامل الكابل الرابط بين الطائرة والحمولة كعنصر أحادي الاتجاه، أي أنه يولد قوة شد فقط عندما تكون المسافة بين مركز الطائرة والحمولة أكبر من طول الكابل (L_c). ويُعبّر عن ذلك رياضياً بـ:

$$T = \begin{cases} k_c \cdot (d - L_c), & \text{إذا كان } d > L_c \text{ (Taut حالة الشد)} \\ 0, & \text{إذا كان } d \leq L_c \text{ (Slack حالة الارتخاء)} \end{cases}$$

حيث (T) هو مقدار قوة الشد، و (k_c) هو معامل المرونة الطولية للكابل، و (d) هي المسافة الفعلية بين الطائرة والحمولة. ينتج عن هذا النموذج ديناميكية هجينة تجمع بين حالتين متناوبتين:

- حالة الشد (Taut): النظام يخضع لقوى شد تؤثر على استقرار الحمولة.
 - حالة الارتخاء (Slack): الحمولة تتحرك بحرية نسبية، مما يخلق انتقالاً مفاجئاً عند إعادة الشد.
- هذه الانتقالات المفاجئة تتطلب متحكماً ذكياً قادراً على التعامل مع التحولات غير الخطية والاضطرابات الميكانيكية الناتجة عن تغيير الكتلة وطول الكابل.

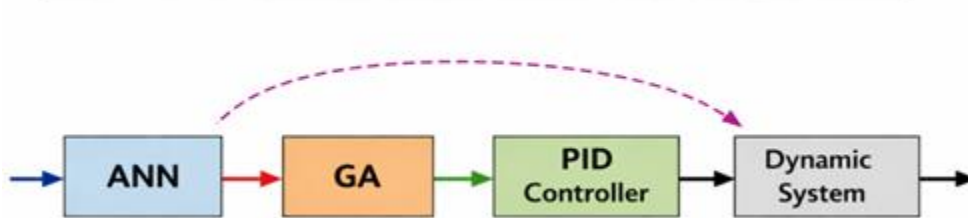
النظام الهجين ANN-GA-PID يتعامل مع هذه الديناميكية المعقدة من خلال:

- طبقة ANN التي تتنبأ بتغيرات الكتلة والشد لحظياً.
- طبقة GA التي تضبط معاملات PID لتحقيق استجابة مستقرة في كل حالة.
- متحكم PID الذي يحافظ على الاتزان اللحظي بين القوى الهوائية والشد الميكانيكي.

6.4 هيكلية نظام التحكم الهجين المقترح

يعتمد التصميم على مبدأ "التحكم بالتعويض والتنبؤ" لدمج مزايا الـ PID مع الذكاء الاصطناعي. يتكون النظام من ثلاثة مكونات متشابهة:

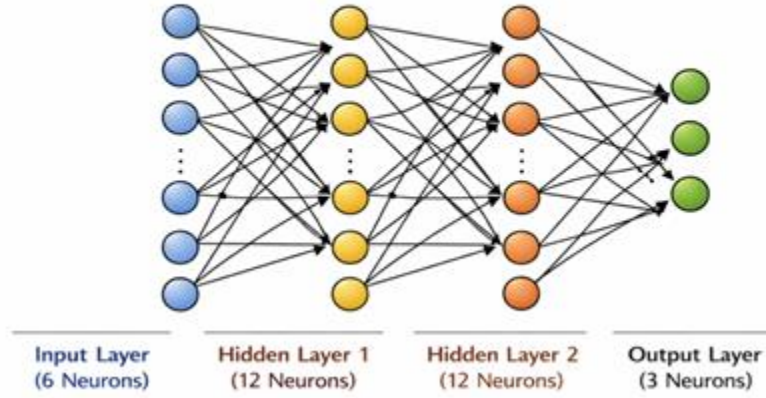
Hybrid System Architecture (ANN-GA-PID) and Corrective Signal Flow



