

## تصميم متحكم ذكي معتمد على التحفيز الدماغي

### لتحسين استجابة نظام رباعي المحرك

طالب دكتوراه في هندسة التحكم الآلي والحواسيب

الباحث: بشار انطونيوس موسى

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث

الإشراف : المشرف الأساسي : د.بسيم عمران المشرف المشارك: د. جمانا دياب

#### ملخص البحث

رباعية المحرك Quadcopter هي طائرة ترتفع جواً نتيجة لقوة الرفع التي تقدمها أربعة محركات تتوضع عادة بشكل متصالب. وقد تم استخدامها في العديد من المجالات بما في ذلك المراقبة والبحث والإنقاذ، ورسم الخرائط، وآخرها تسليم الطرود. وتتطلب تحكماً لتحقيق الاستقرار والتغلب على تقلبات المعاملات الأيروديناميكية وتحقيق القيود الزمنية التي تفرضها هذه التقلبات.

تم تطبيق وحدة التحكم الذكية القائمة على التحفيز الدماغي (BELBIC) للتحكم في الطائرة رباعية المحرك Quadrotor. حيث تم تصميم وحدة تحكم BELBIC بناء على النموذج الحسابي لعملية التحفيز الدماغي في الجهاز الحوفي في دماغ الثدييات. تعمل خوارزمية التحكم المقترحة بسبب القدرة على التعلم والاستقلالية عن نموذج النظام والتعامل المرضي مع الاضطرابات والتغيير في معاملات النظام. تم عرض نتائج محاكاة التحكم في Quadrotor باستخدام BELBIC. تم تطبيق اضطراب على النظام المدروس بغرض فحص أدائه واستجابته واستقراره.

**الكلمات المفتاحية:** متحكم ذكي قائم على التحفيز الدماغي، المتحكم التناسبي والتكاملي والتفاضلي، الطائرة رباعية المحرك.

# Design Of Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller To Enhance The Response Of Quadcopter System

## Abstract

A quadcopter, is an aircraft that becomes airborne due to the lift force provided by four rotors usually mounted in cross configuration. The quadcopter has been used in numerous fields including surveillance, search & rescue, mapping, and most recently, package delivery. However, the quadcopter requires a stable control which must be robust against aerodynamic parametric variation and external wind gust.

In this paper, Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller (BELBIC) is applied to attitude control of a Quadrotor. BELBIC controller is designed based on the computational model of emotional learning process in mammalian brain limbic system. Proposed control algorithm is employed because of the learning ability and independency to system model and also satisfactory performances dealing with disturbances and changing in system parameters. Simulation results of controlling Quadrotor with BELBIC are addressed. Also pitch angle disturbance is applied due to examine system performances.

Keywords: BELBIC, Brain Emotional Learning Controller, PID controller, Intelligent Controller, quadcopter.

## 1- مقدمة

نتعامل في الصناعة دوماً مع أنظمة لا نملك معلومات عن نموذجها، وبالتالي تكون عملية تصميم وحدة التحكم المناسبة لهذا النظام أقل تبعية لنموذج النظام ولا يحتاج إلى معرفة معلومات دقيقة عن نموذج النظام. نعتمد في التحكم المعتمد على التحفيز الدماغي على مفهوم التعلم، حيث نفترض أن معادلات النظام غير معروفة والمعلومات الوحيدة المتاحة هي حالات النظام واستجابته لأداء وحدة التحكم. على الرغم من هذا النقص في المعرفة، يجب أن يملك نظام التحكم القدرة على نقل هذا النظام المجهول من الوضع الحالي إلى الوضع المطلوب بشكل أفضل [1]. المتحكم الذكي القائم على التحفيز الدماغي (BELBIC) هو نموذج تحكم غير خطي يستخدم للتحكم في عدة أنظمة. فمثلاً يستخدم BELBIC للتحكم في عملية عمود التقطير المزدوج [2]، وفي التحكم في الطيار الآلي بدرجتي حرية لنموذج طائرة هليكوبتر [3] ، واستخدم في التحكم في حركة روبوتات ثلاثي العجلات وتتبع الهدف [4] و [5].

في السنوات الأخيرة، تم التركيز في مجال واسع من الأبحاث على المركبات الجوية بدون طيار. ومثال على ذلك، المركبات التي لديها القدرة على الإقلاع والهبوط العمودي (VTOL)، لتحقيق الاستقرار والسيطرة على Quadrotors. تحتاج معظم هذه الطرق إلى معلومات مفصلة عن ديناميكيات النظام ومعاملات النظام. حيث صمم Benallegue وآخرون متحكم الوضع المنزلق لطائرة Quadrotors [6]، بينما تم استخدام الشبكات العصبونية المعتمدة على التحكم المراقب التكييفي من قبل Boudjedir للتحكم بطائرة Quadrotor [7]، واستخدم Bou-Ammar التعلم المعزز لتصميم وحدة تحكم للطائرات بدون طيار Quadrotor [8]، واستخدم Nicoll التحكم الضبابي التكييفي لطائرة Quadrotor. ولكن رغم تنوع هذه الدراسات المرجعية، إلا أنها لم تدرس أداء المتحكم عند تعرض الطائرة إلى مجموعة من الاضطرابات الخارجية.

تم في هذا البحث تطبيق وحدة تحكم BELBIC للتحكم في الطائرة رباعية الدوار Quadrotor، ودراسة أداء المتحكم عند تعرض الطائرة إلى مجموعة من الاضطرابات

الخارجية على عدة محاور. كما تم مقارنة النتائج مع أداء وحدة تحكم PID تقليدية مضبوطة جيداً.

## 2- مشكلة البحث:

بسبب أن هذه الأنظمة الحالية أصبحت أنظمة معقدة وهجينة وغير خطية، تم اللجوء إلى طرق آخر غير المتحكم PID للتغلب على مشاكل التجاوز overshoot وزمن الاستقرار settling time المرتفع وخطأ الحالة الساكنة steady state error وخاصة في الأنظمة المعقدة وغير الخطية، ومن هذه الطرق المتحكم BELBIC .

## 3- أهمية البحث:

تكمن أهمية هذا البحث في الحصول على منظومة تحكم قادرة على التغلب على جميع الاضطرابات الخارجية والظروف الاستثنائية التي يمكن أن يتعرض لها النظام المعقد اللاخطي المتحكم به، ويتم ذلك في الزمن الحقيقي نتخلص فيها من مشاكل overshoot وزمن الاستجابة المرتفع وخطأ الحالة الساكنة.

## 4- الهدف من البحث:

يهدف هذا البحث إلى تحسين استجابة نظام تحكم معقد لا خطي في الزمن الحقيقي عند تعرض النظام المتحكم به إلى اضطرابات خارجية تقوم بتغيير معاملات هذا النظام، أو عند عمل هذا النظام في ظروف استثنائية. عن طريق استخدام المتحكمات الذكية المعتمدة على التحفيز الدماغي BELBIC .

## 5- منهج البحث:

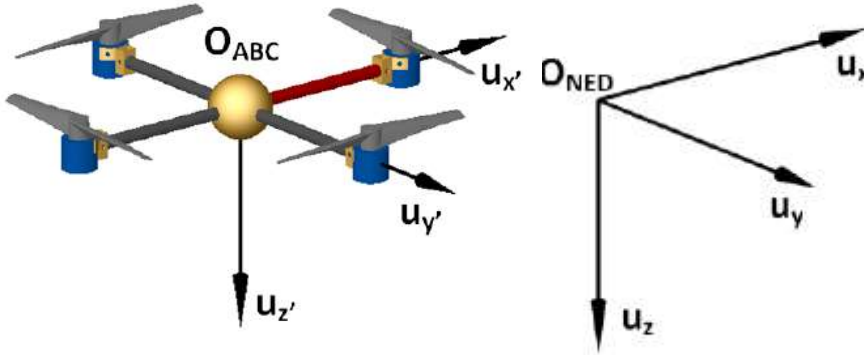
يعتمد البحث على المنهج التجريبي بسبب عدم معرفة معاملات النظام المدروس من خلال محاكاة هذا النظام المتحكم به الخاضع للاضطرابات الخارجية التي يمكن أن يتعرض لها، ومناقشة النتائج بعد تطبيق المتحكم BELBIC على هذا النظام.

## 6- الدراسة:

### 6-1- نمذجة رباعية المحرك

الخطوة الأولى هي النمذجة لديناميكيات النظام وذلك لتسهيل التحكم بالطائرة رباعية المحرك وتوفير فهماً أفضل لقدرات النظام ومحددياته.

إن ديناميكيات رباعية المحرك معقدة، لذلك حتى نستطيع كتابة معادلات رباعية المحرك الديناميكية وفهم النظام بشكل واضح، قمنا بتعريف اثنين من الأطر المرجعية، إطار ثابت وإطار محمول [9]. يتم تعيين الإطار الثابت أو إطار الأرض من خلال ONED (شمال شرق أسفل North-East-Down) حيث يكون المحورين (UX وUY) موجّهين مع الاتجاهات الشمالية والشرقية على التوالي، والمحور الثالث (UZ) موجه إلى الأسفل نحو مركز الأرض الشكل (1). يتم تعيين الإطار المحمول من خلال OABC، أو مركز جسم رباعية المحرك، ومبدأه منطبق على مركز ثقل رباعية المحرك كما هو موضح في الشكل (2).



الشكل (2): الإطار المحمول

الشكل (1): الإطار الثابت

يحدد موقع رباعية المحرك، حول كل محور من محاور الدوران الثلاث بست توابع: زوايا أولر Euler  $[\psi \theta \phi]$  (الانعراج yaw، الانحراف pitch والالتفاف roll) والسرعات الزاوية حول كل محور من الإطار OABC والمرمزة [P Q R].

هناك 6 دوال أخرى ضرورية: موقع مركز الثقل [XYZ] ومكونات السرعة الخطية [U V W] بالنسبة إلى الإطار الثابت. و خلاصة القول إن quadcopter لها 12 دالة تصف 6 درجات الحرية.

يجب أن نستنتج المعادلات التي تصف التوجه من الإطار المحمول بالنسبة إلى الثابت، وهو ما يمكن تحقيقه باستخدام مصفوفة الدوران. تنتج هذه المصفوفة عن ضرب ثلاثة مصفوفات الأخرى  $(R'(\phi), R'(\theta), R'(\psi))$ ، كل منها يمثل دوران إطار OABC حول كل واحد من محاور ONED.

$$R'(\phi, x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad R'(\theta, y) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$R'(\psi, z) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S = R'(\phi, x) R'(\theta, y) R'(\psi, z) \quad (2)$$

$$S = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \psi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \sin \theta \cos \phi \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

حيث S هي مصفوفة الدوران التي تعبر عن توجه تنسيق الإطار  $O_{ABC}$  بالنسبة للإطار المرجعي ONED.

