تطبيق منهجية التفكير المبني على المخاطر لتحسين الوثوقية والسلامة لطائرة مسيرة صغيرة

م. زهير صقر *، د. عبيدة السهلي **، م. مها بدر***

(الإيداع: 20 تشرين الثاني 2023، القبول: 17 آب 2024)

الملخص:

تتعرض الطائرات المسيرة الصغيرة إلى مخاطر عديدة تؤثر على الوثوقية والسلامة نتيجة لحدوث مشكلات تقنية لواحد أو أكثر من مكوناتها، مما يؤدي إلى فشل الطائرة بتنفيذ مهمتها أو فقدانها أو سقوطها بمناطق مأهولة.

تهدف الدراسة إلى تقييم مخاطر تعطل مكونات طائرة مسيرة صغيرة على الوثوقية والسلامة، اعتمادًا على منهج التفكير المبني على المخاطر وفق نظام إدارة الجودة بالمواصفة العالمية **AS9100D** لمؤسسات قطاع الطيران والفضاء والدفاع. وتحديد أنماط التعطل عالية الخطورة التي يمكن أن تؤدي إلى حوادث كارثية باستخدام منهج تحليل نمط التعطل وتأثيراتها FMEA، وترتيبها وفق رقم أولوية المخاطر RPN. ووضع إجراءات لتخفيف المخاطر الناجمة عن تعطل النظم الجزئية لمكونات الطائرة باستخدام مكونات رديفة لتلك النظم.

الكلمات المفتاحية : الطائرات المسيرة الصغيرة، نظام إدارة الجودة AS9100D، التفكير المبني على المخاطر، الوثوقية، السلامة، تحليل أنماط التعطل وتأثيراتها.

*مهندس طيران في المعهد العالي للعلوم التتطبيقية والتكنولوجيا، وطالب ماجستير في الجودة في الجامعة الافتراضية

** باحث ومدرس في وثوقية وهندسة النظم في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

*** مهندسة نظم تحكم في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، طالبة دكتوراه في وثوقية النظم المسيرة في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا.

Applying Risk-Based Thinking Methodology To Improve Reliability And Safety Of Small UAV

Eng. Zohair Saqr* Dr. Obaida Al-Sahli ** MEng. Maha Badr***

(Received: 20 November 2023, Accepted: 17 Augast 2024))

Abstract:

Small unmanned aerial vehicles (UAVs) face various hazards that impact their reliability and safety. These risks arise from technical issues that may arise in one or multiple components, resulting in the failure of the UAV to fulfill its intended purpose, becoming lost, or potentially crashing in densely populated regions.

The objective of the study is to assess the impact of component failures on the reliability and safety of small drones, utilizing a risk-based approach aligned with the quality management system specified in the AS9100D international standard for aviation, space, and defense sector institutions. The study will employ the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) approach to identify high-risk failure patterns that could potentially result in catastrophic accidents. These failure patterns will be prioritized based on their Risk Priority Numbers (RPNs). Additionally, the study aims to develop procedures to mitigate risks arising from the failure of partial systems in aircraft components by utilizing auxiliary components for those systems.

key words: Unmanned Aerial Vehicles UAV, AS9100D quality management system, Risk-Based Thinking, reliability, safety, Failure Mode Effects Analysis FMEA, Risk Priority Number RPN.

*A flight engineer at the Higher Institute of Applied Sciences and Technology, and a master's student in quality at the Syrian Virtual University.

** Researcher and teacher in systems reliability and engineering at the Higher Institute of Applied Sciences and Technology.

*** Control systems engineer at the Higher Institute of Applied Sciences and Technology, PhD student in the reliability of automated systems at the Higher Institute of Applied Sciences and Technology.

1- مقدمة

الطائرة المسيرة Unmanned Aerial Vehicle (UAV) هي طائرة توجه عن بعد من محطة أرضية أو من خلال مسار مبرمج، وقد تتطلب التوسع في التطبيقات المدنية والعسكرية للطائرات المسيرة استخدام تقانات متطورة ومعقدة لمكوناتها، وأثبتت فعالية وكفاءة عالية في الاستخدام.

بالرغم من كل هذا التطور على صعيد استخدام الطائرات المسيرة، إلا أنها تتعرض إلى مخاطر عديدة أهمها مواجهة مشكلات تقنية وفنية لواحد أو أكثر من مكوناتها مما يؤدي إلى فشل الطائرة بمهمتها وتعرضها للحوادث. كما أن زيادة فترة الطيران للطائرات المسيرة يتناسب مع زيادة احتمال فشل واحد أو أكثر من الوظائف الأساسية، أو تعطل أحد مكوناتها وبالتالي فشل مهمة الطائرة، أو فقدانها، أو سقوطها. والذي من الممكن أن يسبب خسائر مادية كبيرة وعواقب كارثية قد تؤثر على السلامة، وخصوصاً في حال سقوطها فوق مناطق مأهولة.

تصنف الطائرات المسيرة وفقاً لأحجامها وفترات الطيران فمنها الكبير والمتوسط والصغير. ففي الطائرات المسيرة المتوسطة والكبيرة استخدمت نظم رديفة (احتياطية) ثنائية أو ثلاثية للمكونات الأكثر حراجة لزيادة الوثوقية والسلامة. أما بالنسبة للطائرات المسيرة الصغيرة Small UAV (SUAV) ذات الجناح الثابت بوزن إقلاع أعظمي دون 30 كغ وفترات طيران حتى 10 ساعات، فإن مشكلة الوزن والحجم تشكل عائقًا لإضافة أنظمة رديفة.

من ناحية أخرى، منهج التفكير المبني على المخاطر Risk-Based Thinking لنظام إدارة الجودة بالمواصفة العالمية **AS9100D** لمؤسسات قطاع الطيران والفضاء والدفاع **(AS9100D:2016)**، الذي يركز في إدارة الجودة بالمؤسسة على وثوقية وسلامة المنتجات، بما فيها عمليات مرحلة التصميم والتطوير من البند–8 "التشغيل". فهو استراتيجية أثبتت فعاليتها بكيفية إدارة مخاطر المؤسسة وتصميم وإنتاج منتجات، وتجنب فشل وتعطل المكونات وزيادة الوثوقية وعوامل السلامة.

