ورقة بحثية مجلة مفتوحة الوصول

خوارزميات ذكاء السَّرب في أنظمة الطائرات دون طيَّار

أ.د. مثنى القبيلي*، رنيم حسن**، لانا الوزّه***

*(كلية الهندسة ،جامعة المنارة ، البريد الإلكتروني: mothanna.alkubeily@manara.edu.sy)

**(طالبة سنة ثانية في قسم هندسة الروبوت والنظم الذَّكيَّة، كلية الهندسة ،جامعة المنارة ، البريد الإلكتروني: Ranim.Hasan@outlook.com)

**(طالبة سنة ثانية في قسم هندسة الروبوت والنظم الذَّكيَّة، كلية الهندسة ،جامعة المنارة ، البريد الإلكتروني: lanaalwazzeh@gmail.com)

الملخص:

اعترضت العديد من الصعوبات منهجية كل من حاول إدارة الكوارث والجائحات على مر العصور سواء أكان بقصد رصدها بشكل آنيّ أو التنبؤ المستقبلي بوقوعها، لتأتي فيما بعد الطائرات دون طيار كحلٍّ مرغوبٍ للعديد من تلك المشكلات، إذ كان لتطبيقها دور فعّال لاسيّما خلال جائحة فايروس كورونا المستجد Covid-19 والّتي شكّلت تهديداً خطيراً على صحة الإنسان في جميع أنحاء العالم. تعددت أثناء ذلك الوباء وظائف أنظمة الطائرات دون طيار، فقد استُخدمت في نقل العينات المخبرية والتجهيزات الطبية، ورش الموادّ المعقِّمة في أجواء المدن الموبوءة كما وتم تطبيقها لمراقبة المارّة في حال اشتباه إصابتهم بالأعراض. انطلاقاً من الحاجّة الملحّة لاستدامة توظيف ما هو على تماس غير مباشر مع الأشياء أو الأشخاص المندرجين ضمن كارثة معينة ومن وجوب كون ما يتم توظيفه قادر على التوصّل للحل المثالي قدر الإمكان لأي مشكلة تواجهه، شَغِلَ تضمين خوارزميات ذكاء السرب في أنظمة الطائرات دون طيار اهتمام العديد من الباحثين الّذين لايزالون يضافرون الجهود للتهجين فيما بين تلك الخوارزميات بغية تحسينها وزيادة جودة أداء الطائرات المقادة وفقها. يعد دمج مثل هذه الخوارزميات بشبكات الـFANETs مفيداً لكونها تساعد بتسريع إتمام المهمة الموكلة لعدة طائرات، فهي مستمدة من طبيعة العلاقات بين أسراب وقطعان الحيوانات البرية وكيفية بلوغها الهدف المنشود بعد الأخذ بالحسبان حل كل فرد بشكل مستقل ومن ثم التوصل إلى ما هو الحل المرضي لجميع الأفراد.

كلمات مفتاحية: الطائرات دون طيار، FANET، COVID-19، ذكاء السرب.

I. مقدمة:

نتيجةً للتقدم التكنولوجي السريع في التقنيات الإلكترونية وأجهزة الاستشعار والاتصالات أصبح من الممكن إنتاج أنظمة الطائرات دون طيار Unmanned Aerial Vehicle (UAV) ، والتي يمكن أن تطير بشكل مستقل أو أن يتم تشغيلها عن بعد دون أن تحمل على متنها أي من البشر[1].

نظراً لتعدد استخدام هذه الأنظمة ومرونتها، وسهولة تركيبها ونفقات تشغيلها الصغيرة نسبياً يتم توظيفها في كل من التطبيقات العسكرية والمدنية مثل عمليات البحث، ومراقبة الحدود، وإدارة حرائق الغابات، ومراقبة الكوارث، والاستشعار عن بعد ومراقبة حركة المرور[2].

على الرغم من أنّ أنظمة الـ (UAV) الفردية كانت شائعة منذ عقود إلا أنّه قد اتضّح بأنّ استخدام مجموعة من الطائرات دون طيار متعددة صغيرة بدلاً من تطوير وتشغيل طائرة دون طيار كبيرة واحدة كان له العديد من المزايا، إذ أنّ قدرة طائرة واحدة تكون محدودة لكن بالتنسيق والتعاون بين العديد من الطائرات يمكن إنشاء نظام ذو قدرات عالية يمكن تلخيصها بالآتي[3]:

- التكلفة: تكلفة شراء وصيانة الطائرات دون طيار الصغيرة أقلّ بكثير من تكلفة طائرة دون طيار كبيرة.
- قابلية التوسّع: يتيح استخدام طائرة كبيرة واحدة مجال تغطية محدود نسبياً لكن يمكن لأنظمة الطائرات المتعددة أن تزيد من قابلية توسيع مجال التغطية.

- في حال استخدام طائرة دون طيّار كبيرة وتعطّلها فإنّ ذلك يؤدي لفشل المهمّة، لكنّ ذلك يستحيل حدوثه في نظام الطائرات المتعددة إذ يمكن لبقية الطائرات المضي قدماً في تأدية المهمّة في حال تعطّل إحداها.
- يمكن أن يتم إتمام المهام بشكل أسرع كلّما استخدمنا عدداً أكبر من الطائرات دون طيّار.

على الرغم من وجود العديد من المزايا لأنظمة الطائرات المتعددة إذا ما قورنت بأنظمة الطائرات المفردة إلا أنّها تواجه أيضاً العديد من التحديات كالاتّصال، إذ أنّه في أنظمة الطائرات دون طيّار المفردة يتم الاعتماد على قاعدة أرضية أو قمر صناعي للاتّصالات كما يمكن إنشاء اتّصال بين نظام الطائرة دون طيّار ونظام التحكّم المحمول جوّاً، في حين يظهر تصميم بنية شبكة فعالة في أنظمة الطائرات دون طيار المتعددة كمسألة حيوية يجب حلّها. ولهذا ظهر لدينا ما يعرف بـ Flying Ad hoc Networks (FANETs) والتي هي عبارة عن شبكة تربط بين مجموعة من الطائرات دون طيار ويتم التّنسيق فيما بينها باستخدام بنية اتّصال مناسبة يمكن إعدادها على عقد طيران ديناميكية للغاية من أجل إنشاء اتصال موثوق وقوي[4].