باستخدام مصفوفة الدوران لربط القوى وعزوم الدوران من إطار الجسم مع إطار الأرض تكون معادلات الحركة كما يلي [9]:

$$= \begin{bmatrix} -g \\ \frac{(Iy-Iz)}{Ix} \dot{\theta} \dot{\psi} \\ \frac{(Iz-Ix)}{Iy} \dot{\phi} \dot{\psi} \\ \frac{(Ix-Iy)}{Iz} \dot{\phi} \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k}{Ix} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k}{Iy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k}{Iz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_z \\ \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} \quad (4) \quad \begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix}$$

حيث يبين الجدول(1) قيم ثوابت رباعية الدوار المدروسة

الجدول(1): قيم ثوابت رباعية الدوار المدروسة.		
1.4865e-7	معامل الدفع	k
1.023[kg]	كتلة رباعية المحرك	m
9.81[m/s <sup>2</sup> ]	تسارع الجاذبية الأرضية	g
0.0094999[kg.m <sup>2</sup> ]	عزم العطالة حول x	I <sub>x</sub>
0.0094999[kg.m <sup>2</sup> ]	عزم العطالة حول y	I <sub>y</sub>
0.0094999[kg.m <sup>2</sup> ]	عزم العطالة حول z	I <sub>z</sub>
1.4865e-7	معامل الجر	d

## 6-2- التحكم الذكي المعتمد على التعلم العاطفي للدماغ:

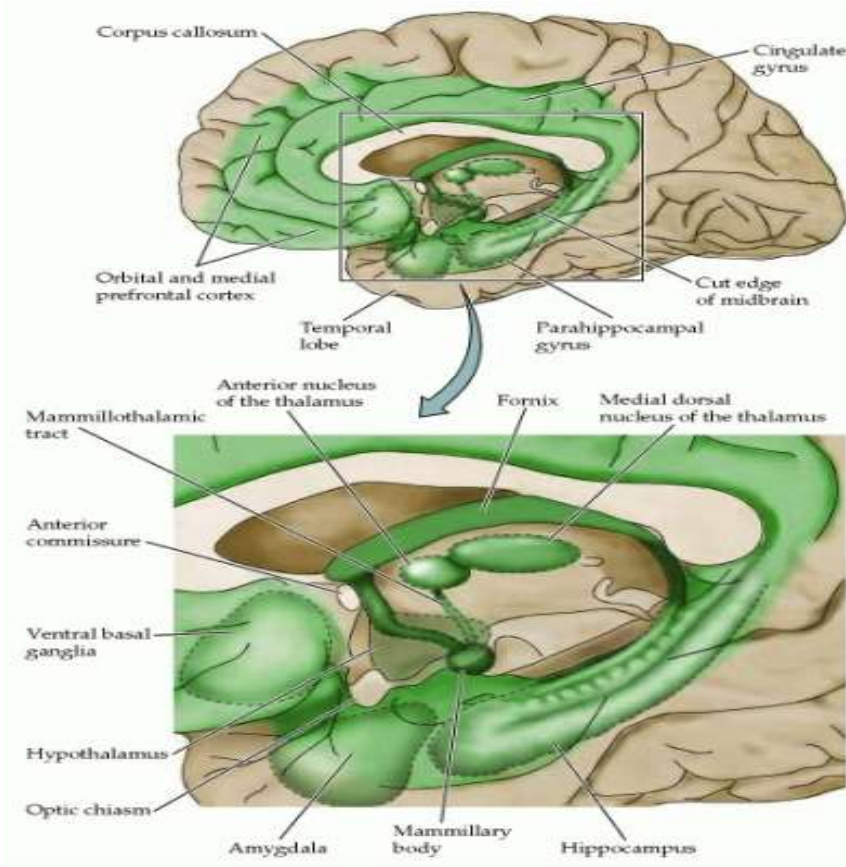
قام Moren و Balkenius في العام 2000 [10] باقتراح نموذج حسابي للوزة الدماغية (Amygdala) والقشرة الجبهية الحجاجية (Orbitofrontal Cortex) في الجهاز الحوفي (Limbic System) مستوحى من الجهاز العصبي. تم اقتراح خوارزمية التحكم المستخدمة في BELBIC بناء على ذلك النموذج.

يوجد أسلوبان لتطبيق نموذج التعلم العاطفي للدماغ (BEL) على نظم التحكم وهما الأسلوب المباشر (direct approach) والأسلوب غير المباشر (indirect approach). يستخدم الأسلوب الأول نموذج BEL على أنه جزء المتحكم، بينما يستخدم الأسلوب الثاني نموذج BEL لتوليف بارامترات المتحكم.

يعتبر التعلم العاطفي طريقة فعالة في نظم التحكم المعقدة اللاخطية في الزمن الحقيقي بسبب بساطتها، درجة تعقيدها الحسابي المنخفضة، وتدريبها السريع بالمقارنة مع طرق أخرى تعتبر صعبة التطبيق بسبب درجة تعقيدها الحسابي المرتفعة. تم تصميم BELBIC للعمل في تطبيقات نظم SISO و MIMO. تشير الأبحاث ذات الصلة على أن للنظم التي تستخدم BELBIC أداء ومثانة جيدين وخصوصاً قدرته في التعامل مع التشويش ومثانته في حالات تغير البارامترات نظراً لقابليته للتعلم.

## 6-2-1 بنية الجهاز الحوفي

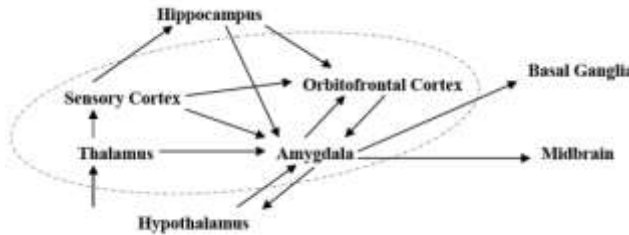
إن الجهاز الحوفي هو الجزء من الدماغ المسئول على العمليات العاطفية. يقع الجهاز الحوفي في القشرة الدماغية ويتكون بشكل أساسي من الأجزاء التالية: اللوزة الدماغية (Amygdala)، القشرة الجبهية الحجاجية (Orbitofrontal Cortex)، المهاد (Thalamus)، القشرة الحسية (Sensory Cortex)، الوطاء (Hypothalamus)، الحصين (Hippocampus) بالإضافة إلى أجزاء أخرى تعتبر أقل أهمية. تعتبر اللوزة الدماغية والقشرة الجبهية الحجاجية الأكثر أهمية في نموذج BEL. يبين الشكل (1) الأجزاء الأساسية للجهاز الحوفي. سنشرح فيما يلي الوظائف الأساسية للأجزاء الرئيسية للجهاز الحوفي.



الشكل(3): الأجزاء الرئيسية في الجهاز الحوفي.



تقع اللوزة الدماغية (Amygdala) في المنطقة تحت القشرية ( sub-cortical area). إن اللوزة الدماغية موضوعة بحيث يمكنها التواصل مع القشرة الحسية وبقية الأجزاء ضمن الجهاز الحوفي. يبين الشكل (4) الوصلات بين اللوزة الدماغية وبقية الأجزاء في الدماغ. بينت الدراسات أن المحفزات ترتبط مع نتائجها العاطفية في اللوزة الدماغية. يتم في هذه المنطقة ربط المحفزات عالية التحليل ( highly analyzed stimuli) في القشرة الحسية بالإضافة إلى المحفزات ذات التصنيف الخشن ( coarsely categorized stimuli) في المهاد، يتم ربطها بقيمة عاطفية (emotional value).



الشكل (4): التوصلات بين اللوزة الدماغية وبقية الأجزاء في الجهاز الحوفي.

تتفاعل القشرة الجبهية الحجاجية (Orbitofrontal Cortex) مع اللوزة الدماغية بشكل متبادل. تتمثل الوظيفة الترابطية الأساسية لهذا العنصر في: الذاكرة العاملة (Working Memory)، المجموعة التحضيرية (Preparatory Set) والتحكم المثبط (Inhibitory Control). إن الأحداث الحالية وأحداث الماضي القريب تمثل في الذاكرة العاملة. إن المجموعة التحضيرية هي المرحلة الأولى في التنبؤ بالأفعال على وشك الحدوث. إن التحكم المثبط هو تثبيط انتقائي للمناطق التي قد تكون غير مناسبة في بعض الحالات. أي بكلام آخر، تتمثل وظيفة القشرة الجبهية الحجاجية في تجاهل النتائج المتوقعة والتحكم بإيقاف عملية التعلم للوزة الدماغية.

يقع المهاد (Thalamus) جانب العقد القاعدية (basal ganglia)، وهي عبارة عن محطة متوسطة بين المناطق القشرية وتحت القشرية. تقوم عدة أجزاء من المهاد بترحيل معظم المعلومات الحسية من النظم الحسية المحيطة إلى القشرة الحسية. إن إشارات المهاد المتجهة نحو اللوزة الدماغية تتجاوز العمليات المتضمنة في القشرة الحسية

والأجزاء الأخرى للنظام، لذلك تستقبل اللوزة الدماغية محفزات سريعة من المهاد والتي تميز عن غيرها من المحفزات باسم الإشارة المميزة (characteristic signal). تقع القشرة الحسية (Sensory Cortex) قرب المهاد وتستقبل إشارات الدخل منه. تقوم القشرة الحية بمعالجة المعلومات من المناطق الحسية. ترسل القشرة الحسية إشارات عالية التحليل إلى اللوزة الدماغية والقشرة الجبهية الحجاجية. تستخدم الثدييات هذه المناطق من الجهاز الحوفي من أجل معالجة الإدراك الحسي ( perceptual processing).

يقع الوطاء (Hypothalamus) تحت المهاد وهو المسئول عن تنظيم نظام الغدد الصماء (endocrine system) والجهاز العصبي الذاتي ( autonomous nervous system). تتصل الأجزاء الجانبية من الوطاء مع عدة مناطق ضمن اللوزة الدماغية. يعتقد بأن هذه الوصلات لها أثر كبير في التحكم التحفيزي للأجزاء ضمن الوطاء. يقع الحصين (Hippocampus) في نفس منطقة اللوزة الدماغية، ويعتبر من أكثر أجزاء الجهاز الحوفي تعقيداً. إن وظيفته الأساسية هي ربط البيئة مع مثال بيئي (environmental cue). من الوظائف الأخرى للحصين، ترتيب الذاكرة طويلة الأمد، وتكوين البيانات القرينية (contextual representations).

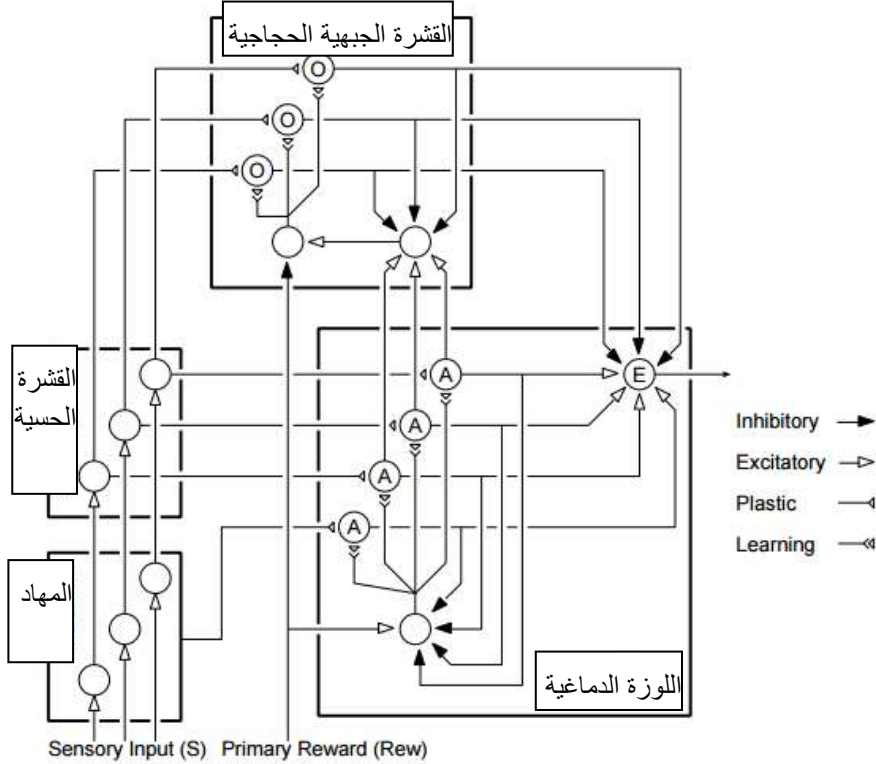
بالإضافة إلى الأجزاء المذكورة سابقاً، توجد عدة أجزاء لها دور في الجهاز الحوفي، نذكر منها العقد القاعدية (Basal Ganglia)، الكرة الشاحبة (Globus Pallidus)، المادة السوداء (Substantia Nigra)، النواة تحت المهاد (Subthalamic Nucleus) والقشرة حول اللوزة (Periamygdaloid Cortex).