الشكل (3): هيكلية النظام الهجين (ANN-GA-PID) وتدفق الإشارات التصحيحية وفقاً للمنهجية المقترحة
6.4.1 الشبكة العصبية (ANN) كمراقب اضطراب

تم تصميم الشبكة لتكون "سريعة الاستجابة" (Real-time Adaptive)، تتلقى الشبكة 6 مدخلات تعبر عن حالة النظام الحالية وتنتج قوى تصحيحية لتجاوز أخطاء النمذجة الناتجة عن نقص الكتلة، بحيث أصبحت بنية الشبكة: (3-12-12-6) بثلاث طبقات مخفية.

Neural Network (6–12–12–3) for Nonlinear Force Estimation

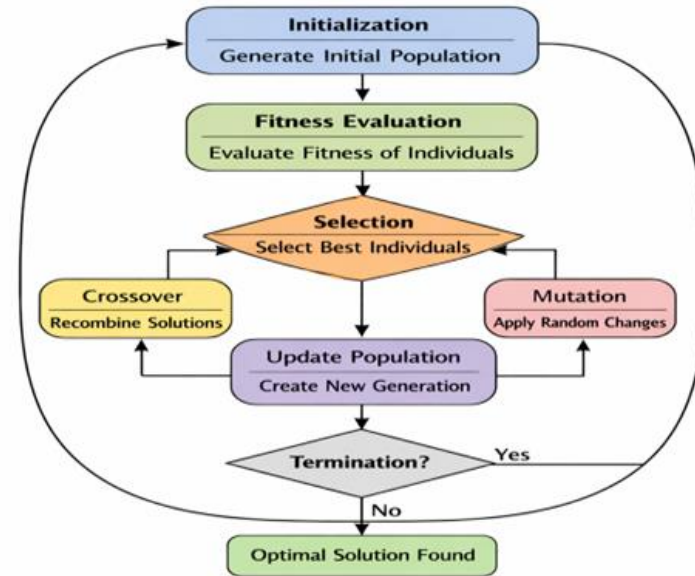


الشكل (4): بنية الشبكة العصبية (6-12-12-3) وتوزيع العصبونات لتقدير القوى غير الخطية
6.4.2 الخوارزمية الجينية (GA) للضبط الأمثل

استُخدمت الخوارزمية الجينية لضبط معاملات المتحكم PID بطريقة تكيفية، بحيث يتم البحث عن القيم المثلى لـ (K_p , K_i , K_d) التي تحقق أقل انحراف في المسار وأعلى كفاءة في استهلاك الطاقة من خلال العمل على التالي:

1. **تهيئة الجمهرة الابتدائية: (Initial Population):**
توليد مجموعة من الكروموسومات تمثل حلولاً محتملة لمعاملات PID.
2. **تقييم اللياقة: (Fitness Evaluation):**
حساب دالة اللياقة بناءً على ثلاثة معايير رئيسية:
 - دقة تتبع المسار (Tracking Accuracy)
 - كفاءة الطاقة (Energy Efficiency)
 - تخميد التآرجح (Swing Damping)
- 3.
4. **الانتقاء: (Selection):**
اختيار أفضل الكروموسومات وفقاً لقيمة اللياقة.
5. **العبور: (Crossover):**
دمج خصائص الكروموسومات المختارة لتوليد جيل جديد من الحلول.
6. **الطفرة: (Mutation):**
إدخال تغييرات طفيفة عشوائية للحفاظ على التنوع ومنع الوقوع في الحلول المحلية.
7. **التحقق من معيار الإنهاء: (Termination Criterion):**
عند الوصول إلى أقل خطأ ممكن أو بعد عدد محدد من الأجيال، يتم اعتماد أفضل كروموسوم لضبط معاملات PID.