ولكن فيما بعد، وللوصول إلى الهدف المرجو من تطبيق أنظمة الطائرات دون طيار المتعددة، كأن تقوم بنقل مواد ما، أو إخماد حرائق، أو تحسس نقاط ساخنة أو حتى أن تتنبأ بوقوع فيضانات، تم توظيف خوارزميات ذكاء السرب المستمدة بشكل أساسي من طبيعة العلاقات بين قطعان وحشود الحيوانات البرية المتعاونة فيما بينها بغية إيجاد الحل الأمثل لأي مشكلة تعترض تلك الأسراب.

II. المركبات الجوية غير المأهولة – Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

يشار إليها أيضًا باسم الطائرات دون طيار وهي مركبات جوية يتم التحكم بها ولا تحمل أي طيار بشري على متنها، إذ يمكن تشغيلها بدونه وبشكل مستقل عن بعد بواسطة المعالجات الدقيقة وأجهزة الاستشعار وغيرها من المعدات [1]. تستخدم الطائرات دون طيار روابط الاتصال للاتصال بالأقمار الصناعية أو محطات التحكم الأرضية مثل الهواتف الذكية أو أجهزة الحاسوب المحمولة. في حال الرغبة بتشغيل هذه المركبات عن بعد، عندها يلزم وجود عامل بشري للتحكم بها وذلك باستخدام جهاز تحكم عن بعد، لذا يتم تشجيع استخدام الطائرات دون طيار بشدة في السيناريوهات التي يكون فيها التدخل البشري محدوداً أو خطيراً بشكل صارم. نظراً للاهتمام الكبير بالطائرات دون طيار، تم تطوير العديد من هذه الطائرات بأحجام وأشكال مختلفة لأداء مجموعة متنوعة من المهام. وتم استخدام فئات الطائرات دون طيار من أنواع single–rotor، multi–rotor، fixed–wing، وhybrid في جائحة كورونا والتطبيقات الصناعية الأخرى. ولكل طائرة مزايا وعيوب تساعد في اختيار الأنسب للتطبيق.

III. الشبكات اللاسلكية المخصصة – Wireless Ad Hoc Networks

يتم تبادل المعلومات عبر الوسائط اللاسلكية بشكل عام من خلال شبكة البنية التحتية التي تعرّف على أنّها شبكة مخصصة ad hoc network. ويكون كل جهاز في الشبكة اللاسلكية القائمة على البنية متّصلاً مباشرةً بكيان مركزي وعندما يريد هذا الجهاز الاتّصال بجهاز آخر في الشّبكة فإنّه يحتاج إلى الاتّصال عبر هذا الكيان المركزي الذي يعرف عموماً باسم نقطة الوصول access point .

أحد الأمثلة الشائعة للشبكات القائمة على البنية التحتية هي الشّبكة الخلويةcellular network ، حيث يكون أحد المتطلبات الأساسية في مثل هكذا شبكات هو أنّه يجب على كل جهاز (أو عقدة) أن يكون ضمن منطقة التّغطية للمحطة الأساسية Base Station (BS)، وفي حال تحرّكت العقدة خارج منطقة التغطية هذه فقد لا تتمكّن العقدة من الاتّصال ما لم يتم تسليم الاتّصال بين المحطّات الأساسية .

بهذا نخلص إلى أنّ الشبكات اللاسلكية قائمة على البنية التّحتية حيث تعتمد الشّبكة بأكملها على كيان مركزي فإذا تعطّل هذا الكيان تنهار الشّبكة بأكملها.

فيما بعد ظهرت الشبكات المخصصة ذات الطبيعة اللامركزية infrastructure–less networkحيث لا يوجد محطة أساسية

(BS)، لذلك تستطيع الأجهزة الاتّصال ببعضها البعض مباشرةً دون أي تدخل من الـ BS . في هذا النّوع من الشّبكات تعمل كل عقدة كجهاز إرسال واستقبال مع إمكانية نقل البيانات وإعادة توجيهها، ففي حال أرادت عقدة ما الاتصال مع عقدة وجهة ولم تكن بجوارها فإنّ العقد الوسيطية (intermediate node) تعمل كعقد ترحيل بين العقدة المصدر (source node) والعقدة الوجهة (destination node) .

أحد أبرز الأمثلة على الشبكات ذات الطّبيعة اللامركزية: شبكة الجوّال المخصصة Mobile Ad hoc Network (MANET)، شبكة المركبات المخصصة Vehicular Ad hoc Network (VANET)، شبكة الاستشعار اللاسلكية Wireless Sensor Network (WSN)، شبكة الطيران المخصصة Flying Ad hoc Network (FANET)....

A. شبكات FANET

هي أحد فروع الشّبكات التي توفر الاتصال بين الطائرات دون طيّار والمحطّات الأساسية(Base Station (BS ، حيث تكون الطائرات عبارة عن عقد مستقلّة قادرة على اتّخاذ القرارات (كتغيير السّرعة والاتّجاه على سبيل المثال)، وتعمل بطريقة موزّعة بدلاً من تلقي الأوامر والتّعليمات من الأرض بطريقة مركزية. يمكن اعتبار FANET شكلاً خاصاً من Mobile Ad hoc Network (MANET) و Vehicle Ad hoc Network (VANET)مع البعض من الاختلافات [4]:

- من الملاحظ بأنّ العقد في شبكات FANET تتنقّل بسرعة أكبر مما هي عليه في شبكات VANET و MANET. بالنّظر إلى آلية التنقّل هذه نجد بأنّ هيكل شبكة الـ FANETيتغيّر بشكل أكثر سرعةً وتكراراً من هيكل الشّبكة الخاص بـ MANET أوVANET .
- المسافات النّموذجية بين عقد FANET أطول بكثير من المسافات الموجودة بين العقد في الـ VANET والـ MANET، لذا تكون كثافة العقد في FANET أقلّ بكثير مما هي عليه في MANT وVANET.
- قد تشتمل أنظمة الطائرات دون طيار على أنواع مختلفة من أجهزة الاستشعار وقد يتطلّب كل جهاز استشعار استراتيجيات مختلفة لتسليم البيانات.