## 6-2-2 النموذج الحسابي لـ BEL

قام كل من Moren و Balkenius [10] بتطوير نموذج حسابي لمحاكاة اللوزة الدماغية، القشرة الجبهية الحجاجية، المهاد، القشرة الحسية، وأجزاء الدماغ المسئولة عن التعامل مع العواطف. يبين الشكل (5) النموذج الحسابي للتعلم العاطفي. يقسم هذا النموذج إلى أربعة أجزاء: المهاد، القشرة الحسية، اللوزة الدماغية والقشرة الجبهية

الحجاجية. سنغطي في هذا الجزء المهاد والقشرة الحسية بشكل سطحي، بينما سنغطي اللوزة الدماغية والقشرة الحسية بشكل مفصل.

إن وظيفة المهاد في هذا النموذج هي تمرير الإشارات إلى القشرة الحسية. يرسل المهاد أيضاً إشارة إلى اللوزة الدماغية مبيّنة على الشكل بتوصيل مفرد. إن هذه الوصلة لا تعطي معلومات عن المحفزات وإنما تقوم فقط بتمثيل وجود بعض المحفزات.



الشكل (5): رسم تخطيطي لعملية التعلم العاطفي للدماغ (BEK) [10].

إن وظيفة القشرة الحسية هي إرسال إشارات تمثل المحفزات بشكل أكثر تفصيلاً إلى كل من اللوزة الدماغية والقشرة الجبهية الحجاجية. إن هذه الإشارات تقود بدء عملية التعليم في اللوزة الدماغية والمثبطات التي تتحكم بها القشرة الجبهية الحجاجية.

يقسم الجزء الأساسي للنموذج إلى قسمين أساسيين، وبحيث يقابلان اللوزة الدماغية والقشرة الجبهية الحجاجية. إن هذين القسمين على درجة عالية من التعقيد وسنذكر فيما يلي بعضاً من وظائفهما. تستقبل اللوزة الدماغية المداخل من المهاد ومناطق القشرة،

بينما تستقبل القشرة الجبهية الحاجية المداخل من مناطق القشرة ومن اللوزة الدماغية. يستقبل النظام أيضاً إشارة داعمة (reinforcing signal) تسمى Primary Reward (Rew).

يلاحظ من الشكل أن اللوزة الدماغية تستقبل ثلاثة أنواع من المداخل الحسية. يأتي الدخل الأول من المهاد ومن القشرة الحسية. يكون الدخل الثاني عبارة عن إشارة تستخدم لترميز الأهمية العاطفية. يسمى هذا الدخل بإشارة التدعيم (reinforcement) وتكافئ على سبيل المثال شعور التذوق أو الألم. تستقبل اللوزة الدماغية دخلاً مثبطاً من نظام القشرة الجبهية الحاجية والذي يمكن أن تثبط الاستجابات العاطفية غير المناسبة.

يوجد ضمن اللوزة الدماغية نظامان اثنان. يكون النظام الأول مسئولاً عن التعلم المثار ويتكون من عدد من العقد الحسية ومن مدخل للتعلم. يكون مدخل التحكم جزءاً من حلقة تغذية عكسية سالبة توقف إشارة التعلم حالما يصل الخرج إلى مرحلة مساوية لإشارة التعليم. إن وظيفة حلقة التغذية العكسية هي ضمان أن يكون رد الفعل العاطفي بنفس المطال لإشارة التدعيم. إن القسم الثاني للوزة الدماغية هو حيث تقوم عملية التنشيط من نظام القشرة الجبهية الحاجية بالتحكم بالخرج.

يستقبل نظام القشرة الجبهية الحاجية المداخل من القشرة الحسية بالإضافة إلى معلومات عن إشارة التدعيم الحالية والمتوقعة من اللوزة الدماغية. يتم مقارنة هاتين الإشارتين، وإذا لم نحصل على التدعيم المتوقع يتم تفعيل التعلم في نظام القشرة الجبهية الحاجية. إن هذه المرحلة من التعلم تجعل من المحفز الحالي قادراً على التحكم بإشارة التنشيط المرسله إلى اللوزة الدماغية بطريقة تجعل بالإمكان تخميد الاستجابة.

يمثل الشعاع  $S$  المداخل المحفزة للنظام. توجد عقدة  $A$  لكل محفز  $S$ . يوجد وزن توصيل مرن  $V$  (plastic connection weight) لكل عقدة  $A$ . يتم حساب جداء الدخل بهذا الوزن ويكون الناتج هو خرج العقدة  $A$  كما هو موضح في الشكل (5). يمكن حساب التفعيل لكل عقدة من  $A$  بالعلاقة:

$$A_i = S_i V_i \quad (5)$$

يوجد دخل آخر  $A_{th}$  إلى اللوزة الدماغية يمثل القيمة العظمى للمداخل المحفزة  $S$ :

$$A_{th} = \max(S_i) \quad (6)$$

تستخدم هذه الإشارة عند ترميز المداخل الحسية. يتم تعديل أوزان التوصيل  $V_i$  لكل عقدة  $A$  بما يتناسب مع الفرق بين الإشارة الداعمة  $Rew$  ومجموع الخرج الحالي لكل العقد  $A$ . بفرض أن  $\alpha$  هو ثابت يستخدم لتعديل سرعة التعلم:

$$\Delta V_i = \alpha \left[ S_i \max \left( 0, Rew - \sum_j A_j \right) \right] \quad (7)$$

نلاحظ خرج النموذج سيقترب من مطال الإشارة الداعمة. لا يمكن للوزن  $V$  أن يتناقص وهذا الأمر له سبب منطقي إذ أنه بمجرد أن تم تعلم رد الفعل العاطفي، يجب أن يكون دائماً وألا ينسى. إن مهمة تثبيط ردة الفعل هذه في الحالات غير المناسبة هي وظيفة القشرة الجبهية الحجاجية. إن قاعدة التعلم للقشرة الجبهية الحجاجية مشابهة لقاعدة تعلم اللوزة الدماغية إلا أن أوزان الوصلات للقشرة الجبهية الحجاجية يمكن أن تزداد أو أن تتناقص. توجد عقدة  $O$  لكل محفز. تسلك العقد  $O$  سلوكاً مماثلاً للعقد  $A$  حيث تستخدم أوزان الوصلات لإشارات الدخل لتوليد الخرج.

$$O_i = S_i W_i \quad (8)$$

يتم حساب إشارة التدعيم للعقد  $O$  من الفرق بين الخرج السابق  $E$  والإشارة الداعمة. بفرض  $\beta$  ثابت يدل على معدل التعلم، يمكن حساب  $\Delta W_i$  وفق العلاقة (9):

$$\Delta W_i = \beta \left( S_i \sum_j (O_j - Rew) \right) \quad (9)$$

أي أن العقد  $O$  تقوم بمقارنة إشارة التدعيم المتوقعة والمستلمة وتنبط خرج النموذج بما يتناسب مع مطال الفرق.

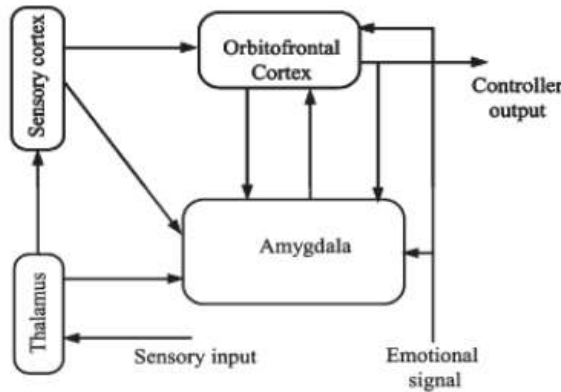
تقوم العقدة E بجمع مخارج العقد A ومن ثم تطرح المخارج المثبطة من العقد O. إن هذا الخرج هو خرج النموذج.

$$E = \sum_i A_i - \sum_i O_i \quad (10)$$

إن هذا النظام يعمل إذاً على مرحلتين: في المرحلة الأولى يتعلم النظام الأساسي أن يتوقع ويتعامل مع إشارة تدعيم معطاة. ولا ينسى النظام الفرعي ما تعلمه، بحيث يعطي إمكانية الاحتفاظ بقيمة الوصلات العاطفية حسب الحاجة. أما في المرحلة الثانية يقوم النظام الثاني المساعد بتتبع عدم التطابق بين توقعات النظام الأساسي والإشارة الداعمة المستلمة كما أنه يتعلم كيف يثبط خرج النظام بما يتناسب مع عدم التطابق [11].

### 3-2-6 المتحكم الذكي المعتمد على التعلم العاطفي للدماغ

تم تصميم نموذج BELBIC بناء على المعادلات السابقة كنموذج إدراكي ذي حلقة مفتوحة من قبل C. Lucas وزملاؤه في العام 2004 [12]. تم استخدام هذا المتحكم في العديد من التطبيقات الصناعية وفي أغراض التحكم. يبين الشكل (6) طريقة تطبيق هذا النموذج. إن BELBIC ببساطة هو آلية لتوليد الأفعال بناءً على مداخل حسية ومنبهات عاطفية (Reward signals). تبين المعادلات (5) ← (10) معادلات BELBIC [13].



الشكل (6): مخطط صندوقي مبسط للتحكم المعتمد على العواطف.

### 6-3. تصميم المتحكم

#### 6-3-1. المتحكم PID

قمنا بتصميم متحكم PID لكل زاوية من زوايا أولر الثلاثة roll, pitch, yaw وللارتفاع z، ومن أجل سهولة المناقشة سوف نقوم بعرض آلية تصميم المتحكم PID من أجل الزاوية roll.