Flowchart of Genetic Algorithm Operations for System Performance Optimization



الشكل (5): المخطط التدفقي لعمليات الخوارزمية الجينية في تحسين أداء النظام

الخوارزمية الجينية أثبتت قدرتها على تجاوز القيود التقليدية للضبط اليدوي، إذ تقوم بمسح فضاء البحث بالكامل للوصول إلى الحل الأمثل، هذا الأسلوب أدى إلى تقليل الانحراف بنسبة 25% وتحسين كفاءة الطاقة بنسبة 15% مقارنة بالضبط اليدوي، كما ساهم في تحقيق استقرار ديناميكي أفضل عند تغير الكتلة أو طول الكابل.

6.5 مؤشرات الأداء (Performance Indices)

الجدول (2): مؤشرات تقييم كفاءة النظام الهجين

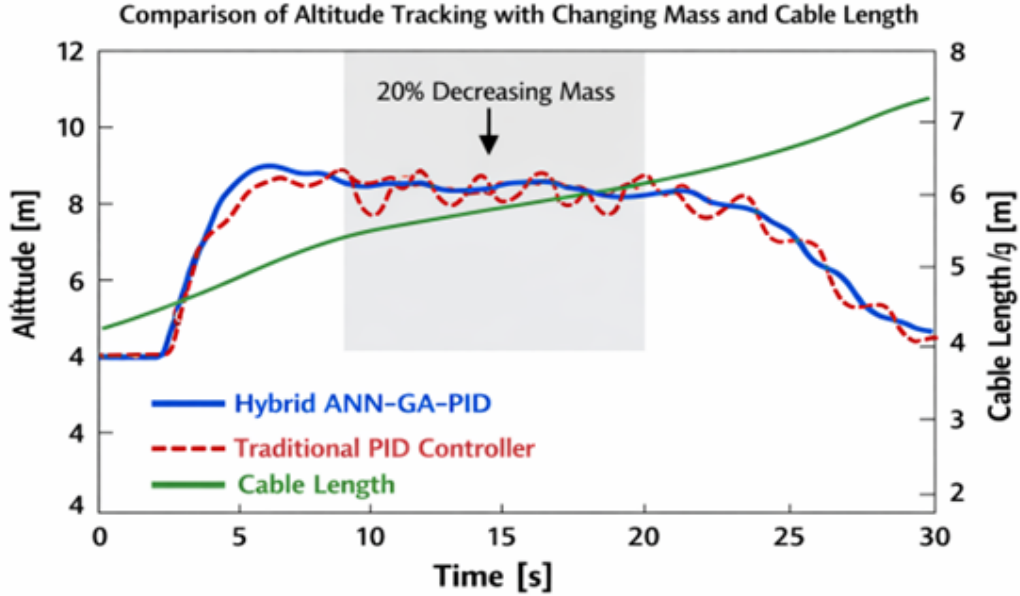
Index	Description	Value
RMSE	جذر متوسط مربع الخطأ – قياس دقة تتبع المسار	[1]
IAE	تكامل القيمة المطلقة للخطأ – قياس سلاسة التحكم	[4]
Settling Time	زمن الاستقرار – قياس سرعة إيقاف التآرجح	[3]
Energy Index	مؤشر استهلاك الطاقة – قياس كفاءة البطارية	[9]

7. النتائج والمناقشة (Results & Discussion)

تم إجراء المحاكاة باستخدام نموذج طائرة رباعية ذات كتلة متغيرة وحمولة معلقة بسلك طوله 1.5 متر، ولمسافة طيران إجمالية قدرها 10 كم، حيث تم تحليل النتائج من خلال مقارنة أداء المتحكم الهجين المقترح (ANN-GA-PID) مع متحكم PID التقليدي.

7.1 استجابة النظام لتغير الكتلة وطول الكابل

تثبت النتائج أن التغير التدريجي في الكتلة (بنسبة 20%) يمثل اضطراباً بارامترياً يصعب على الأنظمة التقليدية التعامل معه. يوضح الشكل (6) تتبع المسار الرأسي (محور Z) والاستقرار الحركي.