B. فوائد تطبيق الـ (FANET) – Advantages of FANETs

1) توسيع نطاق التغطية في أنظمة الطائرات دون طيار المتعددة – Extending the scalability of multi-UAV operations

إن تمّ إنشاء شبكة تؤمن الاتصال في أنظمة الطائرات دون طيار المتعددة وجعلها تعتمد على بنية تحتية معينة كقمر صناعي أو قاعدة أرضية، ستقتصر منطقة العملية آنذاك على تغطية اتصال تلك البنية وعلينا التنويه هنا إلى أنّ الطائرة دون طيار لن تتمكّن من أداء مهامها إن فقدت اتصالها مع البنية والذي قد يواجه العديد من العوائق ومن ضمنها التضاريس وجدران المباني التي من شأنها حجب إشارات البنى التحتية اللاسلكية، وهنا تأتي أهميّة شبكات الـ (FANET) التي تعتمد على إيصال البيانات بين الطائرات بدلاً من ربطها بين الطائرة والبنية الأمر الّذي يوسّع نطاق تغطية العملية ويجعل أي طائرة من النظام قادرة على البقاء ضمنه حتى وإن لم تتمكن من إنشاء اتصال مع البنية التحتية [5].

ففي حالة وقوع كارثة لا تستطيع فرق الإنقاذ الاعتماد على بنى تحتية ثابتة إذ إنّ هدفها من استخدام أنظمة الطائرات دون طيار المتعددة يتلخص بشكل أساسي في توفير معلومات سريعة ودقيقة عن المنطقة المتضررة.

2) تقليل الحمولة والتكلفة – decreasing payload and cost

إنّ مشكلة سعة الحمولة لا تتعلق بالطائرات دون طيّار الصغيرة فقط إذ يتمّ مراعاة أوزان الحمولة في أنظمة الطائرات دون طيار عالية التحمّل منخفضة الارتفاع High Altitude Low Endurance (HALE) أيضاً، فكما نعلم بأنّ الحمولة الأخفّ تعني الارتفاع الأعلى والتّحمّل الأطول.

إن تمّ اعتماد إيصال البيانات في أنظمة الطائرات المتعددة عن طريق ربطها بالبنية التحتية فإنّ ذلك سيجعل كل طائرة تحمل أجهزة اتصال ثقيلة نسبياً أمّا في حال اللجوء لـ (FANET) الذي يستخدم بضع طائرات تتصل بالبنية التحتية في حين أنّ الأخرى تتصل مع بعضها البعض وتُحمَّل بأجهزة اتّصال أخفّ في كثير من الحالات، سنجد أنّ الأمر بات يسيراً فيما يتعلق بتمديد قدرة التّحمُّل لنظام الطائرات المتعددة [6].

IV. استخدام الطائرات دون طيار في الكوارث – UAVs' Applications during Disasters

الكارثة هي خطر طبيعي أو تكنولوجي (من صنع الإنسان) ينتج عنه حدث كبير يتسبب في أضرار مادية ضخمة، أوتدمير، أوخسارة في الأرواح أو تغيير جذري في البيئة، كما ويمكن تعريف الكارثة على أنها أي حدث مأساوي ناجم عن ظواهر كالزلازل، أو الفيضانات، أو الحوادث، أو الحرائق أو الانفجارات والتي يمكن أن تلحق الضرر بالممتلكات وتدمر الحياة الاقتصادية، أو الاجتماعية أو الثقافية للناس [8–7].

هناك عدة طرق لقياس شدة الكوارث المختلفة، إذ يمكن تصنيفها اعتباراً من كونها محدودة التأثير إلى متصاعدة (ذات تأثير ضخم وزائد عن حده)، ويتم ذلك وفقاً للمنطقة المتضررة أو السكان المتأثرين، أو اعتباراً من كونها ثائرة ومندفعة بشدة إلى ذات انتشار بطيء بحلول الوقت الذي تتطور فيه، أو يمكن للتصنيف أن يجرى بعدة طرق أخرى اعتماداً على الحالة التي تؤخذ بالحسبان. كان من المنطقي بعد ملاحظة التصنيفات المختلفة للكوارث، أن يتم فصل تطبيقات الطائرات دون طيار التي تدعم إدارتها. ففي حال الرغبة بتطبيقها قبل وقوع انفجار ما، ستتجلى فائدتها بتوقع الكارثة المستقبلية والكشف المبكر لها (قد يكون ذلك بتحسسها للدخان المتصاعد)، أما في حال الحاجة لتوظيفها عند وقوع كارثة من صنع الإنسان كحادث كيميائي عند النقل غير المصرح به، فإن مراقبة الطرق بواسطة الطائرات تعد جزءاً من الوقاية، وكما وقد تستخدم دورية طائرات لمراقبة حرائق الغابات إما لتجنبها في حال وقوعها أو للكشف المبكر عنها قبل اندلاعها. وفيما يلي أبرز الكوارث التي تستخدم أنظمة الطائرات دون طيار لإدارتها.

A. انتشار المواد الخطرة والحوادث النووية – Spread of Hazardous Materials and Nuclear Accidents

يعد مدى قوة النشاط الإشعاعي، والمنطقة المتأثرة آنياً، ومدى سرعة انتشار النشاط الإشعاعي من أهم المعلومات التي يجب الإلمام بها عند وقوع حادثة نووية ما. في معظم الحالات يمكننا أن نفترض أن النشاط الإشعاعي أعلى من الحد المسموح به للإنسان. لذا فإن أي عملية على متن أي مركبة كانت ليست خطيرة فحسب، بل إنها غير مجدية للإنسان إذا كان هناك حل بديل وفعال مماثل كأن يتم استخدام الطائرات دون طيار [9].

في الحوادث التي تندرج تحت إطار المواد الخطرة، تكون المهمة الأساسية التي يتعين حلها عن طريق رحلات الطائرات دون طيار هي التحديد المبكر والدقيق لاتجاه انتشار السوائل أو المواد الغازية، أو قد تتمحور الفكرة حول إنقاذ الأرواح البشرية المحاصرة. أثناء رحلات هذه الطائرات، يمكن الحصول على صور ثلاثية الأبعاد، والتي تعرف بالمنحنيات الانسيابية rheological curves بسرعة وموضوعية في مناطق واسعة. من الواضح أن هذا قادر على دعم قرارات المتحكمين باستجابة الطائرات بشكل أفضل.