يتم تصميم المتحكم PID من خلال توليف معاملاته التناسبي والتكاملي والتفاضلي P,I,D، إن الجزء التناسبي من وحدة التحكم يعطي إشارة تحكم مكونة من جداء الثابت التناسبي Proll مع إشارة الخطأ  $e(t)$  التي هي الفرق بين القيمة المرجعية  $\phi_r$  للزاوية roll والقيمة الفعلية  $\phi$  كما يلي

$$P_{out} = P_{roll} * e(t) = P_{roll} * (\phi_r - \phi) \quad (11)$$

أما الجزء التكاملي من المتحكم فيعطي إشارة عبارة عن جداء الثابت التكاملي  $I_{roll}$  في تكامل إشارة الخطأ، ويكون هذا الجزء مسئول عن القضاء على أخطاء الحالة المستقرة ودفع إشارة الخرج نحو الإشارة المرجعية المطلوبة، كما أنه يقلل زمن الارتفاع لإشارة الخرج ولكن يزيد زمن الاستقرار. تعطى معادلة الجزء التكاملي من المتحكم وفق المعادلة

$$I_{out} = I_{roll} * \int_0^t e(t) dt \quad (12)$$

بالنسبة للجزء التفاضلي من المتحكم، فيعطي إشارة خرج هي عبارة عن جداء الثابت التفاضلي  $D_{roll}$  في تفاضل إشارة الخطأ بالنسبة للزمن، ويكون هذا الجزء مسئول عن الحد من تجاوز الإشارة المرجعية overshoot. تعطى معادلة الجزء التفاضلي من المتحكم وفق المعادلة

$$D_{out} = D_{roll} * d/dt e(t) \quad (13)$$

يكون خرج المتحكم النهائي هو مجموع مخارج الأجزاء الثلاثة حيث يتم تجميعها وجمعها لتشكيل مدخل إلى كتلة ديناميكيات النظام.

$$U_{roll} = P_{roll} * e(t) + I_{roll} * \int_0^t e(t) dt + D_{roll} * d/dt e(t) \quad (14)$$

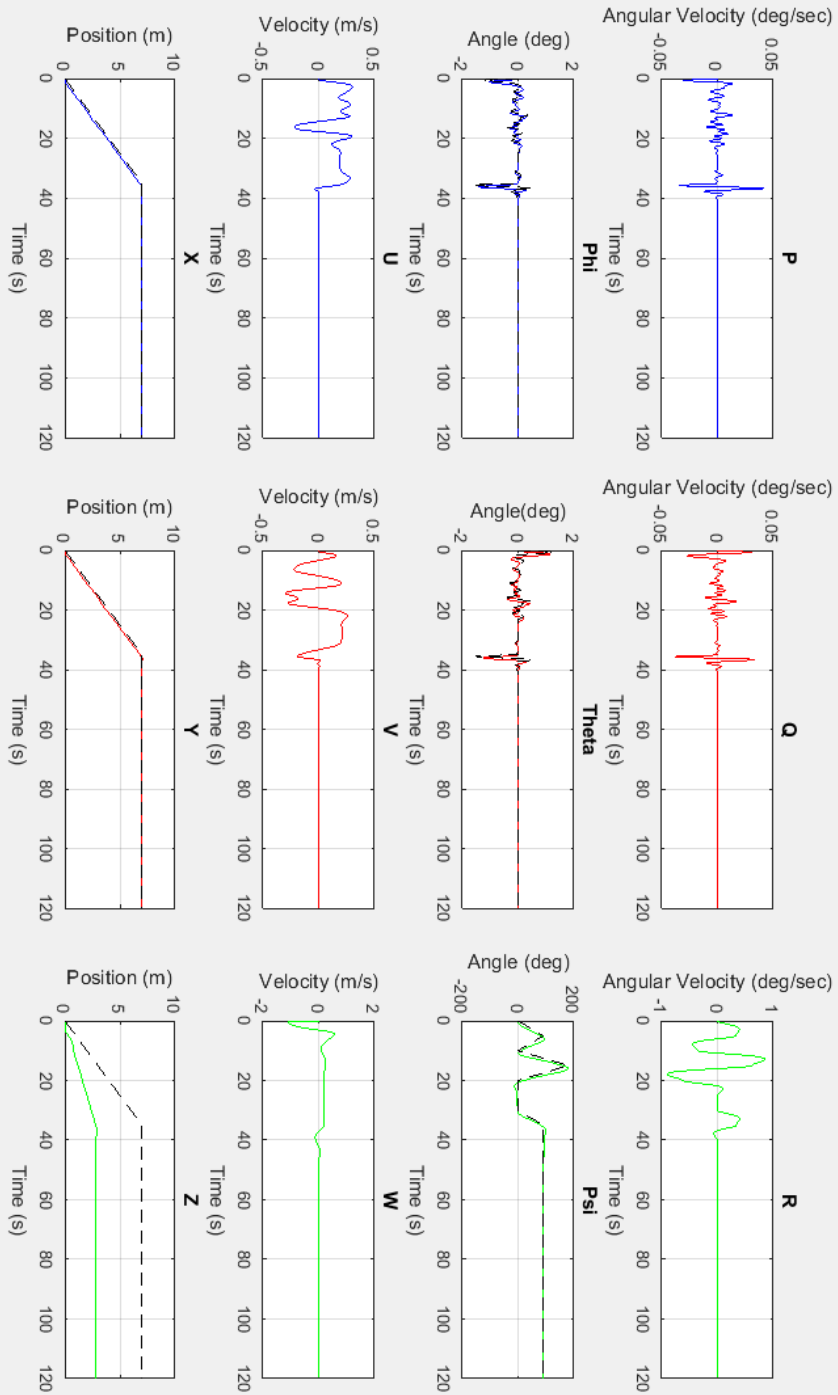
إن الهدف الأساسي من عملية التحكم هو تحقيق استقرار النظام خلال فترة زمنية معينة تحقق القيد الزمني المفروض على طائرة رباعية المحرك وإلا فإن النظام سينهار وتسقط طائرة رباعية المحرك.

مع تنفيذ وحدة التحكم بنجاح داخل بيئة المحاكاة MATLAB ، كانت الخطوة التالية ضبط وحدة التحكم لكل زاوية موقع. مرة أخرى، سوف نستخدم محور roll على سبيل المثال، على الرغم من أن طريقة الضبط تم تطبيقها على كل محور على حدة. هناك عدة طرق ضبط متاحة الأرباح P، I و D بشكل مناسب لتتطابق مع الاستجابة المطلوبة. تشمل هذه الطرق الضبط اليدوي (التغيير والتبديل حتى تتحقق الاستجابة المطلوبة)، Ziegler-Nichols (الضبط باستخدام خوارزمية المجموعة)، وبرمجيات الضبط، وضبط Cohen-Coon (توفير دخل خطوي، وقياس الاستجابة، ووضع المعاملات من هذه الاستجابة). تم اختيار طريقة ضبط Ziegler-Nichols كخوارزمية ضبط أولى حيث حصلنا على الأرباح التالية :  $(K_p=6, k_i=4, k_d=3.5)$ . تم اختبار قدرة المتحكم PID على التحكم بالنظام المدروس (رباعية المحرك) وذلك لقيادة الطائرة في مسار من النقطة  $(0,0,0)$  وحتى الوصول إلى النقطة  $(7,7,7)$  والاستقرار في المكان حتى نهاية زمن المحاكاة البالغ 120 ثانية، ويظهر الشكل (7) استجابة النظام عند وجود المتحكم PID مع زمن محاكاة 120 ثانية. إذ يظهر في الشكل الخطوط البيانية التي تعبر عن الدوال الست: السرعات الزاوية حول كل محور من الإطار OABC والممرزة  $[P Q R]$  وزوايا أولر  $[\Phi \Theta \Psi]$  Euler (الانعراج yaw، الانحراف pitch والالتفاف roll) ومكونات السرعة الخطية  $[U V W]$  بالنسبة إلى الإطار الثابت وموقع مركز النقل  $[XYZ]$ . نلاحظ أن النظام مستقر حيث نلاحظ اهتزاز السرعات الزاوية  $[P Q R]$  والسرعات الخطية  $[U V W]$  و وصول مركز ثقله  $[XYZ]$  إلى الهدف المنشود عند الزمن 40 ثانية.

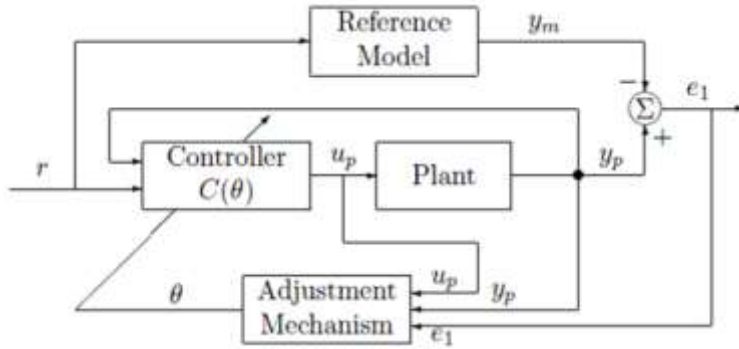
### 2-3-6 المتحكم ذو النموذج المرجعي Model Reference Adaptive control (MRAC) :

أن MRAC هو أحد الأنواع الرئيسية للتحكم التكيفي، ويُختار النموذج المرجعي ليعطي الخرج المطلوب من النظام  $y_m$ ، الذي يجب أن يساويه خرج النظام (plant) أي  $y_p$  بحيث يكون الخطأ  $e_1 = y_m - y_p$  وهو يمثل انحراف خرج النظام عن الخرج المطلوب أقرب ما يمكن من الصفر. إن نظام الحلقة المغلقة يتكون عادة من تغذية عكسية تحوي





الشكل (7): استجابة النظام مع PID بدون وجود ضجيج.



الشكل (8): البنية العامة لـ MRAC.

النظام (plant) والمتحكم  $C(\theta)$  وآلية التعديل (adjustment mechanism) التي تقوم بتوليد تخمينات بارامترات المتحكم  $\theta(t)$  بشكل on-line.

إن MRAC يمكن أن يكون مباشر (direct) أو غير مباشر (indirect).

ففي MRAC المباشر: يتم تعديل بارامترات المتحكم  $C(\theta)$  وهي  $\theta$  مباشرة بواسطة القانون التكيفي (adaptive Law) كما هو مبين في الشكل (8):

يتم في MRAC غير المباشر يتم حساب بارامترات المتحكم  $\theta$  في كل لحظة زمنية  $t$  بحل المعادلة الجبرية التابعة لكل من  $\theta$  وبارامترات النظام المخمّنة بشكل on-line.