من أهم مخاطر الطائرات المسيرة تعطل واحد أو أكثر من مكوناتها، ويمكن أن يؤدي التعطل إلى عواقب كارثية. لتحديد مخاطر تعطل مكونات الطائرة الأكثر حراجة على الوثوقية والسلامة في الطائرات المسيرة، يلزم تحليل وثوقيتها ومخاطر تعطل مكوناتها باستخدام أدوات تحليل مثل منهج تحليل نمط التعطل وتأثيراته Failure Mode Effects Analysis (FMEA)، الذي يستند على حساب رقم أولوية المخاطر Risk Priority Number (RPN) لكل نمط تعطل، حيث يتم ترتيب حراجة أنماط التعطل وفقاً لرقم أولوية المخاطر RPN لاتخاذ إجراءات استباقية بناءً على منهج التفكير المبني على المخاطر لتقليل احتمال حدوث الأعطال وتجنب المخاطر.

2- المشكلة والأهداف:

تتركز المشكلة الرئيسة بالسؤال التالي: هل يمكن اعتماد منهج التفكير المبني على المخاطر لتصميم طائرة مسيرة صغيرة SUAV ولتحديد وتقييم مخاطر تعطل مكوناتها وتأثيرها على وثوقية وسلامة استثمار الطائرة، وإمكانية وضع حلول مناسبة لتجنب أنماط التعطل الحرجة التي تؤدي إلى حوادث كارثية.

تهدف الدراسة إلى تصميم طائرة مسيرة صغيرة SUAV موثوقة، اعتمادًا على منهج التفكير المبني على المخاطر وفقًا لنظام إدارة الجودة بالمواصفة العالمية **AS9100D** لمؤسسات قطاع الطيران والفضاء والدفاع، من خلال:

- تحديد أنماط تعطل مكونات الطائرة وتأثيرها على وثوقية وسلامة الطائرة.
- تحليل مخاطر التعطل للمكونات وتقييمها وتصنيفها وترتيبها تبعاً لتأثيراتها.
- وضع حلول مناسبة لتجنب التعطل لأنماط التعطل ذات المخاطر العالية جدًا، لتحسين الوثوقية والسلامة مع الأخذ بعين الاعتبار مسألة الوزن والحجم للطائرة المسيرة الصغيرة SUAV.

3- الدراسات المرجعية

لتطبيق منهج التفكير المبني على المخاطر يلزم فهم عميق لمكونات الطائرة المسيرة ووثوقيتها، نذكر من الدراسات التي تمت مراجعتها دراسات تناولت تقييم الوثوقية أو تحليل الأعطال والتعطل وتقييم المخاطر والسلامة للطائرات المسيرة.

تسلط دراسة (Stockwell, Schulman, 2016) الضوء على العديد من العوامل التي تساهم في خفض مستوى مخاطر عمليات الطائرات المسيرة. تشمل هذه العوامل خصائص أداء الطائرات المسيرة، مثل استقرار الطيران والوثوقية والتكرار، بالإضافة إلى قدرات نظام التحكم وتكنولوجيا الملاحة. علاوة على ذلك، يؤكد المؤلفون على أهمية المعرفة للمشغل ومهاراته وتدريبه في تقليل المخاطر. وضرورة وضع برامج التدريب وإصدار الشهادات المناسبة لضمان حصول المشغلين على الفهم اللازم لتشغيل الطائرات المسيرة، ولوائح الطيران، وإجراءات السلامة.

تقدم دراسة (Washington et al, 2017) مراجعة شاملة لنماذج المخاطر الأرضية لأنظمة الطائرات المسيرة، وأهمية نماذج المخاطر الأرضية، والتي تُستخدم لتقييم وقياس المخاطر والمخاطر المحتملة المرتبطة بعمليات الطائرات المسيرة على الأرض. يمكن أن تشمل هذه المخاطر الاصطدامات، والأضرار التي تلحق بالممتلكات أو البنية التحتية، وإصابة الموظفين، والتأثيرات البيئية .تستعرض الورقة نماذج المخاطر الأرضية المختلفة التي تم تطويرها واستخدامها في مجال الطائرات المسيرة.

تناولت دراسة (Washington et al, 2019) موضوع التفكير المبني على المخاطر مثل دراسة فتم تقديم وصفًا عالي المستوى لكيفية اختلاف نتائج عملية تقييم السلامة بناءً على أخذ المخاطر بالاعتبار وتوضيح كيف يؤثر ذلك على تقييم الامتثال للقوانين والتعليمات الموصى بها من قبل السلطات الوطنية (NAAS) في مجال الطيران المسير. كما تناقش الدراسة التحديات التنظيمية المرتبطة بأنظمة الطائرات المسيرة، ويركز على التفكير البني على المخاطر ويسلط الضوء على الصعوبات في تنفيذ لوائح فعالة لعمليات الطائرات المسيرة.

تركز الدراسة (Tran et al, 2019) على تطوير منهجية لإدارة المخاطر المتعلقة بالأمن السيبراني لأنظمة الطائرات المسيرة، وأهمية النظر في تهديدات الأمن السيبراني والمخاطر المرتبطة بهذه الأنظمة. تهدف المنهجية المقترحة إلى تقييم وإدارة المخاطر المتعلقة بالأمن السيبراني في عمليات الطائرات المسيرة باتخاذ عدة خطوات واعتبارات لتحديد التهديدات المحتملة وتحليلها والتخفيف واقتراح استراتيجيات تخفيف المخاطر والتدابير المضادة لتعزيز الأمن السيبراني.

قامت دراسة (Allouch et al., 2019) بإجراء التحليل النوعي والكمي للمخاطر وتقييم سلامة مهمات الطائرات المسيرة عبر الإنترنت. وتتناول التحديات المرتبطة بعمليات الطائرات المسيرة، لا سيما فيما يتعلق بالمخاطر الأمنية والتهديدات المحتملة فيقترح المؤلفون إطارًا شاملاً لإجراء تحليل المخاطر النوعية والكمية لمهام الطائرات المسيرة من خلال النظر في العوامل والمعاملات المختلفة. يقترح المؤلفون منهجية لتقييم المخاطر تعتمد على تقنيات صنع القرار ذات المنطق الغامض ومتعددة المعايير لتحديد المخاطر المحددة وتصنيفها.