B. الزلازل – Earthquakes

الزلزال هو كارثة نموذجية تندلع دون أي سابق إنذار ولا تقتصر أضراره على الماديات فحسب وإنما قد يذهب ضحيته الكثير من الأرواح البشرية، إذ تعتمد فرصة البقاء على قيد الحياة للأشخاص المحاصرين في المباني المنهارة بشكل أساسي على أنواع الأضرار التي ألحقت بها. لذلك يعد رسم الخرائط السريع للمنطقة المتضررة أمراً مهماً للغاية ليس فقط لتقييم الأضرار ولكن أيضاً لتحسين مشاركة فرق الإنقاذ. نظراً لمحدودية المصادر في الكوارث، يمكن للطائرة الصغيرة دون طيار أن تكون حلاً جيداً لرسم الخرائط السريع

والتي تمكّن من تمييز المباني المصابة وفق المعيار الدولي[10]. بناءً على الأنقاض التي تم تصنيفها، يمكن لفرق الإنقاذ الخاصة تحسين عملها اعتماداً على معدل المناطق التي لا تزال على ما يرام والمقاسة بعد الرسم. نظراً لأن فرصة البقاء على قيد الحياة تقل بشكل كبير بمرور الوقت، يمكن أن يؤدي رسم الخرائط السريع إلى زيادة أعداد الأرواح المنقَذة.

C. الفيضانات – Floods

تعد الفيضانات نموذجاً للكارثة المتطورة ببطء، حيث يكون لدى المقر الرئيسي للسلطة أو إدارة الكوارث في كثير من الأحيان معلومات كافية للتنبؤ بحجم هذه الكارثة وخطورتها. على الرغم من كون تطور هذه الكارثة بطيء إلا أنه في كثير من الأوقات يمكن أن تتم محاصرة المواطنين. كإجراءات ما قبل الكارثة، يمكن للطائرات دون طيار التحكم في حالة السدود بتتبع مجرى الأنهار. في حالة استلام أي تصريح غير اعتيادي من قبل الطائرات، يمكن للسلطة المسؤولة الاستجابة وحل المشكلة في الوقت المناسب. في حال انفجار السد ومحاصرة المواطنين في المنطقة المجاورة له، سيكون الإخلاء أمراً لا مفر منه والذي قد يتم بواسطة الزوارق البخارية، عندها يمكن لطائرة صغيرة دون طيار في يد الإدارة المحلية أو الإقليمية أن تساعد في العثور على المواطنين المحاصرين. ونظراً لأن الفيضانات هي كارثة بطيئة التطور يمكن أن تساعد الطائرات في الإدارة بعدة طرق، كأن تراقب المنطقة المغمورة فتتنبأ بعمق المياه فيها.

D. حرائق الغابات –Forest Fires

من المؤكد أن تطبيق الطائرات دون طيار الذي يدعم إدارة حرائق الغابات هو النشاط الأكثر تطوراً وإثباتاً عملياً بين جميع الكوارث، إذ يمكن استخدامها قبل اندلاع الحريق لاكتشاف النقاط الساخنة الأمر الذي يساعد الإطفاء على الحد من الأضرار الناجمة، وأثناء اندلاع الحرائق تساعد هذه الطائرات من خلال التزويد بمعلومات آنية وبعد إخمادها لرصد حجم الكارثة[11].

V. حالات استخدام الطائرات دون طيار استجابةً لجائحة فيروس كورونا – DRONES USE CASES IN RESPONSE TO COVID-19

A. النقل – Transportation

قامت ثمانية عشر دولة بنشر طائرات دون طيار لأغراض التوصيل والنقل خلال جائحة كورونا. بعضهم قام بذلك كجزء من التجارب والاختبارات، بينما حافظ البعض الآخر على عمليات التوصيل المنتظمة بواسطة الطائرات [8]. أعلنت ثلاثة بلدان في إفريقيا جنوب الصحراء، وهي رواندا وغانا وملاوي، عن استخدام هذه الطائرات لتوصيل السلع الطبية العادية وإمدادات فيروس كورونا والعينات الطبية منذ بداية الوباء، ولأخذ العينات المخبرية، وتسليمها ونقلها بغية اختصار الوقت المصروف في النقل وتقليل التعرض للعدوى. قدمت الطائرات دون طيار في سياق جائحة هذا الفيروس العديد من الفوائد المتجلية بسرعة التسليم، وشبكة النقل الممتدة حتى الميل الأخير، وتقليل مخاطر النقل أثناء التسليم.

B. الرش الجوي – Aerial spraying

كانت هناك عدة تقارير إعلامية عن استخدام الطائرات دون طيار للرش الجوي للمطهرات في الأماكن العامة في الهواء الطلق للحد من انتشار الفيروس إذ جرت محاولات في الصين، والإمارات، واسبانيا وغيرها من الدول الأخرى لتوظيف الطائرات دون طيار ضمن نطاق هذا الاستخدام، كما وتدعي بعض الشركات أنها تمكنت من تغطية 3 كيلومترات مربعة من منطقة ما بواسطة الرش الجوي. ومع ذلك، تشير الدلائل العلمية إلى أن هذا التطبيق ليس لديه القدر الكافي من الأدلة على الكفاءة والفعالية.

C. مراقبة الفضاء العام – Public Space Monitoring

قامت عدد من وكالات أو منظمات السلامة العامة في جميع أنحاء العالم بنشر الطائرات دون طيار لمراقبة الأماكن العامة، وفرض الحجر الصحي بإرسال رسائل عبر مكبر صوت وتتبع المواطنين

غير الملتزمين. وقد خفضت مراقبة الفيديو وبث الرسائل الصوتية بواسطة الطائرات دون طيار من احتمالية اتصال المستجيبين (الملتزمين بإنذارات وتحذيرات الرسائل الصوتية) مباشرة بأشخاص يحتمل إصابتهم. إضافة إلى ذلك، بدأت بعض المجموعات الأكاديمية في تجربة الطائرات لإجراء تتبع للأعراض من خلال الصور الحرارية والذكاء الاصطناعي. على الرغم من كون استخدام الطائرات في مراقبة العامة هو الأكثر انتشاراً خلال جائحة كورونا، إلا أن عددًا من نشطاء حقوق الإنسان ينتقدون هذا الاستخدام بسبب الانتهاك المحتمل للحقوق المدنية، وقد تم تعليق بعض من هذه البرامج [12].

VI. الخوارزميات الجينية – GENETIC ALGORITHMS (GAS)

الخوارزميات الجينية (GAs) هي خوارزميات بحث تكيفية تنتمي إلى الجزء الأكبر من الخوارزميات التطورية، تعتمد على أفكار الانتقاء الطبيعي وعلم الوراثة، يتم استخدامها بشكل شائع لإنشاء حلول عالية الجودة لمشاكل التحسين ومشكلات البحث.