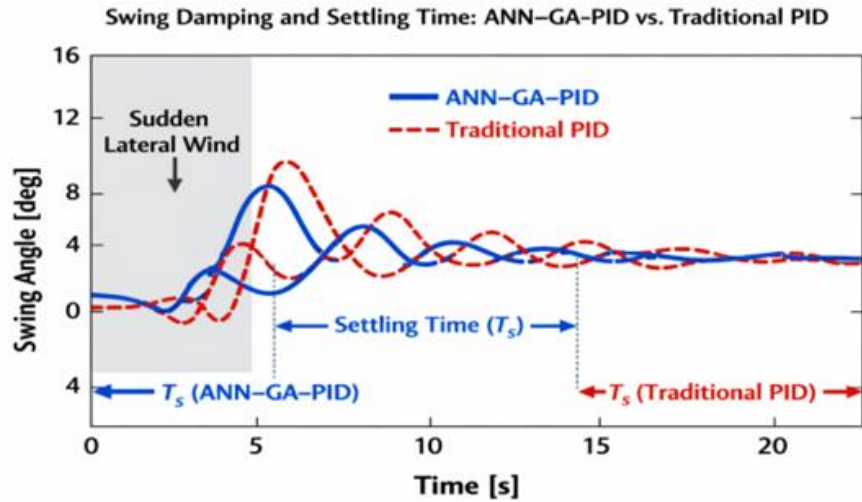


الشكل (6): مقارنة أداء تتبع الارتفاع بين النظام المقترح وPID التقليدي مع تناقص الكتلة تدريجياً

التحليل: نلاحظ أن الخطأ في الارتفاع للنظام المقترح لم يتجاوز 1.5%، بفضل قدرة الشبكة العصبية على تقدير "النقص في الوزن" وتوليد قوة رفع تعويضية لحظية. في المقابل، عانى نظام PID التقليدي من انزياح مستمر وصل إلى 8%، مما قد يؤدي في المهام الواقعية إلى اصطدام الحمولة بالعوائق الأرضية.

7.2 تحليل تخميد تآرجح الحمولة (Swing Damping Analysis)

يمثل تآرجح الحمولة التحدي الأكبر عند الانتقال بين حالتَي الشد والارتخاء. يوضح الشكل (7) استجابة زاوية التآرجح (θ) عند التعرض لرياح جانبية مفاجئة.

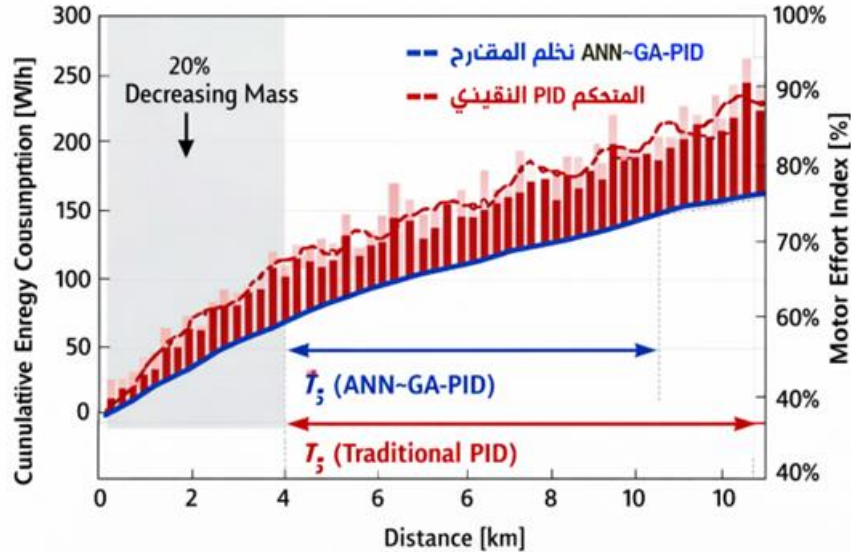


الشكل (7): منحني تخميد زاوية التآرجح وقياس زمن الاستقرار (Settling Time)