يهدف بحث (بدر، 2020) إلى دراسة وتحليل وثوقية طائرة مسيرة صغيرة ذات جناح ثابت ودراسة كيفية زيادة وثوقيتها باستخدام تسامحات الأخطاء من خلال تحديد المكونات الحرجة وأنماط أعطالها؛ ثم دراسة الحلول الممكنة بتكرار العنصر الأكثر حراجة دون التأثير على وزن وموازنة الطائرة.

تناولت الدراسة (Raballand et al, 2021) أهمية تقييم المخاطر في عمليات الطائرات المسيرة، مع الأخذ في الاعتبار عوامل مثل معايير الطيران، والظروف البيئية، والمخاطر المحتملة. وضرورة فهم هذه المخاطر والتخفيف من حدتها. تتيح بيئة المحاكاة للمستخدمين استكشاف سيناريوهات مختلفة وتقييم المخاطر المرتبطة بها بما في ذلك تقييم احتمالات الاصطدام، وانتهاكات المجال الجوي، وسلامة مسار الرحلة، والقرب من الأماكن الحساسة.

تناولت دراسة (Kobaszyńska et al., 2022) تطبيق نماذج إدارة المخاطر في النقل الجوي بالطائرات المسيرة، الذي يتضمن نقل البضائع والأشخاص. إن العدد المتزايد باستمرار من العمليات التي تستخدم الطائرات المسيرة لا يتطلب فقط تحديد مصادر الخطر أو تقييم المخاطر الموصى به من قبل المطبق اللوائح، ولكن أيضًا إدارة المخاطر الشاملة. من أجل تطوير نهج منظم لإدارة المخاطر للعمليات الجوية للطائرات المسيرة، واستخدام الطريقة الكلاسيكية لإدارة المخاطر. تقترح الدراسة نموذجًا جديدًا متعدد المعايير قد يكون بمثابة الأساس لمزيد من الأنشطة تهدف إلى تطوير طريقة لإدارة المخاطر لهذا المجال. اعتمد النموذج على ستة معايير والتحقق من صحتها باستخدام طريق افتراضي لتقييم المخاطر وتقييمها.

4– نظام إدارة الجودة بالمواصفة العالمية AS9100D

يهدف نظام إدارة الجودة بالمواصفة العالمية AS9100D لمؤسسات قطاع الطيران والفضاء والدفاع، إصدار مؤسسة SAE International (AS9100D:2016)، إلى:

– تقديم خدمات ومنتجات ذات وثوقية وسلامة تحقق متطلبات الزبائن والمتطلبات القانونية والتنظيمية.

– تعزيز رضا الزبائن.

– القدرة على إثبات المطابقة لمتطلبات نظام إدارة الجودة.

– التعامل مع المخاطر والفرص المرتبطة بسياقها وأهدافها ومنتجاتها وخدماتها.

تشمل متطلبات نظام إدارة الجودة بالمواصفة AS9100D، متطلبات نظام إدارة الجودة ISO 9001:2015 للمؤسسات المدنية ومتطلبات مجموعة جودة الفضاء العالمية International Aerospace Quality Group (IAQG) لمؤسسات الطيران والفضاء والدفاع. تضمنت بنية المواصفة AS9100D بنية المواصفة ISO 9001:2015 وبنودها بالكامل، مع إضافة متطلبات IAQG بما يتعلق بالوثوقية والسلامة ضمن الفقرات والبنود كافة والتي وضعت بخط غامق. اشتملت هذه الإضافات المصطلحات المضافة التي تتعلق بالوثوقية والسلامة، وإضافات عديدة بموضوع التفكير المبني على المخاطر، وبند التخطيط–6 لتخطيط التعامل مع المخاطر وإجراءات التعامل مع المخاطر، وإضافات عديدة في بند التشغيل–8 الذي يتناول موضوع متطلبات التصميم والتطوير والانتاج.

4–1 التفكير المبني على المخاطر في المواصفة AS9100D

- المخاطر أو المخاطرة Risk: هي تأثير عدم التأكد (الشك) على الأهداف. (ISO 31000:2018)
- التأثير Effect: هو الانحراف عن المتوقع إيجاباً أو سلباً.
- عدم التأكد (الشك) Uncertainty: هي حدث (أو حالة) غير مؤكد ينقصه المعطيات أو المعرفة عن عواقب الحدث Consequences أو معدل حدوثه Likelihood.
- الأهداف Objectives: أهداف نظام إدارة الجودة وكل مستويات أهداف المؤسسة.
- تشمل أهداف متطلبات المواصفة AS9100D: مطابقة المنتجات والخدمات للمتطلبات بما فيها الوثوقية والسلامة، وتحسين رضا الزبون.
- يتم التفكير المبني على المخاطر في نظام إدارة الجودة من خلال: تخطيط إجراءات التعامل مع المخاطر والفرص بند التخطيط–6، وتنفيذ هذه الإجراءات في بند التشغيل–8، وتقييمها في بند التقييم–9 من المواصفة AS9100D.

4–2 التخطيط للتعامل مع المخاطر

تشمل إجراءات التعامل مع المخاطر والفرص وفقًا لبند التخطيط–6 من المواصفة AS9100D، إدارة المخاطر بوضع إجراءات التعامل مع المخاطر والفرص والتخطيط لتنفيذها، لتعزيز التأثيرات المرغوب فيها وتفادي أو تقليل التأثيرات غير المرغوب فيها.

يتضمن التخطيط لإدارة المخاطر وفق البند–6:

- تحديد المخاطر والفرص لسياق المؤسسة، ومتطلبات الأطراف المعنية، وعمليات نظام إدارة الجودة (البند–4)، تحليل وتقييم المخاطر والفرص.
- وضع خطة إجراءات التعامل مع التأثيرات المرغوبة (الفرص) وغير المرغوبة (الخطورة).
- كيفية إدماج وتنفيذ تلك الإجراءات في عمليات نظام إدارة الجودة.
- كيفية تقييم مدى فعالية تلك الإجراءات.