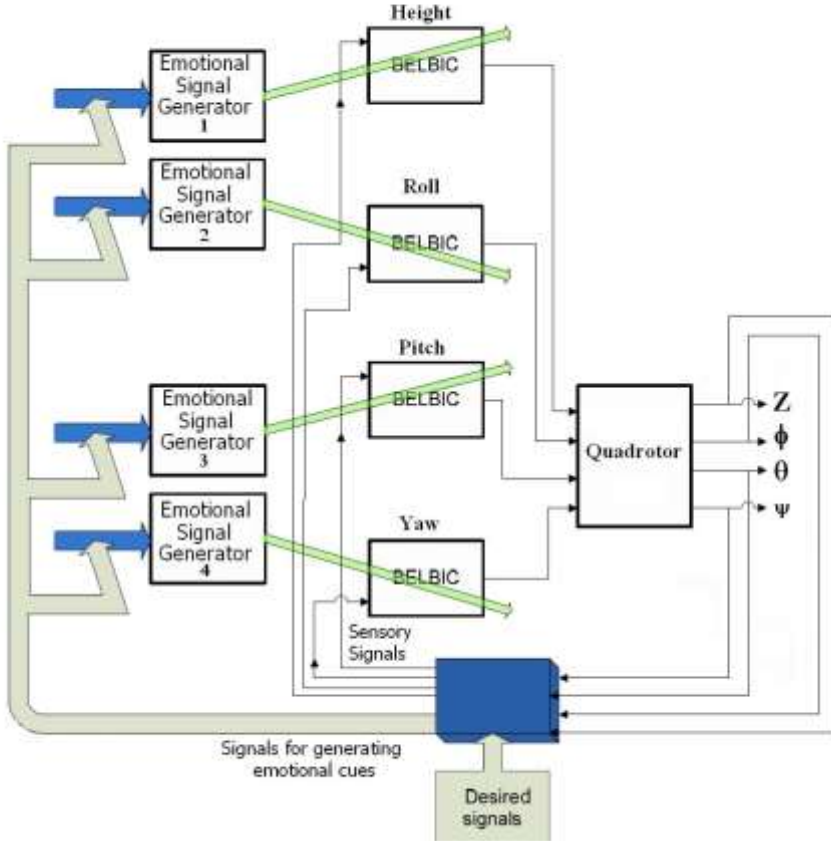
### 6-3-3 نموذج التحكم المقترح

تم في هذه الدراسة تصميم أربعة كتل BELBIC ضمن وحدة التحكم الذكية. كل كتلة BELBIC مسؤولة عن تحكم في متغير أساسي واحد في الحركة. يوضح الشكل (9) مخطط التحكم المقترح.

تتكون وحدة التحكم المقترحة من أربعة مولدات إشارة تحفيز دماغي (الربح أولية) وأربعة مداخل حسية.

تم اختبار قدرة المتحكم BELBIC علة التحكم بالنظام المدروس (رباعية المحرك) وذلك لقيادة الطائرة في مسار من النقطة  $(0,0,0)$  وحتى الوصول إلى النقطة  $(7,7,7)$  والاستقرار في المكان حتى نهاية زمن المحاكاة البالغ 120 ثانية، ويظهر الشكل (10) استجابة النظام عند وجود المتحكم BELBIC مع زمن محاكاة 120 ثانية دون وجود ضجيج، إذ يظهر في الشكل الخطوط البيانية التي تعبر عن الدوال الست: السرعات

الزاوية حول كل محور من الإطار  $O_{ABC}$  والمرمزة  $[P Q R]$  وزوايا أولر Euler  $[\Phi \Theta \Psi]$  (الانعراج yaw، الانحراف pitch والالتفاف roll) ومكونات السرعة الخطية  $[U V W]$  بالنسبة إلى الإطار الثابت وموقع مركز الثقل  $[XYZ]$ .

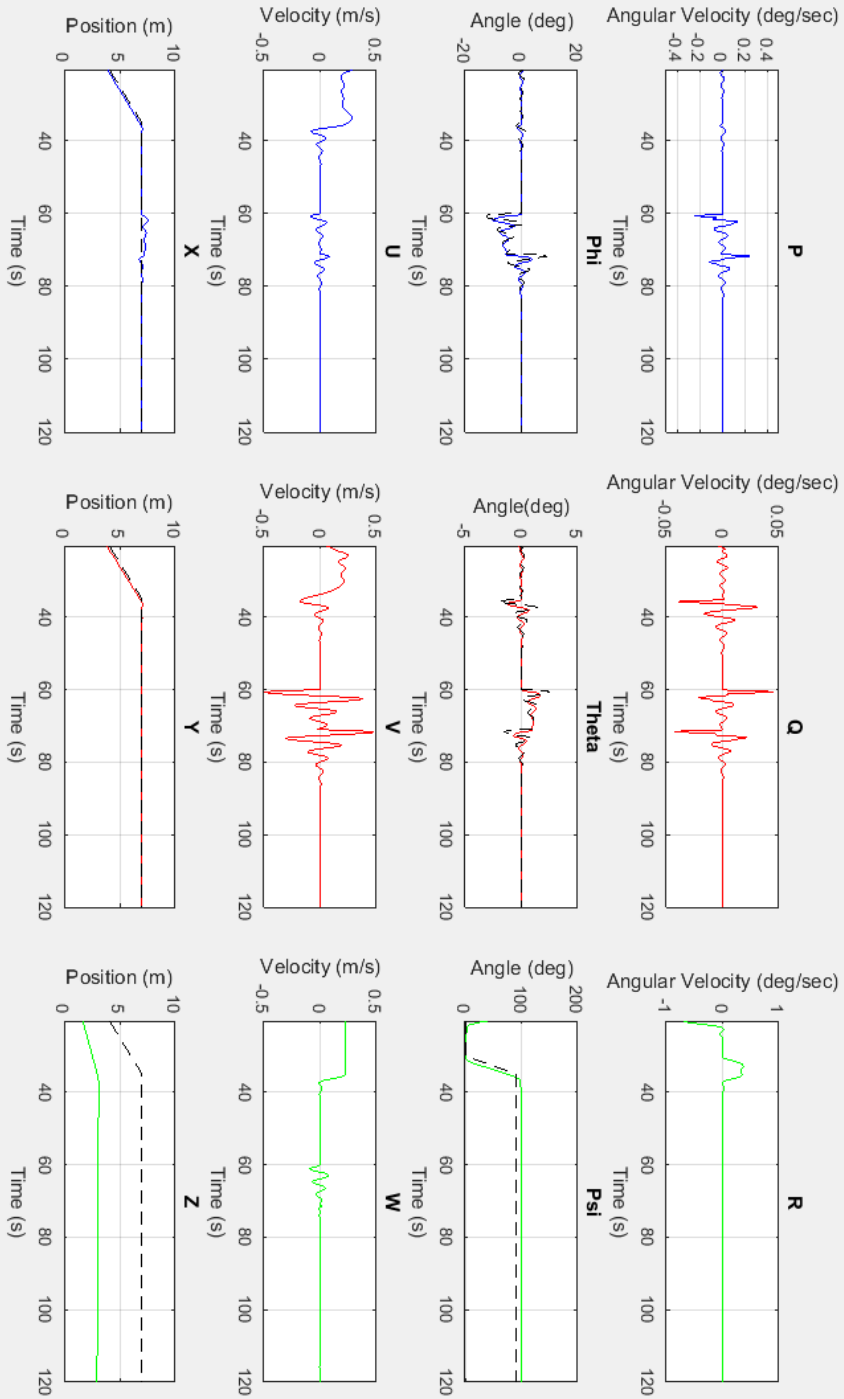


الشكل (9): مخطط التحكم المقترح.

نلاحظ أن النظام مستقر حيث نلاحظ اهتزاز السرعات الزاوية  $[P Q R]$  والسرعات الخطية  $[U V W]$  و وصول مركز ثقله  $[XYZ]$  إلى الهدف المنشود عند الزمن 40 ثانية.

#### 4-6 اختبار النظام ضد الضجيج

قمنا باختبار كل من المتحكم PID والمتحكم ذو النموذج المرجعي والمتحكم BELBIC عند تعريض النظام إلى ضجيج على ثلاث مراحل) وذلك عند انتقال الطائرة



الشكل (10): استجابة النظام مع BELBIC بدون وجود ضجيج.

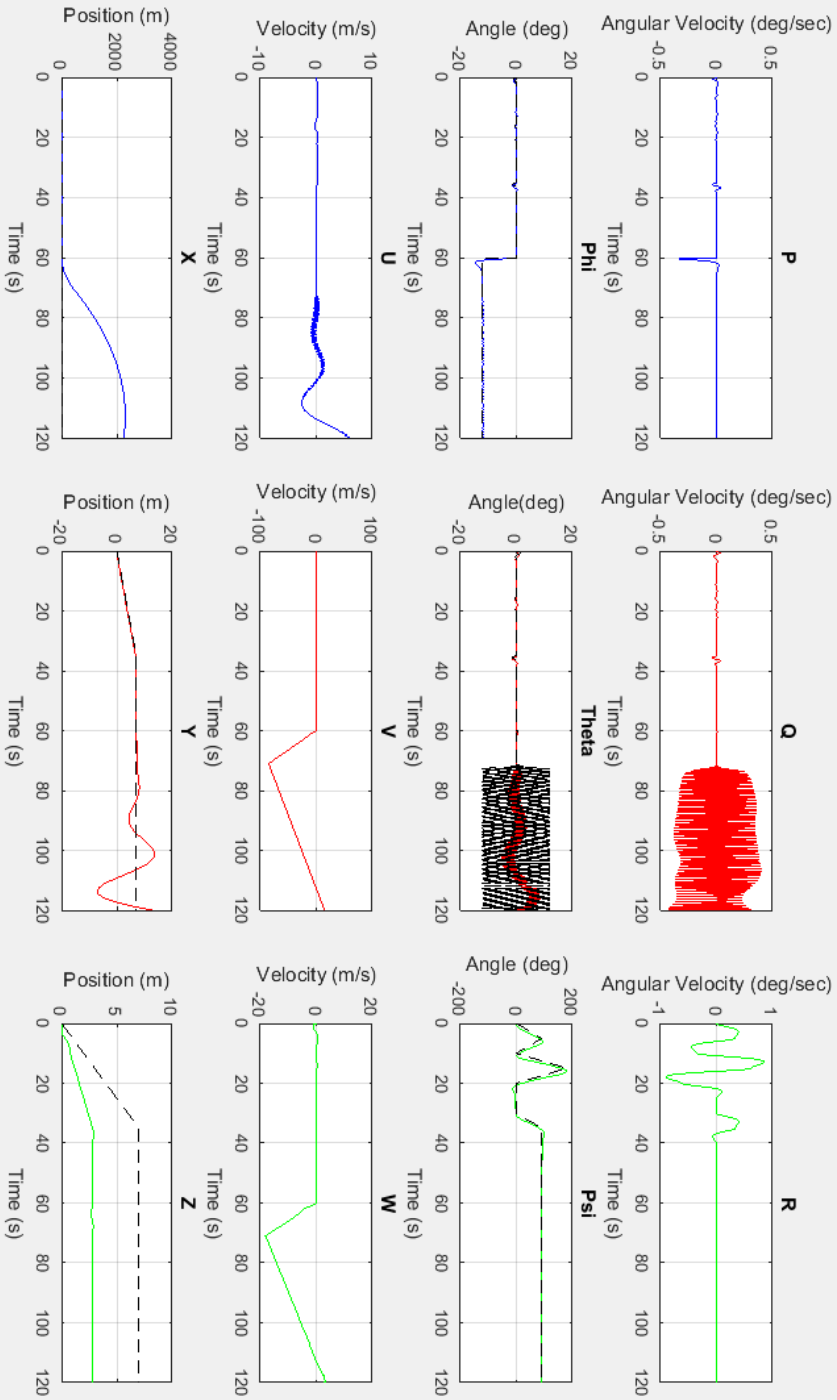
في مسار من النقطة (0,0,0) وحتى الوصول إلى النقطة (7,7,7) والاستقرار في المكان حتى نهاية زمن المحاكاة البالغ 120 ثانية،:

#### 6-4-1 المرحلة الأولى تطبيق الضجيج على محور واحد:

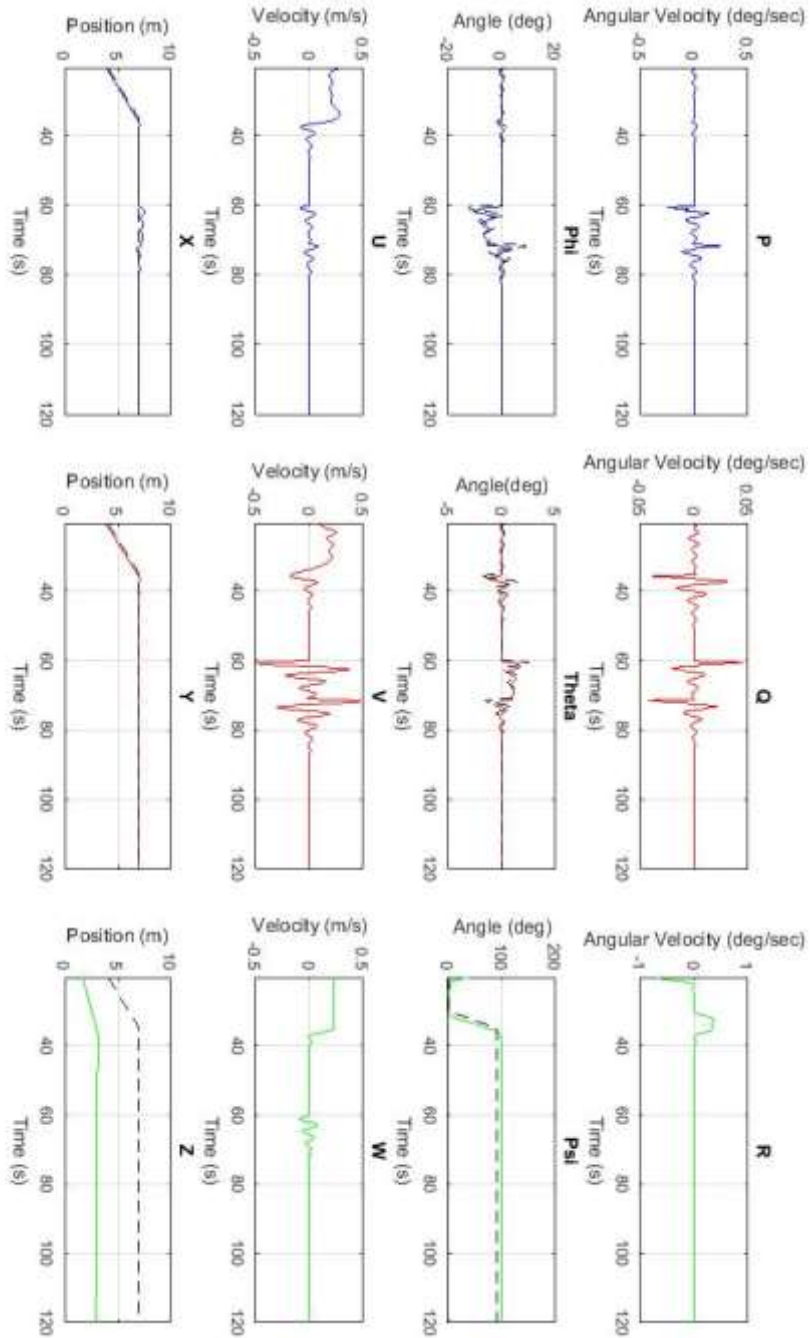
نقوم بتطبيق الضجيج على شكل قوة مطبقة على محور واحد بعد الاستقرار في الفترة الزمنية من الثانية 60 وحتى 70 على كل من نموذج النظام بوجود كل من PID والنظام بوجود BELBIC، يبين الشكل (11) استجابة النظام بوجود المتحكم PID للضجيج، بينما يبين الشكل (12) استجابة النظام بوجود المتحكم BELBIC للضجيج. نلاحظ عدم قدرة المتحكم PID من السيطرة على الضجيج حيث أن النظام أصبح غير مستقر حيث نلاحظ اهتزاز السرعات الزاوية [P Q R] والسرعات الخطية [U V W] وعدم وصول مركز ثقله [XYZ] إلى الهدف المنشود. ويصبح وبعيد عن الاستقرار، بينما نلاحظ من الشكل أن النموذج المقترح قد استطاع تحقيق الاستقرار في الزمن المحدد، حيث بعد زوال الضجيج الخارجي نلاحظ اهتزاز السرعات الزاوية [P Q R] والسرعات الخطية [U V W] لفترة زمنية قصيرة ثم تستقر على قيمتها المرجعية (الخطوط المنقطعة)، وبالتالي استطاع تحقيق القيد الزمني المفروض عند التعرض للضجيج. كما نلاحظ بالمقارنة بين الشكلين (11) و(12) نجد الجدول 2:

الجدول (2): مقارنة ما بين استجابة PID و استجابة BELBIC عند تطبيق ضجيج على محور واحد.				
BELBIC	PID			
10s	لا يستقر	الزمن اللازم للاستقرار بعد زوال الضجيج		
[-0.11→0.28]	[-0.34→0]	P	السرعات الزاوية	مجال تأرجح البارامترات المدروسة
[-0.45→0.48]	[-0.47→0.46]	Q		
[-0.5→0.6]	[-1→0.82]	R		
[-10.9→0]	[-16.5→0]	Phi	زوايا أولر	
[-52.9 → 2.5]	[-11.3→11.8]	Theta		
[0→100]	[0 →188]	Psi		
[-0.1→0.2]	[-3→6.85]	U	السرعات الخطية	
[-0.5→0.48]	[-91→0]	V		
[0.→0.29]	[-19.8→0]	W		

نلاحظ تأرجح بعد القيم مثل Theta و Psi و U و V و W في المتحكم PID بمجال واسع دون المقدرة على الوصول إلى الاستقرار.



الشكل (11) استجابة النظام بوجود المتحكم PID مع ضجيج على محور واحد



الشكل (12) استجابة النظام بوجود المتحكم BELBIC مع ضجيج على محور واحد

#### 6-4-1 المرحلة الثانية تطبيق الضجيج على محورين:

نقوم بتطبيق الضجيج على شكل قوة مطبقة على محورين بعد الاستقرار في الفترة الزمنية من الثانية 60 وحتى 70 على كل من نموذج النظام بوجود كل من PID و النظام بوجود BELBIC، يبين الشكل (13) استجابة النظام بوجود المتحكم PID للضجيج، بينما يبين الشكل (14) استجابة النظام بوجود المتحكم ذو النموذج المرجعي ويبين الشكل (15) استجابة النظام بوجود المتحكم BELBIC للضجيج.

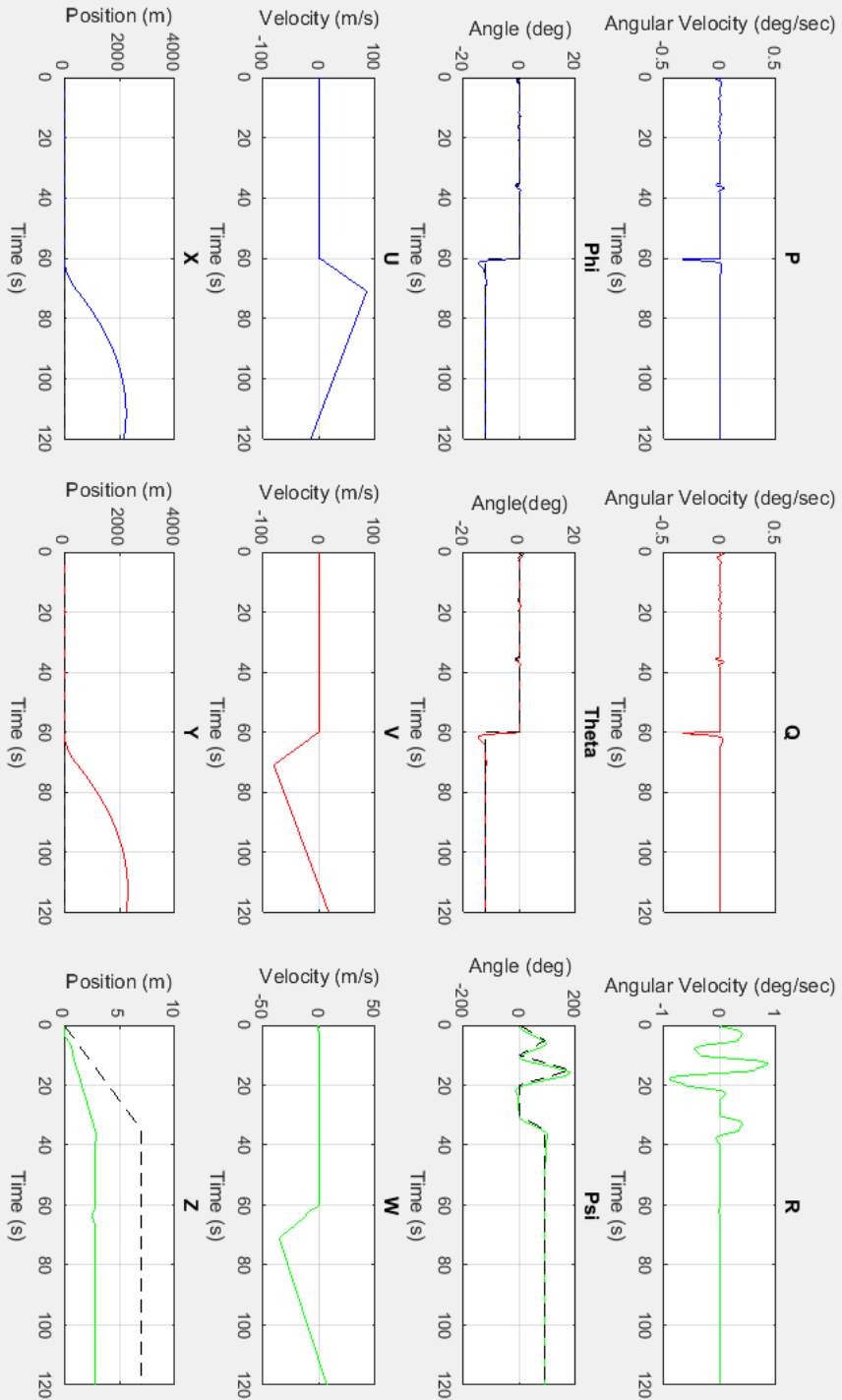
نلاحظ أن المتحكم PID لم يستطع السيطرة على الضجيج وبالتالي يصبح النظام مهتز حيث نلاحظ اهتزاز السرعات الزاوية [P Q R] والسرعات الخطية [U V W] ويصبح النظام بعيد عن الاستقرار، ولكن نلاحظ أيضاً أن اهتزاز النظام أقل من الاهتزاز في حالة القوة المطبقة على محور واحد. كما نلاحظ من الشكل عدم مقدرة المتحكم ذو النموذج المرجعي السيطرة على النظام بعد التعرض للضجيج حيث نلاحظ اهتزاز السرعات الزاوية [P Q R] والسرعات الخطية [U V W]. بينما نلاحظ من الشكل أن النموذج المقترح قد استطاع تحقيق الاستقرار في الزمن المحدد حيث نلاحظ اهتزاز السرعات الزاوية [P Q R] والسرعات الخطية [U V W] لفترة زمنية قصيرة ثم تستقر على قيمتها المرجعية (الخطوط المنقطعة) وبالتالي استطاع تحقيق القيد الزمني المفروض عليه عند التعرض للضجيج. كما نلاحظ بالمقارنة بين الشكلين (13) و (15) نجد:

الجدول (3): مقارنة ما بين استجابة PID و استجابة BELBIC عند تطبيق ضجيج على محورين.