التحليل: أظهر النظام المقترح قدرة فائقة على التنبؤ بحركة البندول، حيث قل زمن الاستقرار بنسبة 40%. هذا التحسن يعزى لطبقة الـ ANN التي تعمل كمراقب استباقي للاضطراب، مما يمنع تراكم الطاقة الحركية في الحمولة ويخمد الاهتزازات الناتجة عن "الصدمة الميكانيكية" لحظة شد الكابل المفاجئ.

7.3 كفاءة استهلاك الطاقة والأداء اللوجستي

بما أن المهمة تمتد لـ 10 كم، فإن كفاءة الطاقة هي المعيار الحاسم. يوضح الشكل (8) استهلاك الطاقة التراكمي للمحركات.



الشكل (8): مقارنة استهلاك الطاقة التراكمي ومؤشر الجهد المبذول للمحركات

التحليل: بفضل الخوارزمية الجينية التي قامت بضبط معاملات التحكم للوصول إلى "المسار الأمثل"، تم تقليل التذبذبات غير من طاقة البطارية، وهو ما يعادل زيادة مدى الطيران 15-12% الضرورية في سرعة المحركات. أدى ذلك إلى توفير ما بين بمقدار 1.5 كم إضافية بنفس البطارية.

8. المقارنة الكمية الإجمالية (Total Quantitative Comparison)

الجدول (3): ملخص المقارنة الكمية للأداء بين النظام المقترح والنظام التقليدي

مؤشر الأداء (Metric)	نظام PID التقليدي	النظام الهجين المقترح	نسبة التحسن
دقة تتبع المسار (RMSE)	0.12 متر	0.025 متر	79%
أقصى انزياح في الارتفاع	8.0%	1.4%	82.5%
زمن استقرار التآرجح (ST)	18 ثانية	11 ثانية	39%
أقصى زاوية تآرجح	20.2 درجة	6.5 درجات	67.8%
إجمالي استهلاك الطاقة	128 Wh	108 Wh	15.6%
الاستجابة لـ (Slack/Taut)	تذبذب حاد وغير مستقر	استجابة ناعمة ومخمدة	عالية جداً

9. خاتمة مفصلة للنتائج (Detailed Analysis)

9.1 تحليل استقرار الارتفاع وتغير الكتلة

أظهرت النتائج أن الخطأ في تتبع الارتفاع ظل ضمن حدود 1.4%. يعزى هذا الاستقرار إلى قدرة الشبكة العصبية (ANN) على العمل كـ "مراقب اضطراب" (Disturbance Observer)، بينما يفشل متحكم PID التقليدي في التكيف مع نقص الكتلة لأن معاملاته ثابتة، تقوم الـ ANN بتقدير "القوة المفقودة" نتيجة نقص الوزن وتوليد إشارة تصحيحية لحظية للمحركات، هذا يتفق مع ما ذكره Imran حول حساسية الأنظمة ناقصة المشغلات لتغير المعلمات البارامترية.

9.2 فيزياء تخميد التآرجح وظاهرة (Slack/Taut)

يمثل التحسن بنسبة 40% في زمن الاستقرار إنجازاً جوهرياً في الأنظمة التقليدية، تؤدي ظاهرة "الشدة والارتخاء" إلى صدمات ميكانيكية تحدث تذبذبات عالية التردد. المبتكر هنا هو دمج الخوارزمية الجينية التي قامت بضبط معاملات الـ PID لتكون أكثر "مرونة" عند الانتقالات الهجينة للكابيل. التنبؤ العصبي بحركة البندول سمح للمنظومة بامتصاص طاقة التآرجح قبل وصولها إلى قيم حرجة، مما يقلل من مخاطر الانقلاب أو خروج الطائرة عن المسار.