تشمل إجراءات التعامل مع التأثيرات غير المرغوبة على وثوقية وسلامة المنتجات والمشغلين والناجمة عن تعطل وفشل المنتجات في تنفيذ وظيفة أو أكثر من وظائفها.

4–3 تنفيذ إجراءات التعامل مع المخاطر

يتم تنفيذ إجراءات التعامل مع المخاطر والفرص وفقًا لبند التشغيل (البند–8) من المواصفة AS9100D، والذي يشمل إضافات عديدة على المواصفة **ISO 9001-2015**. أهم هذه الإضافات فيما يتعلق بالوثوقية والسلامة والمخاطر والتي تركزت بفقرات: تخطيط وضبط التشغيل (8–1).

الجدول رقم (1): الإضافات المتعلقة بالوثوقية والسلامة والمخاطر

ISO–9001:2015		AS9100D	
8	**Operation**	8	**Operation**
8.1	Operational planning and control	8.1	Operational planning and control
		8.1.1	Operational Risk Management
		8.1.2	Configuration Management
		8.1.3	Product Safety
		8.1.4	Prevention of Counterfeit Parts

4–3–1 أهم الإضافات بالفقرة 1–8 من المواصفة

أ– تحديد متطلبات المنتجات والخدمات

- السلامة الشخصية وسلامة المنتج، القدرة على الإنتاج وقابلية الفحص، الوثوقية والجاهزية وقابلية الصيانة.
- الوقاية والكشف وإزالة الأجسام الغريبة، تقادم المنتج، إعادة التدوير أو التخلص النهائي من المنتج.

ب– وضع معايير لـ:

- التحقق من التصميم (الوثوقية، وقابلية الصيانة، وسلامة المنتج)، تحليل أنماط التعطل وتأثيراتها (FMEA)
- التحكم في العملية، قياس قدرة العملية، مراقبة العمليات الإحصائية.

يجب على المؤسسة تخطيط وإدارة توفير المنتجات والخدمات بطريقة منظمة وخاضعة للرقابة بما في ذلك الأحداث المجدولة التي يتم تنفيذها في تسلسل مخطط تلبية المتطلبات بمخاطر مقبولة، ضمن قيود الموارد والجدول الزمني.

ملاحظة: يُشار إلى هذا النشاط عمومًا بتخطيط المشروع أو إدارة المشروع أو إدارة البرنامج.

4–3–1–1 أهم إضافات الفقرة 1–1–8 (إدارة مخاطر التشغيل)

يجب على المؤسسة تخطيط وتنفيذ ومراقبة عملية إدارة المخاطر التشغيلية لتحقيق المتطلبات المعمول بها، والتي تتضمن، حسب الاقتضاء للمنظمة والمنتجات والخدمات:

- تعيين المسؤوليات لإدارة المخاطر التشغيلية.

- تعريف معايير تقييم المخاطر (مثل الاحتمالية والعواقب وقبول المخاطر).
- تحديد المخاطر وتقييمها والإبلاغ عنها خلال العمليات.
- تحديد وتنفيذ وإدارة الإجراءات الرامية إلى تخفيف المخاطر التي تتجاوز معايير قبول المخاطر المحددة.
- قبول المخاطر المتبقية بعد تنفيذ إجراءات التخفيف.

ملاحظة:

في صناعة الطيران والفضاء والدفاع، يتم التعبير عن المخاطر عمومًا من حيث احتمال حدوثها وشدة العواقب.

4-3-1-2 أهم إضافات الفقرة 2-1-8 (إدارة التكوين)

يجب على المؤسسة تخطيط وتنفيذ ومراقبة عملية إدارة التكوين بما يتناسب مع المؤسسة ومنتجاتها وخدماتها من أجل ضمان تحديد ومراقبة السمات المادية والوظيفية طوال دورة حياة المنتج .يجب أن تقوم هذه العملية بما يلي:

- التحكم في هوية المنتج وإمكانية تتبع المتطلبات، بما في ذلك تنفيذ التغييرات المحددة.
- التأكد من أن المعلومات الموثقة (مثل المتطلبات والتصميم والتحقق والتصديق ووثائق القبول) متوافقة مع السمات الفعلية للمنتجات والخدمات.

4-3-1-3 أهم إضافات الفقرة 3-1-8 (سلامة المنتج)

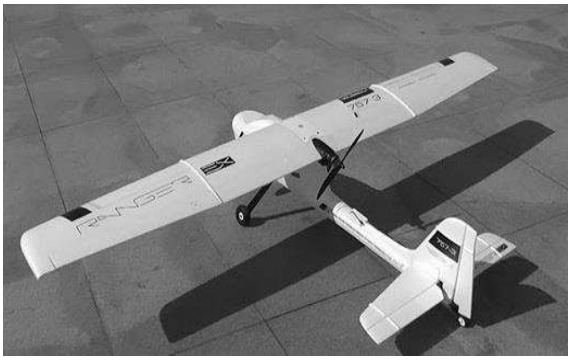
يجب على المؤسسة تخطيط وتنفيذ ومراقبة العمليات اللازمة لضمان سلامة المنتج خلال دورة حياة المنتج بأكملها، بما يتناسب مع المنظمة والمنتج.

5- تطبيق التفكير المبني على المخاطر لطائرة مسيرة صغيرة

تشرح هذه الفقرة توصيف الطائرة المسيرة الصغيرة المدروسة ومكوناتها ووظائفها، وتحليل أنماط تعطل المكونات وتحديد مخاطر تعطلها ووضع إجراءات التعامل معها لزيادة الوثوقية والسلامة.