تحاكي الخوارزميات الجينية عملية الانتقاء الطبيعي مما يعني أن تلك الأنواع التي يمكنها التكيف مع التغيرات في بيئتها قادرة على البقاء والتكاثر والانتقال إلى الجيل التالي. بكلمات بسيطة، تعتمد هذه الخوارزميات مبدأ "البقاء للأصلح" من بين أفراد الأجيال المتتالية بغية التوصل لحل مشكلة ما، يتكون كل جيل من مجموعة من الأفراد ويمثل كل فرد نقطة في فضاء البحث والحل الممكن، يتم تمثيل كل فرد كسلسلة من الأحرف / عدد صحيح / عدد عشري / بت، وهذه السلسلة مماثلة للكروموسوم.

A. أسس الخوارزميات الجينية – Foundation of Genetic Algorithms

تعتمد الخوارزميات الجينية على التشابه مع التركيب الجيني وسلوك الكروموسومات للسكان، فيما يلي أسس GAs المعتمد على التشابه:

1. يتنافس الفرد ضمن السكان على الموارد ويتزاوج.
2. الأفراد الناجحون (الأصلح) يتزاوجون بعد ذلك لينتجوا ذرية أكثر من غيرهم (الأفراد الخاسرين في المنافسة على الموارد).
3. تنتشر الجينات من الوالد "الأصلح" عبر الجيل، أي أن الآباء في بعض الأحيان يخلقون ذرية أفضل من أي من الوالدين.
4. لذا فإن كل جيل متعاقب هو أكثر ملاءمة وتكيفاً مع البيئة المحيطة.

B. فضاء البحث – Search space

يتم الحفاظ على تعداد الأفراد داخل فضاء البحث، ويمثل كل فرد حلاً في فضاء البحث لمشكلة معينة، يتم ترميز كل فرد على أنه شعاع ذو طول مكونات محدود (مشابه للكروموسوم)، هذه المكونات المتغيرة مماثلة للجينات، وهكذا فإن الكروموسوم (فرد) يتكون من عدة جينات (مكونات متغيرة).

C. درجة اللياقة – Fitness Score

يتم منح درجة لياقة لكل فرد مما يدل على قدرة الفرد على "المنافسة"، يتم البحث عن الفرد الحاصل على درجة مثالية (أو قريبة من المستوى الأمثل).

تحافظ GAs على عدد n من الأفراد (كروموسوم/حلول) جنباً إلى جنب مع درجات اللياقة الخاصة بهم، ويتم منح الأفراد الحاصلين على هذه الدرجات أفضل فرصة للتكاثر أكثر من غيرهم فيتم انتقاؤهم ويتزاوجون وينتجون ذرية أفضل من خلال الجمع بين كروموسومات الوالدين. حجم السكان ثابت لذا يموت بعض الأفراد ويتم استبدالهم بالوافدين الجدد (أفراد الأجيال الجديدة) في النهاية مما يخلق جيلاً جديداً عند استنفاذ كل فرص التزاوج لدى السكان القدامى، من المأمول أن تصل الحلول الأفضل على مدى الأجيال المتعاقبة بينما يموت أصحاب درجات اللياقة الأقل.

لكل جيل جديد وسطياً "جينات أفضل" أكثر من (الحل) الفرد من الأجيال السابقة، لذا فإن كل جيل جديد لديه "حلول جزئية" أفضل

من الأجيال السابقة، بمجرد أن يُنتَج نسل لا يختلف بنسب كبيرة عن النسل الذي أنتجته المجموعات السابقة، يتم تقارب السكان، يقال أن الخوارزمية تتقارب لمجموعة من حلول المشكلة.

D. عوامل تطور الجيل في الخوارزميات الجينية – Operators of Genetic Algorithms

بمجرد إنشاء الجيل الأولي، تطور الخوارزمية الجيل باستخدام العوامل الآتية[13] :

- عامل الاختيار Selection Operator: الفكرة هي إعطاء الأفضلية للأفراد الحاصلين على درجات لياقة جيدة والسماح لهم بنقل جيناتهم إلى الأجيال المتعاقبة.
- عامل العبور Crossover Operator: يمثل التزاوج بين الأفراد. حيث يتم اصطفاء شخصين باستخدام عامل الاختيار وتنتقى مواقع العبور بشكل عشوائي. ثم يتم تبادل الجينات في هذه المواقع التي تم فيها العبور وبالتالي إنشاء فرد جديد تمامًا (ذرية).
- عامل الطفرة Mutation Operator: الفكرة الأساسية هي إدخال جينات عشوائية في النسل للحفاظ على التنوع في السكان بهدف تجنب التقارب المبكر.

1. Randomly initialize populations p
2. Determine fitness of population
3. Until convergence repeat:
   a) Select parents from population
   b) Crossover and generate new population
   c) Perform mutation on new population
   d) Calculate fitness for new population

Algorithm1 : pseudocode representation of the Genetic Algorithm

VII. ذكاء السرب – SWARM INTELLIGENCE (SI)

هو المجال الذي يتعامل مع الأنظمة الطبيعية والاصطناعية المكونة من العديد من الأفراد الذين ينسقون باستخدام التحكم اللامركزي decentralized control والتنظيم الذاتي self-organization [14]. يركز هذا المجال بشكل خاص على السلوكيات الجماعية الناتجة عن التفاعلات المحلية للأفراد مع بعضهم البعض ومع بيئتهم. ومن الأمثلة على الأنظمة التي درسها ذكاء الأسراب مستعمرات النمل والنمل الأبيض، وأسراب الأسماك، وأسراب الطيور، وقطعان الحيوانات البرية. تندرج بعض المنظومات المصممة من قبل البشر أيضًا في مجال ذكاء السرب، ولا سيما بعض أنظمة الروبوتات المتعددة، وكذلك بعض برامج الحاسوب التي تمت كتابتها لمعالجة مشاكل التحسين وتحليل البيانات.