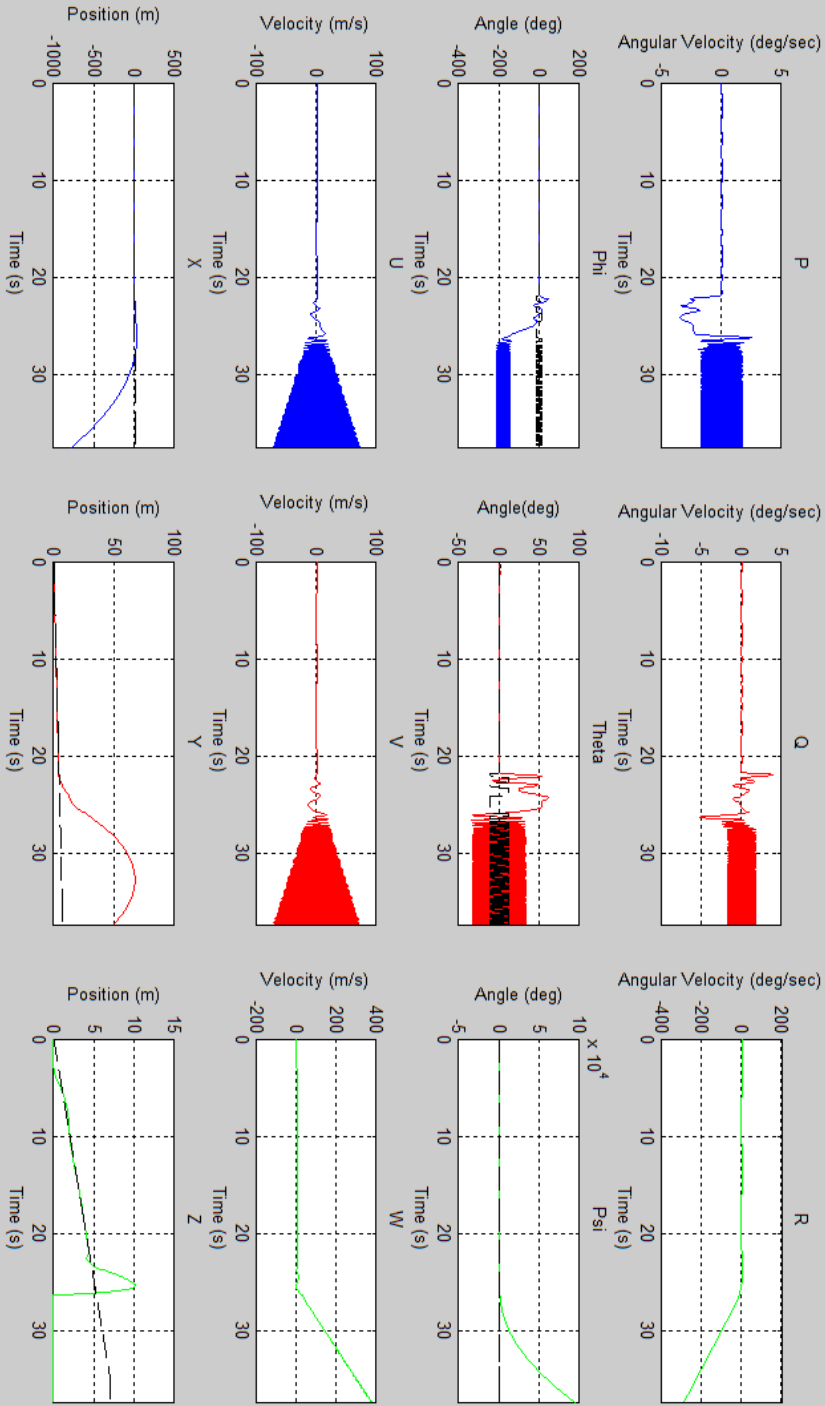
BELBIC	PID	الزمن اللازم للاستقرار بعد زوال الضجيج		
10s	لا يستقر			
[-0.25→0.3]	[-0.5→0]	P	السرعات الزاوية	مجال تأرجح البارمترات المدروسة
[-0.3→0.3]	[-0.36→0]	Q		
[-0.7→0.4]	[-0.6→0.8]	R		
[-11.8→0]	[-17→0]	Phi	زوايا أولر	
[-11.3→0]	[-15→0]	Theta		
[0→100]	[0 →188]	Psi		
[-0.47→0.44]	[0→89]	U	السرعات الخطية	
[-0.44→0.8]	[-94→0]	V		
[0→0.35]	[-30→0]	W		

نلاحظ تأرجح بعد القيم مثل Psi و U و V و W في المتحكم PID بمجال واسع دون المقدرة على الوصول إلى الاستقرار.

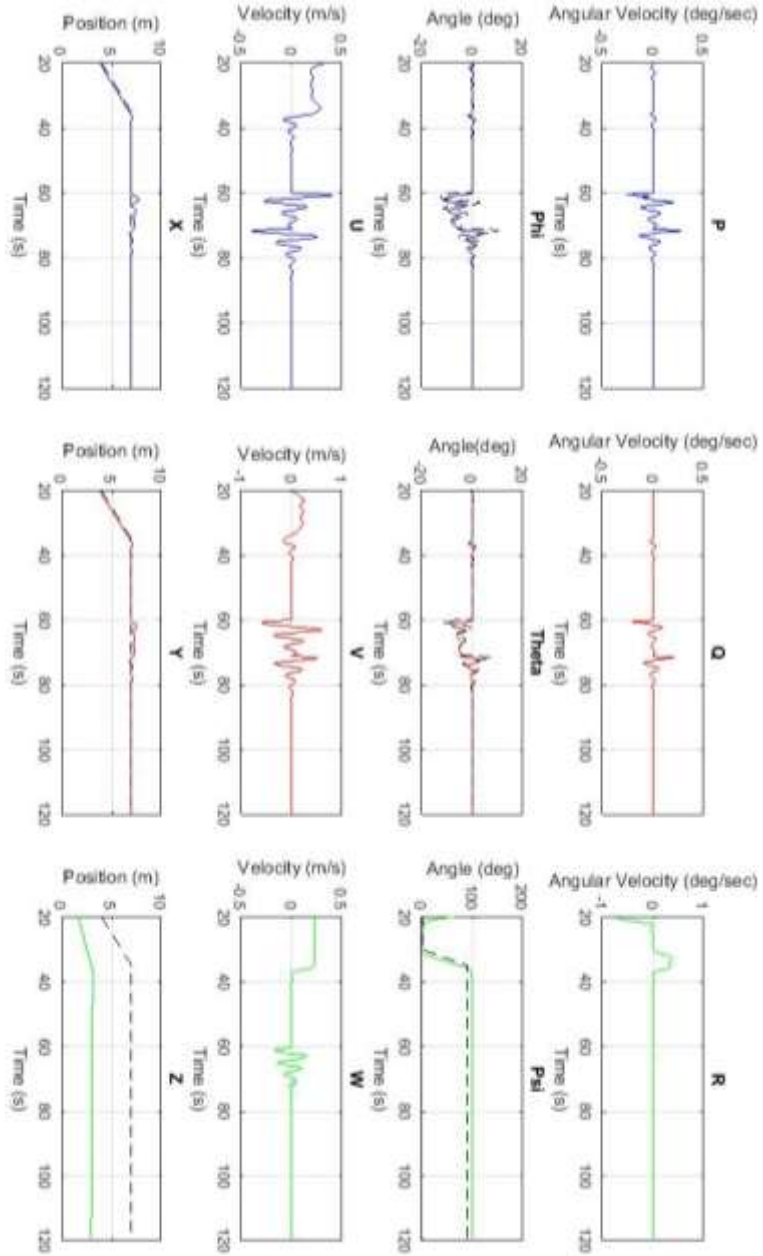




الشكل (13) استجابة النظام بوجود المتحكم PID للمنحني على محورين



الشكل (14) استجابة النظام عند استخدام المتحكم ذو النموذج المرجعي مع ضجيج على محورين.



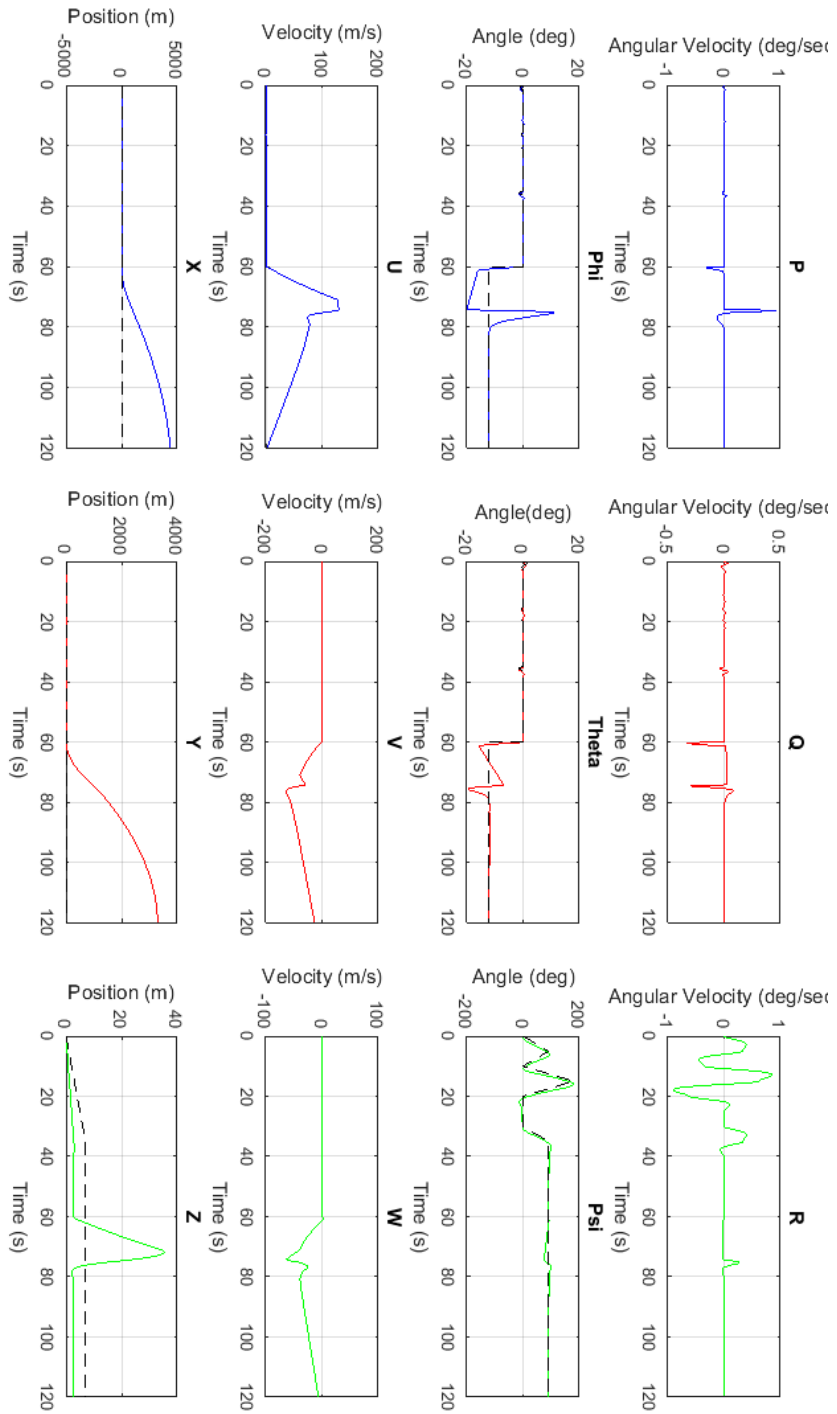
الشكل (15) استجابة النظام بوجود المتحكم BELBIC للضجيج على محورين