5-1 مكونات منظومة الطائرة المسيرة الصغيرة ووظائفها

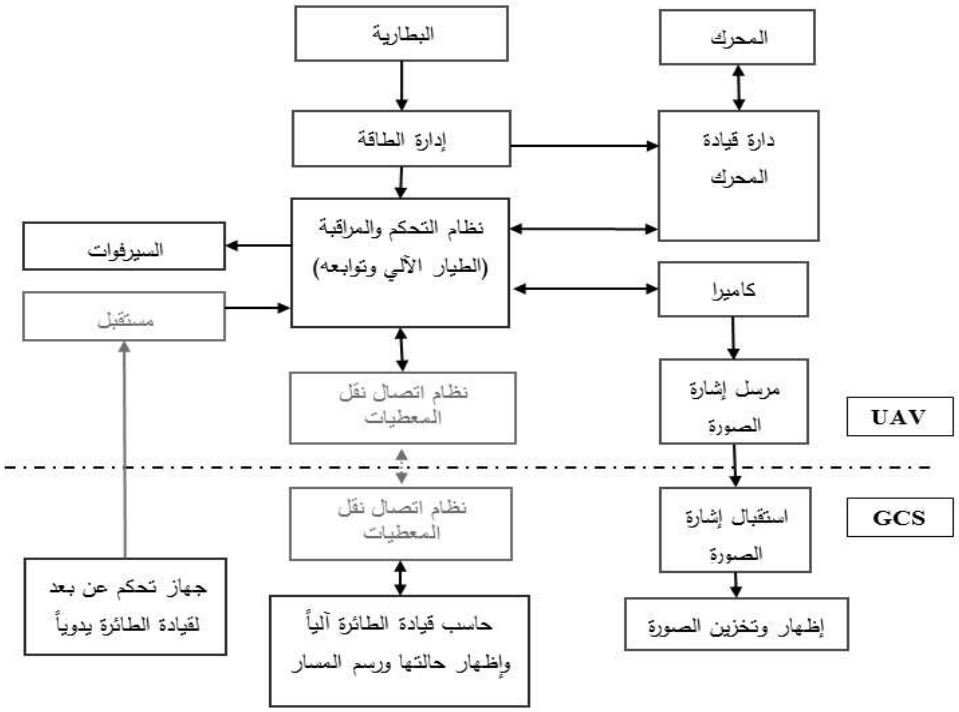
يتم إقلاع الطائرة بأوامر مباشرة من الطيار على الأرض من خلال جهاز التحكم عن بعد، ثم قيادتها يدويًا والتسلق وإجراء مناورات بكسب ارتفاع ونزول والتحليق، والانتقال إلى القيادة الآلية وتنفيذ المهمة المطلوبة من الطائرة، ثم العودة والهبوط. تتألف منظومة الطائرة المسيرة الصغيرة التي اختيرت للدراسة: من هيكل طائرة ذات جناح ثابت من نوع Ranger Ex متاحة تجاريًا، زودت بتجهيزات إلكترونية للقيادة والتحكم والمراقبة عن بعد ومحرك كهربائي وبطارية، ومحطة أرضية باعتماد حاسب محمول وبرمجيات وجهاز تحكم عن بعد. يبين الشكل-1 الطائرة Ranger Ex.



الشكل رقم (1): الطائرة Ranger Ex

5-1-1 مكونات المنظومة

تضمن تصميم منظومة الطائرة المسيرة عدة وظائف للتحكم بالطائرة المسيرة UAV ومراقبة حالتها عن بعد بمحطة التحكم الأرضية GCS من خلال نظام اتصالات نقل المعطيات. ويبين الشكل-2 المخطط الصندوقي ومبدأ عمل مكونات المنظومة وفقًا للتجزئة الوظيفية للنظم الكهربائية والإلكترونية، واشتملت الوظائف الرئيسية التالية:



الشكل رقم (2): المخطط الصندوقي لمكونات منظومة الطائرة المسيرة

1. هيكل الطائرة الذي يحوي مكونات الطائرة ويتألف من جسم الطائرة والجناح والذيل والعجلات.
2. نظام الدفع (المحرك الكهربائي وتوابعه) ونظام التغذية الكهربائية (بما فيها البطارية) في الطائرة، وتوزيعها على نظام التحكم والاتصالات والحمل المفيد.
3. التحكم والمراقبة للطائرة والمحرك (بواسطة الطيار الآلي وتوابعه وسيرفوات دفات التحكم)، قيادة الطائرة يدوياً بواسطة جهاز التحكم عن بعد لاسلكيًا، وقيادة الطائرة آلياً وإظهار حالتها والمسار المنفذ بواسطة حاسب قيادة الطائرة.
4. نظام اتصال رقمي لاسلكي لنقل الأوامر والمعطيات بين الطائرة والمحطة الأرضية.
5. حمل مفيد مؤلف من كاميرا ونظام اتصال نقل إشارة الصورة، وإظهار الصورة في المحطة الأرضية وتخزينها.

5-1-2 وظائف نظام التحكم

يقوم نظام التحكم بالحفاظ على استقرار وتوجيه الطائرة باعتماد طيار آلي متاح تجاريًا في الأسواق من نوع FY-41 AP وتوابعه التي تتضمن حساس السرعة والارتفاع الضغطي، ومستقبل GPS لتحديد الموقع، وسيرفوات دفات التحكم. تتم قيادة الطائرة يدويًا بأوامر طيار مراقب من خلال جهاز التحكم عن بعد لاسلكيًا، حيث تدخل الأوامر إلى نظام التحكم من مخرج المستقبل، كما تدخل الأوامر الآلية من حاسب قيادة الطائرة من مخرج نظام اتصال نقل المعطيات في الطائرة.

خرج نظام التحكم إشارات كهربائية بتعديل عرض النبضة Pulse Width Modulation (PWM) للتحكم بالاستقرار والتوجيه، إلى سيروفات دفات التحكم (الجنيحات Aileron، العمق Elevator، الاتجاه Ruder) والتحكم بسرعة الطائرة من خلال دارة قيادة المحرك بالتحكم في سرعة دوران المحرك.