تم تقديم ذكاء السرب بواسطة Gerardo Beni و Jing Wang في عام 1989. تعني S.I ببساطة استخدام المعرفة بالأشياء الجماعية (الأشخاص والحشرات وما إلى ذلك) معًا ثم الوصول إلى الحل الأمثل لمشكلة معينة. تعني كلمة "سرب" مجموعة من الأشياء (أشخاص ، حشرات ، إلخ). بمعنى آخر وبفرض تم إعطاء فرد ما مشكلة معينة وطلب إليه بعد ذلك تقديم أفضل حل يملكه لهذه المشكلة، بهذه الحالة سيتم النظر في حل هذا الشخص بعينه فقط، الأمر الذي يخلق مشكلة تتجلى في أن الحل الذي قدمه قد لا يكون هو الحل الأفضل من المنظور العام أو ربما قد لا يكون جيدًا للآخرين. لتجنب ذلك، يمكن إعطاء هذه المشكلة لعدد معين من الأشخاص معًا (سرب) والذين يطلب منهم الوصول إلى أفضل حل ممكن لهذه المشكلة، ومن ثم يتم حساب جميع مقترحات الحلول معاً للتوصل إلى الحل الأمثل، في هذه الحالة، تستخدم معرفة المجموعة ككل للوصول إلى حل أمثل لهذه المشكلة والذي سيكون بدوره جيدًا لكل منهم على حدى أيضًا، لذا فهذه هي الفكرة وراء ذكاء السرب.

في ذكاء السرب، يكون كل فرد (كائن) في المجموعة مستقلاً عن الآخرين، وهو مسؤول عن مساهمته في حل هذه المشكلة بغض النظر عما يفعله الآخرون.

A. الظواهر الطبيعية التي تستند إليها فكرة ذكاء السرب – Natural Phenomena of Swarm Intelligence

1. مستعمرة النمل - Ant Colony :

يتبع النمل مبدأ ذكاء السرب، على سبيل المثال، لبناء المنزل يقوم النمل بجمع جزيئات الطين من البيئة المحيطة بكون كل فرد على حدى مسؤولاً عن بنائه. يتم التواصل بين الأفراد من خلال الإشارات والفيرومونات (يستخدم النمل هذا لتتبع النمل الآخر) وبغض النظر عما يفعله النمل الآخر، فإن النملة الفردية مسؤولة فقط عن مساهمتها الخاصة في بناء المنزل. وبالمثل، عندما يبحثون عن الطعام، في البداية يبحثون بشكل فردي عن الطعام مخلفين الفيرومونات وراءهم، وبمجرد إيجادهم لمصدر الغذاء، تتواصل النملة التي تجد الطعام مع النمل الآخر الذي يتتبع حينها مسار فيرمونات تلك النملة بغية الوصول إلى مصدر الغذاء.

2. سرب النحل - Swarm of Bees :

يستخدم النحل أيضاً نفس المبدأ لبقائهم على قيد الحياة إذ عندما يبحثون عن مكان يمكنهم فيه بناء خليتهم، فإن كل نحلة تراعي العديد من البارامترات التي يجب أن تشملها الخلية المراد بناؤها كأن تكون على ارتفاع جيد لتجنب الحيوانات المفترسة، بالقرب من الموارد المائية، بالقرب من الزهور لجمع الرحيق، وما إلى ذلك، ثم يستخدمون أبحاثهم الجماعية، وفي النهاية يتم تحديد المكان الذي سيتم فيه بناء الخلية مع الأخذ بالحسبان جميع هذه المعايير للتوصل إلى أفضل حل لهذه المشكلة.

3. ذكاء السرب الاصطناعي Artificial Swarm Intelligence (ASI) - :

يعرف أيضاً باسمHuman Swarm . تتمحور الفكرة هنا أيضاً في جعل بعض الأشخاص عشوائياً يشاركون في نظام الزمن الحقيقي ومن ثم تكليفهم بشكل فردي لإيجاد حل لمشكلة محددة، ليتم في نهاية المطاف حساب الحل الأمثل بعد أخذ الردود من كل مشارك والذي يعتبر أفضل بكثير من أي حل مقدم من كل فرد على حدى.

B. تطبيقات ذكاء السرب – SI's Applications

1) الخدمات العسكرية.

- استخدام ذكاء السرب لرسم خرائط الكواكب من قبل ناسا.
- التنقيب عن البيانات.
- قدم M. Anthony Lewis و George A. Bekey فكرة أنه بمساعدة ذكاء السرب يمكن التحكم في الروبوتات النانوية في الجسم لقتل الأورام السرطانية.
- تستخدم في الأعمال للوصول إلى قرارات مالية أفضل وما إلى ذلك [15] .

VIII. أبرز خوارزميات ذكاء السرب القابلة للتطبيق في أنظمة الطائرات دون طيار SI'S ALGORITHMS IN UAV'S

A. تحسين سرب الجُسَيمات – Particle Swarm Optimization (PSO)

تعدّ PSO تقنية تحسين معروفة بسبب سهولة تنفيذها في دراسة المشاكل غير الخاضعة للإشراف، إذ أنها تقنية موثوقة تم استخدامها لحلّ العديد من مسائل الأمثليات، وتقوم على نموذج فيزيائي يتم فيه بناء علاقات التحويل الخاصة به عن طريق محاكاة السلوك الجماعي الاجتماعي الذي لوحظ عند أسراب الطيور والأسماك، في هذه الخوارزمية تتم تهيئة سرب من الجسيمات والتي تجتاز فضاء البحث لإيجاد الحل العام الأفضل global best، إذ يمثّل كل جسيم حلّاً مُحتَمَلاً، بفرض أن $X_i(t)$ تمثل موقع الجسيم i عند اللحظة t ، عندئذ يجب أن تُنظَّم سرعته بناءً على الموقع الحالي الذي يكون أقل من الموقع العام الأفضل [16] .

تُضبط معاملات التسارع بما يضمن استقرار وفعالية نظام السرب؛ بينما يتم تحديث موقع وسرعة الجسيم من أجل اللحظة $t+1$ وفق ما يلي:

$$V_{ij}^{t+1} = wV_{ij}^{t} + c_1 r_1^t \left(pbest_{ij} - X_{ij}^{t}\right)$$

$$+c_2 r_2^t\left(gbest_j - X_{ij}^t\right)$$
$$X_{ij}^{t+1} = X_{ij}^t + V_{ij}^{t+1}$$

حيث:

c_1 و c_2 هي عوامل تدريج scaling factors.

w قيمة الوزن بالقصور الذاتي inertial weight وتستخدم للتحكم بسرعة السرب.

$pbest_{ij}$ القيمة الأفضل محلياً ضمن الجيل الحالي لكل طائرة على حدى.

$gbest_j$ القيمة العامة الأفضل مقارنة بجميع القيم المحلية الأفضل على مستوى السرب.

r_1^t و r_2^t هي قيم لأعدادٍ متولّدة عشوائيّاً ضمن المجال $[0,1]$ من أجل كل لحظة زمنية t.