#### 6-4-1 المرحلة الثالثة تطبيق الضجيج على ثلاثة محاور:

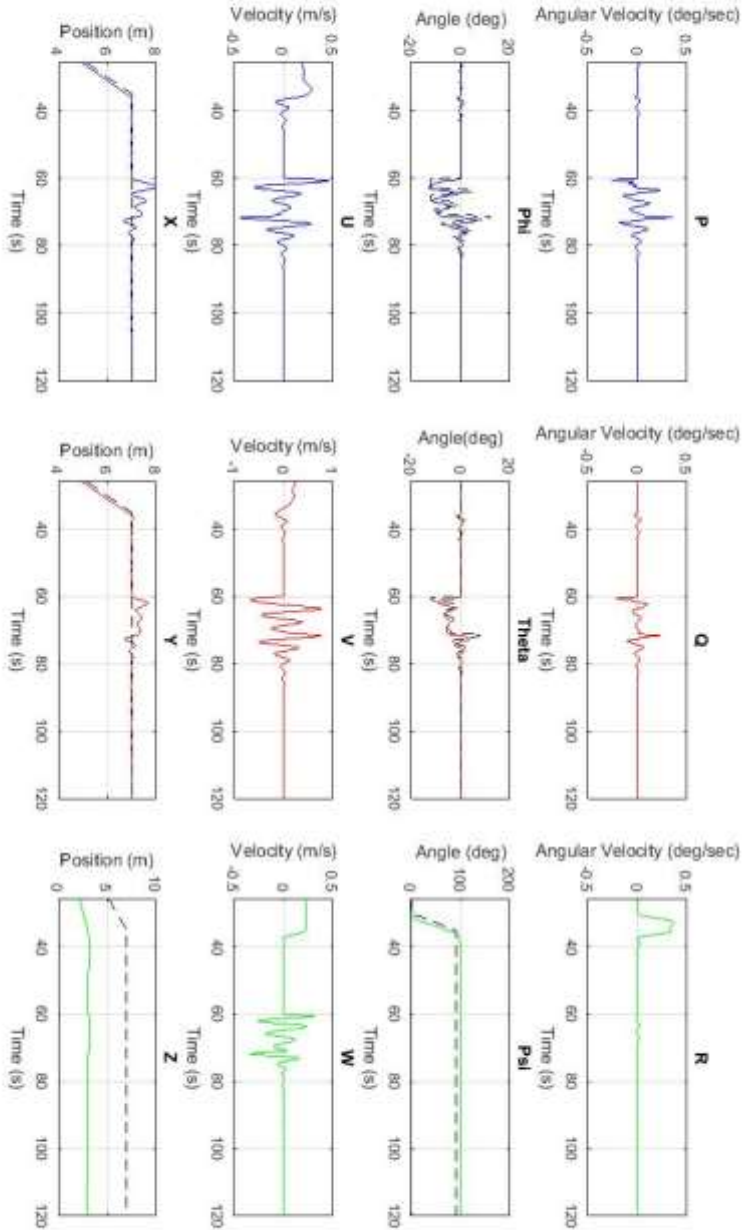
نقوم بتطبيق الضجيج على شكل قوة مطبقة على ثلاثة محاور بعد الاستقرار في الفترة الزمنية من الثانية 60 وحتى 70 على كل من نموذج النظام بوجود كل من PID و النظام بوجود BELBIC، يبين الشكل (16) استجابة النظام بوجود المتحكم PID للضجيج، بينما يبين الشكل (17) استجابة النظام بوجود المتحكم BELBIC للضجيج. نلاحظ أن المتحكم PID لم يستطع السيطرة على الضجيج وبالتالي يصبح النظام مهتز حيث نلاحظ اهتزاز السرعات الزاوية [P Q R] والسرعات الخطية [U V W] ويصبح النظام بعيد عن الاستقرار، ولكن نلاحظ أيضاً أن اهتزاز النظام أقل من الاهتزاز في حالة القوة المطبقة على محور واحد. بينما نلاحظ من الشكل أن النموذج المقترح قد استطاع تحقيق الاستقرار في الزمن المحدد حيث نلاحظ اهتزاز السرعات الزاوية [P Q R] والسرعات الخطية [U V W] لفترة زمنية قصيرة ثم تستقر على قيمتها المرجعية (الخطوط المنقطه) وبالتالي استطاع تحقيق القيد الزمني المفروض عليه عند التعرض للضجيج. كما نلاحظ بالمقارنة بين الشكلين (16) و(17) نجد:

الجدول (4): مقارنة ما بين استجابة PID و استجابة BELBIC عند تطبيق ضجيج على ثلاث محاور.			
BELBIC	PID	الزمن اللازم للاستقرار بعد زوال الضجيج	
10s	لا يستقر		
[-0.27→0.37]	[-1→1]	P	السرعات الزاوية
[-0.26→0.25]	[-0.2→0]	Q	
[0→0.34]	[-0.5→0.7]	R	
[-14→17]	[-20→0]	Phi	زوايا أولر
[-13.5→8]	[-19.3→0]	Theta	
[0→100]	[0 →179]	Psi	
[-0.35→0.5]	[-0→128]	U	السرعات الخطية
[-0.68→0.68]	[-118→0]	V	
[-0.34→0.43]	[-65→0]	W	

نلاحظ تأرجح بعد القيم مثل Psi و U و V و W في المتحكم PID بمجال واسع دون المقدرة على الوصول إلى الاستقرار.



الشكل (16) استجابة النظام بوجود المتحكم PID للضجيج على ثلاثة محاور



الشكل (17) استجابة النظام بوجود المتحكم BELBIC للضجيج على ثلاثة محاور

في النتيجة، استطاع هذا النظام المقترح بتحقيق القيد الزمني المفروض، وتحقيق الاستقرار للنظام حتى بعد تطبيق ضجيج على ثلاثة محاور، وتفوق على متحكم PID في التغلب على جميع أنواع الضجيج المطبق.

#### 7- الاستنتاجات:

تم استخدام المتحكم BELBIC للتحكم في موقع ومسار الطائرة رباعية الدوار Quadcopter خلال تعرض الطائرة إلى عدة أنواع من الضجيج وتمت مقارنة النتائج مع وحدة تحكم PID تقليدية مضبوطة جيداً ومتحكم ذو نموذج مرجعي، ومن خلال الأشكال والجدول نلاحظ أن النتائج قد أظهرت أداء جيد لتطبيق المتحكم BELBIC على الطائرة المذكورة حيث يستقر النظام عند استخدام BELBIC عند اللحظة 77 عند تطبيق ضجيج على محور واحد وعند الحظة 82 عند تطبيق ضجيج على محورين وعند اللحظة 81 عند تطبيق الضجيج على ثلاث محاور أما في حالة PID فهو لا يستقر في الحالات الثلاثة.

وبالتالي قمنا من خلال متحكم BELBIC التخلص من الآثار السلبية للضجيج على النظام.

#### 8- الأفاق المستقبلية:

تم في هذا البحث دراسة تأثير الضجيج على عدة محاور على التحكم بنظام طائرة رباعية الدوار Quadcopter ، بما أن الطائرة رباعية الدوار تطير في الجو بعيداً عن المحطة الأرضية التي تتحكم بها، وهناك عملية تبادل للرسائل ما بين المحطة الأرضية والطائرة، حيث تقوم المحطة الأرضية بإرسال إشارات التحكم المناسبة لها واستقبال إشارات التغذية العكسية. من الممكن في الدراسات المستقبلية دراسة مشكلة ضياع رزم الرسائل في كل من المسار الأمامي (من المتحكم إلى النظام) أوالمسار العكسي (من النظام إلى المتحكم) حتى ندرس مدى قدرة المتحكم على التغلب على مشكلة ضياع الرزم.





قائمة المراجع:

- [1] SHAHMIRZADI, DANIAL-2005 "**Computational Modeling of the Brain Limbic System and Its Application in Control Engineering.**" Texas A&M.
- [2] Hassen T. Dorrah, Ahmed M. El-Garhy, Mohamed E. El-Shimy- 2011 "**PSOBELBIC Scheme for Two-Coupled Distillation Column Process.**" Journal of Advanced Research 2, : 73-83.
- [3] Saeed Jafarzadeh, Rooholah Mirheidari, Mohammad Reza Jahed Motlagh, Mojtaba Barkhordari. 2008"**Intelligent Autopilot Control Design for a 2-Dof Helicopter Model.**" International Journal of Computers, Communications & Control 3, no. Proceedings of ICCCC 2008: 337-342.
- [4] Maziar A. Sharbafi, Caro Lucas, Roozbeh Daneshvar. 2010 "**Motion Control of Omni-Directional Three-Wheel Robots by Brain-Emotional- Learning-Based Intelligent Controller.**" IEEE transactions on systems, man, and cybernetics—part c: applications and reviews 40, no. 6: 630-638.
- [5] Changwon Kim, Reza Langari. 2009 "**Target Tracking Control of a Mobile Robot Using a Brain Limbic System Based Control Strategy.**" In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 5059-5064. St. Louis, USA.
- [6] A. Benallegue, A. Mokhtari and L. Fridman.2007 "**High-Order Sliding-Mode Observer for a Quadrotor UAV.**" International Journal of Robust and Nonlinear Control.
- [7] Hana Boudjedir, Omar Bouhali and Nassim Rizoug. 2012 "**Neural Network Control Based on Adaptive Observer for Quadrotor Helicopter.**" International Journal of Information Technology, Control and Automation, vol.2, no. 3, pp. 39-54,.
- [8] Haitham Bou-Ammar, Holger Voos, Wolfgang Ertel. 2010 "**Controller Design for Quadrotor Uavs Using Reinforcement Learning.**" In IEEE International Conference on Control

Applications Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp. 2130-2135. Yokohama, Japan.

[9] Bara J. and A. Yesildirek(2013): **Nonlinear Composite Adaptive Control for Quadrotor**, American University of Sharjah, UAE.

[10] C. Balkenius, J. Moren. Emotional Learning: "A **Computational Model of the Amygdala**". *Cybernetics and Systems: An International Journal*, Vol. 32, (2001), pp. 611-636.

[11] Qiuxia Wu, Chih-Min Lin 2020 "**Self-organizing Brain Emotional Learning Controller Network for Intelligent Control System of Mobile Robots**" JOURNAL OF LATEX CLASS FILES, VOL. 14, NO.

[12] M. Samadi, A. Afzali-Kusha and C. Lucas, 2007 "**Power Management by Brain Emotional Learning Algorithm**", *Proceedings of 7th International Conference on ASIC*, pp. 78 – 81.

[13] S. Klecker, P. Plapper, 2019 "**BELBIC-Sliding mode control of robotic manipulators with uncertainties and switching constraints**", *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE)*.