5–1–3 وظيفة نظام الدفع

يعتمد نظام الدفع على محرك كهرائي نوع Brushless electrical motor ثلاثي الطور مع مروحة، ودارة قيادة المحرك والتجكم بسرعة دورانه للتحكم بسرعة الطائرة من خلال إشارة PWM من الطيار الآلي. تؤمن بطارية ليثيوم بجهد 25 فولط الطاقة الكهربائية اللازمة للمحرك في مراحل الطيران من الإقلاع وحتى الهبوط.

5–1–4 وظائف نظام الاتصالات

يهدف نظام الاتصال إلى نقل الأوامر اليدوية والآلية من جهاز التحكم ومن المحطة الأرضية إلى الطائرة، ونقل المعطيات من الطائرة إلى المحطة الأرضية لمراقبة حالة الطائرة وموقعها ومسارها.

5–1–5 وظائف الحمل المفيد

يتكون نظام الحمل من كاميرا ونظام اتصال لاسكلي لنقل إشارة الصورة من الطائرة إلى المحطة الأرضية.

5–2 تحليل مخاطر أنماط التعطل الطائرة المسيرة الصغيرة

يمكن أن تؤدي بعض أنماط التعطل أو الفشل لوظائف الطائرة المسيرة الصغيرة إلى مخاطر كارثية مثل فقدان الطائرة أو سقوطها على الأرض وتحطمها. لوضع خطة لإجراءات التعامل مع التأثيرات غير المرغوبة على وثوقية وسلامة المنتجات والمشغلين والناجمة عن تعطل وفشل المنتجات في تنفيذ وظيفة أو أكثر من وظائفها، فإنه يلزم إجراء تحليل لأنماط تعطل المكونات وتقييم مخاطر التعطل على الوثوقية والسلامة. من المنهجيات المعتمدة لتحليل الأعطال التي تطلب المواصفة AS9100D باستخدامها منهج تحليل أنماط التعطل وتأثيراتها Failure Modes Effect Analysis (FMEA) التي تعتمد على رقم أولوية المخاطر Risk Priority Number (RPN).

5–2–1 مبدأ تقييم مخاطر أنماط التعطل

يتم تقييم مخاطر أنماط التعطل للوظائف وفقاً لمصفوفة الاحتمالات والتأثير المعتمدة على التحليل النوعي لمعاملي معدل الحدوث Occurrence(O) وشدة التأثير Severity(S)، وتأخذ هذه المعاملات قيمًا من 1 إلى 5. يجري تحديد معامل معدل الحدوث (O) بخمسة مستويات كما هو مبين في الجدول–2.

الجدول رقم (2): قيم معامل معدل الحدوث (O)

معدل الأعطال	أكثر من 3000	3000 -1000	1000 -500	500 -100	أقل من 100
قيم المعامل	عالي جدًا	عالي	متوسط	منخفض	منخفض جداً
	5	4	3	2	1
معامل معدل الحدوث (O)					

كما يجري تحديد معامل شدة التأثير (S) بناءً على مخاطر تعطل الطائرة المسيرة الصغيرة أو نظمها الجزئية بخمسة مستويات باستخدام أدوات مثل العصف الذهني والمعلومات والمعارف السابقة، كما هو في الجدول–3.

الجدول رقم (3): قيم معامل شدة التأثير (S)

فقدان الطائرة	فقدان التحكم بالطائرة	تغير أداء الطائرة	تغير أداء نظام جزئي	لا يوجد تأثير يذكر على مهمة الطائرة
عالي جدًا	عالي	متوسط	منخفض	منخفض جداً
5	4	3	2	1
شدة التأثير (S)				

بعد تحديد المعاملين (O) و(S) يجسب رقم أولوية المخاطر RPN لكل نمط تعطل وفقًا لمصفوفة المخاطر، والذي يساوي إلى جداء المعامل (O) مع المعامل (S). يبين الجدول–4 مصفوفة المخاطر وفقًا لرقم أولوية المخاطر بالنسبة للمعاملين (O) و(S). يمكن اعتبار المخاطر ذات RPN من 1 إلى 4 مخاطر منخفضة، ومن 5 إلى 10 مخاطر متوسطة، ومن 12 إلى 16 مخاطر عالية، ومن 20 إلى 25 مخاطر عالية جدًا كما هو في الجدول–4.

الجدول رقم(4): مصفوفة المخاطر وفقًا لرقم أولوية المخاطر RPN بالنسبة للمعاملين O و S

معدل الحدوث (O)						
	5 (عالي جداً)	5	10	15	20	25
	4 (عالي)	4	8	12	16	20
	3 (متوسط)	3	6	9	12	15
	2 (منخفض)	2	4	6	8	10
	1 (منخفض جداً)	1	2	3	4	5
		1 منخفض جداً	2 منخفض	3 متوسط	4 عالي	5 عالي جدًا
		شدة التأثير (S)				

5–2–2 تقييم مخاطر أنماط تعطل الوظائف الرئيسية

يجرى تقييم مخاطر أنماط تعطل الوظائف الرئيسية باعتماد مصفوفة المخاطر بخطوات مماثلة للمناهج المتبعة ابتداءً من تحديد أنماط التعطل وتأثيرها، ثم تحليل خطورتها من حيث معدل الحدوث (O) وشدة التأثير (S) وترتيبها وفقًا لرقم أولوية المخاطر RPN، كما هو مبين في الجدول–5.

من أهم أنماط تعطل نظام التحكم هو فقدان القدرة على المحافظة على استقرار وتوجيه الطائرة، وأنماط تعطل نظام الدفع هو فقدان قوة الدفع اللازم لطيران الطائرة. تبين نتائج التحليل بأن مخاطر أنماط تعطل نظام التحكم ونظام الدفع تؤدي إلى فقدان الطائرة وتصنيفها ضمن المخاطر العالية جدًا، بينما مخاطر أنماط تعطل هيكل الطائرة ونظام الاتصال تؤدي إلى تغيير الأداء وتصنيفها ضمن المخاطر العالية، أما مخاطر أنماط تعطل الحمل المفيد تؤدي إلى عدم استكمال المهمة وتصنيفها ضمن المخاطر المتوسطة.