1. Initialize particles population in hyperspace
2. While termination criteria not met do
3. Evaluate fitness of individual particles
4. Modify velocities based on previous best and global best
5. End–While

Algorithm 2: a pseudocode representation of the Particle Swarm Optimization (PSO)

أثناء بحث الجسيمات عن الهدف باستخدامPSO، من الممكن أن تبقى عالقة في البحث على المستوى المحلي، مما قد يؤدي إلى تقارب أقل في فضاء البحث، بسبب بعض نقاط القصور الرئيسية في خوارزمية PSO الأصلية مثل الركود stagnation وتقارب التحسين المحلي local optima convergence، تم إجراء العديد من الدراسات للتغلب على هذه العيوب، حيث اقترح العديد من الباحثين استراتيجيات حسابية PSO معدلة أو PSO هجينة لتحسين أداء خوارزمية PSO الأصلية [17] .

B. خوارزمية نحل العسل – Honey Bee Algorithm (HBA)

لقد تحول سلوك النحل المُتَّبع لإيجاد غذائه وتبادل المعلومات ما بين أفراده إلى أحد أهم مجالات تطبيقات ذكاء السرب، ففي خلية النحل الطبيعية يتشارك النحل بمهامه وينجزها دون وجود قاعدة مركزية، والذي يشبه إلى حد ما شبكات Ad Hoc، يُقسَم ذكاء السرب إلى جانبين رئيسين؛ هما تبادل المعلومات والتنظيم الذاتي.

يأخذ النحل (أي الطائرات دون طيار في هذا البحث) حجم Contention window (CW) للحصول على المردود throughput الأمثل، خوارزمية HBA هي أحدث خوارزمية تم اقتراحها اعتماداً على نمذجة السلوك (حجمCW) للنحل، وبالتالي لإيجاد حجم CW مع المردود الأعلى، تعمل HBA على الحصول على النتيجة بحدها الأقصى أو الأدنى ضمن المجموعة[18].

1. Initiate CW size
2. A CW size is defined
3. Compute throughput
4. IF all drones are distributed
5. Take CW size in memory
6. Define the CW size to be published
7. Generate new CW size in place of published CW
8. Discard
9. Else IF
10. Identify the CW size by the drone
11. Go step 3
12. End Else IF
13. End IF
14. Discard

Algorithm 3: a pseudocode representation of the Honey Bee Algorithm (HBA)

حسب خوارزمية HBA ، يتم حساب قيمة CW الابتدائية ضمن فضاء البحث وفق العلاقة:

$$CW_{i,j} = b_j^l + (b_j^u - b_j^l).rand(0,1)$$

حيث:

j هو حجم المسألة المدروسة

b_j^l و b_j^u هي الحدود العليا والدنيا للبعد j من أجل العنصر i ضمن شبكة الـ ad hoc

يتم الاحتفاظ بحجم CW السابق في الذاكرة، وإذا تم العثور على حجم CW أفضل، فسيتم استبدال الحجم السابق بـ CW الأفضل، إذا كان أي حجم CW سابق أفضل من أفضل حجم CWحالي، فسيتم حفظه في الذاكرة، ويتم تبادل المعلومات فيFANETs، وتتم هذه الإجرائية بشكل عشوائي.

تتمّ تهيئة كل طائرة بقيمة CW ابتدائية وفق العلاقة السابقة، ومن ثمّ تقارن كل منها قيمة المردود الموافقة لـ CWالحالية مع قيم المردود الموافقة لـ CWالخاصة بالطائرات الواقعة ضمن مجال تغطيتها، أي أن المردود هو معيار اللياقة في هذه الخوارزميّة.

C. خوارزمية التطور التفاضلي – Differential Evolution Algorithm (DEA)

خوارزمية التطور التفاضلي هي خوارزمية قائمة على تعداد الأفراد population–based، كما يمكن اعتبارها مشابهةً للخوارزميات الجينية Genetic Algorithms (GA) إذ أنها مبنيَّةٌ على عمليات مماثلة، كالعبور crossover، والطفرة mutation، والتحديد (الاختيار) selection. الاختلاف الرئيسي بين DE وGA هو في كيفية بناء حلولٍ أفضل، حيث تعتمد DE على عملية حدوث الطفرة mutation بينما تعتمد GA على عملية العبور crossover . تم تقديم هذه الخوارزمية من قبل Storn وPrice في عام 1997 [19] .

بما أن هذه الخوارزمية تعتمد بشكلٍ أساسيّ على عملية الطفرة، تُستخدم هذه العملية كآلية بحث في حين يُستفاد من عملية الاختيار من أجل توجيه البحث نحو المناطق المحتملة في فضاء البحث.

تستخدم خوارزمية DE ثلاثة خصائص لتوليد عدد جديد من الأفراد بشكل متكرر:

- الشعاع الهدف Target Vector : هو شعاع حلّ من ضمن فضاء البحث.
- الشعاع الطفرة Mutant Vector : هو الشعاع الناجم عن حدوث طفرة في الشعاع الهدف، وهو يمثل شعاع حل ممكن آخر.
- الشعاع التجريبي Trail Vector: هو شعاع الحل الجديد الناتج عن عملية العبور بين الشعاع الهدف والشعاع الطفرة . [20]

يبدأ DE بتهيئة مجموعة أفراد (كل فرد يُمثّل شعاع حل)، يليها حساب قيم fitness لدى كل منها وفق المعيار المعطى، تطرأ الطفرة على كل شعاع مكون من N بارامتر، حيث أن الطفرة هي عمليّة توسيع لفضاء البحث يتم فيها توليد أشعّة وسيطة عن طريق تثقيل فرق شعاعي حل (من ضمن المجموعة أي فضاء البحث) ومن ثم إضافته لشعاع ثالث، ويتولّد عنها شعاع طفرة يُعطى بالعلاقة:

$$v_{i,G+1} = x_{r_1,G} + F(x_{r_2,G} - x_{r_3,G})$$

حيث:

Fهو عامل تدريج scaling factor تتراوح قيمته ما بين $[0,1]$

$x_{r_1,G}$, $x_{r_2,G}$, $x_{r_3,G}$ أشعة هدف (تنتمي لفضاء البحث) والتي يتم اختيارها عشوائياً بحيث تحقق

$$x_{r_1,G}\ ,\ x_{r_2,G}\ ,x_{r_3,G} \mid r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$$

علماً أنَّ i هو فهرس الحلّ الحالي.