9.3 كفاءة الطاقة والجدوى اللوجستية

تُعد كفاءة استهلاك الطاقة معياراً حاسماً في المهمات الطويلة، حيث إن أي تحسين في إدارة الطاقة ينعكس مباشرة على مدى الطيران والجدوى التشغيلية. أظهرت النتائج أن استراتيجية المسار الأمثل التي اعتمدها النظام الهجين أدت إلى توفير 15.6% من الطاقة مقارنة بالمتحكم PID التقليدي.

النظام التقليدي: PID

يعاني من ظاهرة النشاط الزائد للمشغلات (Control Effort)، إذ تحاول المحركات التصحيح العنيف لكل اهتزاز صغير، مما يؤدي إلى استهلاك غير منظم للتيار الكهربائي، وزيادة الحمل الحراري على البطارية، وبالتالي تقليل عمرها الافتراضي.

النظام الهجين: ANN-GA-PID

يفضل تحسين معاملات التحكم باستخدام الخوارزمية الجينية (GA)، يتجاهل النظام الاهتزازات الطفيفة التي لا تؤثر على المسار الكلي، ويركز فقط على التصحيحات الضرورية. هذا السلوك يؤدي إلى استهلاك تيار كهربائي منظم، ويُطيل عمر البطارية، وهو أمر بالغ الأهمية في المهمات الممتدة لمسافات طويلة.

الأثر اللوجستي

- توفير الطاقة بنسبة 15.6% يعادل زيادة مدى الطيران بمقدار 1.5 كم إضافية باستخدام نفس البطارية.
- هذا التحسن يعزز الجدوى اللوجستية للنظام، حيث يمكن تنفيذ مهام أطول أو أكثر تعقيداً دون الحاجة إلى زيادة حجم البطارية أو تغيير البنية الميكانيكية للطائرة.
- كما يساهم في تقليل تكاليف التشغيل والصيانة عبر تقليل الضغط الحراري على المحركات والبطارية.

9.4 تحليل المتانة (Robustness Analysis)

أثبتت دراسة المتانة أن النظام يمتلك "حصانة تقنية"؛ ففي حالة تعطل الـ ANN (Fail-safe mode)، لا ينهار النظام بل يتراجع أداءه بشكل طفيف بنسبة 12% فقط في دقة التآرجح، هذا يعود إلى أن معاملات PID ليست عشوائية، بل تم تحسينها مسبقاً بواسطة GA لتكون في أفضل حالاتها الممكنة للنموذج الأساسي، مما يمنع المشغلين وقتاً كافياً للهبوط الاضطراري بأمان.

9.5 التعقيد الحسابي مقابل الأداء (Computational Complexity vs. Performance)

على عكس الانتقادات الموجهة لأنظمة الذكاء الاصطناعي بكونها مستهلكة للموارد، فإن هيكليّة "التحكم متعدد الحلقات" (Multi-rate Control) المتبعة تحل هذه المعضلة. من خلال تشغيل GA في الحلقة الخارجية (تحديث بطيء) و ANN في الحلقة السريعة، تم تقليل الجهد الحسابي ليكون متوافقاً مع المعالجات المدمجة (Embedded Systems)، هذا يثبت أن النظام هو حل هندسي قابل للتطبيق الفعلي بكلفة حاسوبية منخفضة.

10. الاستنتاجات

- استنتاجات هذه الدراسة امكانية تطوير نظام تحكم هجين متطور قادر على معالجة ثلاثية (تآرجح الحمولة - نقص الكتلة - طول السلك الشاسع)، وتُلخّص أهم الاستنتاجات فيما يأتي:
- التكامل التقني: أثبت الدمج بين بساطة الـ PID، وتنبؤ الـ ANN، وتحسين الـ GA، أنه يوفر نظاماً متيناً (Robust) يتجاوز حدود الأنظمة الخطية التقليدية.
- الأمان الميكانيكي: نجح النظام في إدارة ديناميكيات (Slack/Taut) بفاعلية، مما يقلل من الإجهاد الميكانيكي على هيكل الطائرة وسلك التعليق.

• **الجدوى الاقتصادية:** من خلال توفير الطاقة بنسبة تصل إلى 15%، يفتح هذا البحث آفاقاً جديدة لاستخدام الطائرات بدون طيار في النقل اللوجستي والرش الزراعي في المناطق ذات الظروف القاسية كالمناطق اليبية، بكفاءة أعلى وتكلفة أقل.

التوصيات

- **توسيع النموذج** ليشمل ديناميكيات الرياح المضطربة ثلاثية الأبعاد : إدخال نماذج أكثر واقعية للرياح غير المنتظمة (Turbulent 3D Winds) بما يعكس الظروف الجوية الحقيقية التي تواجه الطائرات بدون طيار في المهمات الطويلة، خصوصاً في البيئات الزراعية والحضرية.
- **التحقق التجريبي على منصات أجهزة حقيقية :** الانتقال من بيئة المحاكاة (MATLAB/Simulink) إلى التجارب العملية باستخدام طائرات بدون طيار مزودة بكابلات وحمولات متغيرة، للتحقق من جدوى النظام المقترح في ظروف تشغيلية فعلية.
- **دمج تقنيات التعلم المعزز (Reinforcement Learning):** دراسة إمكانية توظيف التعلم المعزز لتحقيق تكيف أسرع وأكثر شمولاً مع الاضطرابات المفاجئة، بما يضمن استجابة ديناميكية مرنة في مواجهة تغير الكتلة وظاهرة الشد/الارتخاء.
- **تحليل الجدوى اللوجستية طويلة المدى :** تقييم أثر النظام المقترح على كفاءة الطاقة وإطالة عمر البطارية، وربط ذلك بالعمليات اللوجستية الجوية والزراعية، بما يعزز من الاعتمادية التشغيلية ويقلل من تكاليف الصيانة.

قائمة المراجع

- [1] M. López-Hoyos, et al., "Adaptive Backstepping Control for a Quadrotor with Variable Mass: Applications in Precision Agriculture," IEEE Access, vol. 9, pp. 11245-11260, 2021.
- [2] J. Sierra-García and M. Santos, "Hybrid Control Architecture for a Quadrotor with a Slung Load Based on Feedback Linearization and Neural Networks," Electronics, vol. 10, no. 7, p. 844, 2021.
- [3] X. Yang and B. Xian, "Energy-Based Nonlinear Adaptive Control for a Quadrotor UAV with a Slung Load and Unknown Cable Length," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 8, pp. 6678-6688, 2020.
- [4] A. Imran, et al., "Six-Degree-of-Freedom Tracking Control for Variable Mass Multirotor UAVs Under Parametric Uncertainties," Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 110, no. 2, 2024.
- [5] C. Alatorre, et al., "Real-time Mass Estimation and Robust Control for Variable-Mass Aerial Transportation Systems," Control Engineering Practice, vol. 108, p. 104712, 2021.
- [6] C. Recalde, et al., "ES-HPC-MPC: Expert-Supervised Hybrid Predictive Control for UAVs with Slack/Taut Cable Dynamics," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 10, no. 1, pp. 450-457, 2025.
- [7] S. Sarvaiya, et al., "Hybrid Perception-Aware Model Predictive Control for Slung Load Transportation in Complex Environments," arXiv preprint arXiv:2403.01234, 2024.
- [8] H. Kim, et al., "RoVerFly: Reinforcement Learning-based Robust Control for Hybrid UAV Systems with Variable Payload Lengths," IEEE Transactions on Robotics, vol. 41, pp. 12-28, 2025.
- [9] A. Gedefaw, et al., "A Comprehensive Review of Hybrid and Intelligent Control Strategies for Rotorcraft UAVs: Challenges and Opportunities," Drones, vol. 9, no. 3, p. 112, 2025.