يُلجأ إلى عملية Crossover لزيادة تنوع الأشعة الوسيطة، إذ ينتج الشعاع التجريبي عن دمج الشعاع الأب والشعاع الطفرة وفق العلاقة:

$$u_{i\ ,G+1} = \begin{cases} v_{i,G+1}\ , R_j \leq CR \\ x_{i,G}\ , R_j > CR \end{cases}$$

حيث:

CR هو ثابت العبور.

R_j هو عدد حقيقي عشوائي تتراوح قيمته بين $[0,1]$ لكل مركبة j ضمن المصفوفة الناتجة.

في DE ، يكون لجميع الحلول (الأفراد) في المجموعة نفس الاحتمال في أن يتم اختيارها كشعاع أب بغض النظر عن قيمة fitness الخاصة بكل منها. هذا هو الفرق الرئيسي في عمليات DE و GA. ببساطة ، يتم حساب قيمة fitness للشعاع التجريبي (الشعاع الابن) الذي تم إنتاجه بعد عمليات الطفرة والعبور، ومن ثم مقارنة أداء هذا الشعاع مع الشعاع الأب (أي مقارنة قيم fitness لكل منهما) ويتم الاحتفاظ بالشعاع الأفضل في مجموعة الحلول.

تعد هذه الخوارزمية مفيدة من حيث تعزيز قدرة البحث المحلي والحفاظ على تنوع الحلول في حين أنها تعاني من التقارب البطيء وعدم الاستقرار [21] .

1. Initiate CW size
2. Get awareness of two arbitrarily chosen CW size values from ad hoc networks
3. Gather the difference vector as third CW size
4. Compare target vector with the total vector
5. IF new value of CW size is better than the target vector
6. Then replace it
7. End If
8. Discard

Algorithm 4: a pseudocode representation of the Differential Evolution Algorithm (DEA) [22]

IX. الخاتمة:

تقدّم الطائرات دون طيار حلولاً مُسعِفة في العديد من المجالات وقد أثبتت دورها البالغ الأهميّة في أثناء وقوع الكوارث والجائحات ولاسيما خلال جائحة COVID-19 من خلال توظيفها في نقل العينات المخبريّة والمعدّات الطبية إضافة إلى مراقبة المارّة والرش الجوي للموادّ المعقّمة في المناطق التي تفشّى فيها الوباء. تتعلق أي مشكلة تحسين معيّنة عموماً بتحديد أفضل حلٍّ ممكنٍ يجعل التابع يبلغ أعظم أو أدنى قيمة والذي يخضع لمجموعة من القيود، لذلك يمكن أن تقدم الخوارزميات القائمة على ذكاء السرب حلاً مقبولاً وموثوقاً لمشاكل الجدولة والتحسين، إذ تضمن تنوّع الحلول من خلال ارتباطها بمجموعة من المُعامِلات العَشوائية التي تحكم معظم علاقاتها، وقد يخدم ذلك تسريع بلوغ الحالة المُثلى في معظمها إلّا أنها قد تبقى عالقة عند مجموعة محلية معينة من فضاء الحلول أثناء ذلك. إضافة إلى احتماليّة وقوعها في حالة من الركود مما يستنزف طاقة العقد (الطائرات دون طيار في البحث المدروس)، ولكن لا تزال هذه الخوارزميات محطّ اهتمام العديد من الباحثين لإجراء المزيد من التحسينات عليها والتهجين فيما بينها بغية توظيف نقاط قوّتها في توجيه سرب الطائرات دون طيار ضمن شبكات FANETs.

المراجع:

[1]. Mohsan, S.A.H, et al. Comprehensive Review of Micro UAV Charging ˙Techniques. Micromachines. 2022, Vol. 13.

[2]. Butt, U.J., et al. The deployment of autonomous drones during the COVID-19 pandemic. In Cybersecurity, Privacy and Freedom Protection in the Connected World; Springer: Cham, Switzerland,. 2021.

[3]. Khan, Muhammad Fahad, et al.] https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6983172/. 2020, 20.

[4]. Bekmezci, Ilker and Sahingoz, Ozgur Koray. S_amil TemelFlying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey. 2013.

[5]. Blyenburgh, P. The Global Perspective. UAS Yearbook. 2009/2010.

[6]. Molnar, A. UAV alkalmazások fejlesztése az Óbudai Egyetemen (Development of UAV Applications at Óbuda university. AROP Project Conference. 2018.

[7]. Schweier, C and Markus, M. Classification of Collapsed Buildings for Fast Damage and Loss Assessment. Bulletin of Earthquake Engineering. 2006.
[8]. Restas , A. UAS Applications: From Aerial Patrol to Prescribed Fires. The 5th International Wildland Fire Conference, Sun City, South Africa. 2011.
[9]. https://www.unicef.org/supply/reports/unmanned-aircraft-systems-product-profiles-and-guidance. [Online] 2020.
[10]. https://www.geeksforgeeks.org/genetic-algorithms/. [Online] 9 29, 2022.
[11]. Dorigo, Marco and Birattari , Mauro. http://www.scholarpedia.org/article/Swarm_intelligence. [Online] 2007.
[12]. https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-swarm-intelligence. [Online] 5 15, 2021.
[13]. Sengupta , S, Basak, S and Peters , R. Particle Swarm Optimization: a survey of historical and recent developments with hybridization perspectives. 2018.
[14]. Manasrah , A and Ali, H. Workflow scheduling using hybrid GA-PSO algorithm in cloud computing. Wireless Communications and Mobile Computing. 2018.
[15]. Karaboga, D. A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence, Artificial Intelligence Review. 2009, p. 61−85.
[16]. Price and Storn. Differential Evolution—A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. Journal of Global Optimization. 1997, pp. 341–359.
[17]. Wu , Y, Lee , W and Chien, C. Modified the Performance of Differential Evolution Algorithm with Dual Evolution Strategy. . International Conference on Machine Learning and Computing. 2011, pp. 57-63.
[18]. Dragoi, E, Curteanu , S and Vlad , D. Differential evolution applications in electromagnetics. Engineering, International Conference and Exposition on Electrical and Power. 2012, pp. 636–640.
[19]. Reina, DG, et al. A survey on the application of evolutionary algorithms for mobile multihop ad hoc network optimization problems. Int J Distrib Sens Net. 2016, pp. 1-13.