الجدول رقم (5): يبين تقييم أنماط تعطل الوظائف الرئيسية وترتيب الخطورة

النظم	نمط التعطل	التأثير	رقم أولوية المخاطر S * O = RPN	ترتيب الخطورة
نظام التحكم	فقدان التحكم بالدفات	فقدان التحكم بالطائرة وفقدانها	5 * 4 = **20**	**1**
نظام الدفع	انطفاء المحرك	انعدام قوة الجر وفقدان الطائرة	4 * 5 = **20**	**2**
هيكل الطائرة	تضرر أجزاء من الهيكل	تغير الأداء أثناء الطيران	5 * 3 = **15**	**3**
نظم اتصال	فقدان الأوامر والتليمتري	فقدان الأوامر والتليمتري	4 * 4 = **16**	**4**
الحمل المفيد	توقف الصورة	عدم القدرة على استكمال المهمة	**3 * 3 = 9**	**5**

6– إجراءات التعامل مع مخاطر تعطل المكونات لتحسين الوثوقية والسلامة

يمكن زيادة الوثوقية لأنماط تعطل نظام التحكم ونظام الدفع ذات المخاطر العالية جداً من خلال تصميم نظام متحمل للأعطال Fault Tolerant System باستخدام مكونات رديفة ثنائية بما يسمى الربط التفرعي، أي أن يمكن يتعطل النظام فقط عند تعطل المكونين معاً.

يجرى تقييم مخاطر أنماط تعطل المكونات الجزئية لنظام التحكم ونظام الدفع باعتماد مصفوفة المخاطر بتحديد أنماط التعطل وتأثيرها، وتحليل خطورتها من حيث معدل الحدوث (O) وشدة التأثير (S) وترتيبها وفقًا لرقم أولوية المخاطر RPN، كما هو مبين في الجدول–6 والجدول–7.

الجدول رقم (6): تقييم أنماط تعطل المكونات الجزئية لنظام التحكم

المكونات الجزئية	نمط التعطل	التأثير	S * O = RPN	الخطورة
الطيار الآلي	تعطل الحساسات	فقدان التحكم بالطائرة	5 * 2 = **10**	**متوسطة**
تحديد الموقع	تعطل GPS	فقدان موضع الطائرة وفقدانها	5 * 3 = **15**	**عالي جداً**
دفات التحكم	تعطل سيرفو دفة العمق	فقدان الطائرة	5 * 5 = **25**	**عالي جداً**
	تعطل سيرفو الجنيحات	انخفاض الأداء	5 * 3 = **15**	**عالي**
	تعطل سيرفو دفة الاتجاه	انخفاض الأداء	5 * 3 = **15**	**عالي**

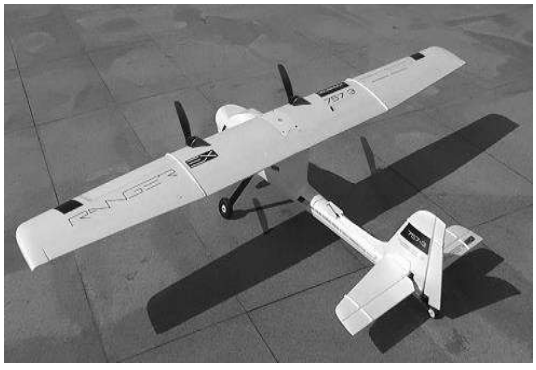
الجدول رقم (7): تقييم أنماط تعطل نظام الدفع

النظم الجزئية	نمط التعطل	التأثير	S * O = RPN	الخطورة
المحرك	دوران المحرك غير منتظم	فقدان التحكم بالطائرة وفقدانها	5 * 5 = **25**	**عالي جداً**
دارة قيادة المحرك	فشل التحكم بالمحرك	فقدان التحكم بقوة الدفع	5 * 4 = **20**	**عالي جداً**
المروحة	تضرر المروحة	انخفاض قوة الدفع	5 * 4 = **20**	**عالي جداً**
البطارية	انتهاء شحنة أثناء الطيران	انخفاض قوة الدفع	4 * 4 = 16	**عالي**

يتبين من الجدول–4 أن الخطورة العالية جداً لأنماط تعطل المكونات الجزئية لنظام التحكم هو نمط تعطل سيرفو دفة العمق، حيث يجب وضع إجراء لإضافة سيرفو رديف. هذا يتطلب تقسيم دفة العمق في مجموعة الذيل إلى نصفين يميني ويساري، ووضع سيرفو مستقل لكل قسم من دفة العمق، كما هو مبين بالشكل–3.

كما يبين الجدول–5 أن الخطورة العالية جداً لأنماط تعطل المكونات الجزئية لنظام الدفع هي أنماط تعطل المحرك ودارة القيادة والمروحة، حيث يجب وضع مجموعة كاملة رديفة مكونة من دارة قيادة ومحرك ومروحة، وتركيب المحركين على الجناح، واحد على الجناح الأيمن والثاني على الجناح الأيسر بدلاً عن المنتصف كما هو مبين في الشكل–4.

الشكل رقم (3) : تقسيم دفة العمق ووضع سيرفو لكل قسم



الشكل رقم (4): تركيب المحركين على الجناح

7- حسابات تحسين الوثوقية

7-1 حسابات تحسين الوثوقية لنظام التحكم بدفة العمق

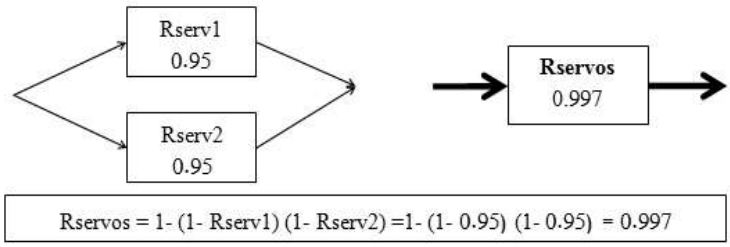
لحساب الوثوقية الكلية لنظام مكوناته n على التفرع نعتمد قانون الوثوقية التالي (السهلي، 2010):

$$Rsys = 1- (1-R1) * (1-R2) .. (1-Rn)$$

فمثلاً إذا كانت وثوقية المكون الأول تساوي R1= 0.90، وباستخدام مكون ثاني رديف مماثل له وثوقية R2= 0.90 أيضاً، فإن وثوقية النظام Rsys تعطى بالعلاقة:

$$Rsys = 1- (1-R1) * (1-R2) = 0.99$$

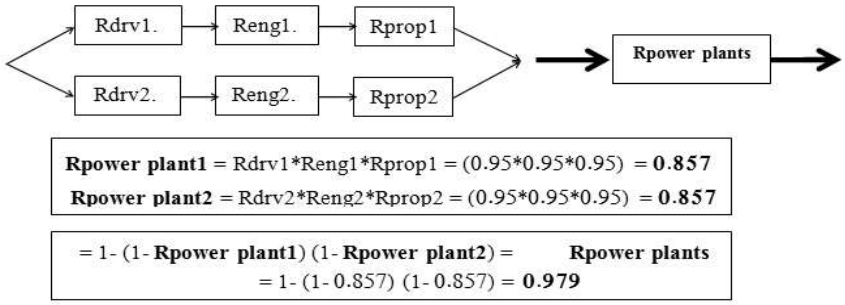
يعتمد حساب وثوقية نظام التحكم بدفة العمق على نمذجة الوثوقية لمكونات تفرعية. إذا كانت وثوقية السيرفو الواحد (Rserv) هي 0.95 ، فإن الوثوقية الكلية للسيرفوين معاً Rservos تساوي 0.997 وفقاً للمخطط الصندوقي للوثوقية المبين في الشكل-5. وهذا يعني تحسين وثوقية نظام السيرفوات من 0.95 إلى 0.997.



الشكل رقم (5): المخطط الصندوقي للوثوقية لسيرفوات دفة العمق

7-2 حسابات تحسين الوثوقية لنظام الدفع

يعتمد حساب وثوقية نظام الدفع على نمذجة الوثوقية لمكوناته. يمكن نمذجة وثوقية نظام الدفع الرئيسيRpower plant1 ووثوقية نظام الدفع الرديف Rpower plant2 تسلسلياً من وثوقية مكوناته (وثوقية دارة قيادة المحرك .Rdrv1، وثوقية المحرك .Reng1، ووثوقية المروحة .Rprop1). أما وثوقية نظام الدفع الكلي Rpower plants فهي الوثوقية التفرعية لنظامي الدفع الرئيسي والرديف. إذا كانت وثوقية كل نظام جزئي لنظام الدفع تساوي 0.95، فإن وثوقية كل من نظام الدفع الرئيسي والرديف Rpower plant1 وRpower plant2 تساوي 0.857، والوثوقية الكلية لنظام الدفع Rpower plants تساوي 0.979 . كما هو مبين بالمخطط الصندوقي للوثوقية لنظام الدفع في الشكل-6. وهذا يعني تحسين وثوقية نظام الدفع من 0.857 إلى 0.979 .



الشكل رقم (6): المخطط الصندوقي للوثوقية لنظام الدفع

8- نتائج الدراسة ومقارنتها مع الدراسات السابقة

ركزت غالبية الدراسات السابقة على مخاطر السلامة بعمليات الطائرات المسيرة، والامتثال للقوانين والتعليمات للطائرات المسيرة المتوسطة الكبيرة، والمخاطر الأمنية من تهديدات الأمن السيبراني، ومخاطر الاصطدام بالجو. وعلى أهمية تقييم المخاطر في عمليات الطائرات المسيرة، مع الأخذ في الاعتبار عوامل مثل معايير الطيران، والظروف البيئية، والمخاطر المحتملة، وضرورة فهم هذه المخاطر والتخفيف من حدتها.

بينما قامت هذه الدراسة بتقييم مخاطر تعطل النظم الرئيسية والنظم الجزئية في تصميم طائرة مسيرة صغيرة Ranger ex على الوثوقية والسلامة، اعتمادًا على منهج التفكير المبني على المخاطر وفق بند التخطيط وبند التشغيل لنظام إدارة الجودة بالمواصفة العالمية AS9100D لمؤسسات قطاع الطيران والفضاء والدفاع، الذي لم تتناوله الدراسات السابقة. حيث تم تحديد أنماط التعطل عالية الخطورة التي يمكن أن تؤدي إلى حوادث كارثية باستخدام منهج تحليل نمط التعطل وتأثيراتها، وترتيبها وفق رقم أولوية المخاطر. ووضع إجراءات لتخفيف المخاطر الناجمة عن أنماط تعطل النظم الجزئية لمكونات الطائرة ذات المخاطر العالية (نظام التحكم بدفة العمق وتعطل نظام الدفع) باستخدام مكونات رديفة لتلك النظم. وتم حساب مقدار تحسين وثوقية نظام السيرفوات من 0.95 إلى 0.997 ، ومقدار تحسين وثوقية نظام الدفع من 0.857 إلى 0.979

التوصيات:

- تحليل شجرة الأعطال للمخاطر الكارثية لطائرة مسيرة ومكوناتها وتحديد احتمالات الأعطال ومعدلات حدوثها.
- كشف وتشخيص أعطال الطيار الآلي وحساساته لتصميم نظام تحكم للطائرة المسيرة متحمل الأعطال الكارثية.
- تحليل أعطال نظم الدفع للطائرات المسيرة المعتمدة على المحركات المكبسية.

المراجع:

1. (Allouch et al., 2019) Allouch A., Koubaa, A., Khalgui, M. and Abbes, T., 2019. **Qualitative and quantitative risk analysis and safety assessment of unmanned aerial vehicles missions over the internet**. Ieee Access, 7, pp.53392-53410.
2. (AS9100D:2016) AS9100D:2016, **Quality Management Systems – Requirements for Aviation, Space, and Defense Organizations**, SAE International 2016,
3. http://www.sae.org/technical/standards/AS9100D
4. (ISO 31000:2018) ISO 31000:2018, **Risk management – Principles and guidelines**, https://www.iso.org/standard/43170.html
5. (Kobaszyńska et al., 2022) Kobaszyńska-Twardowska, A., Łukasiewicz, J. and Sielicki, P.W., 2022. **Risk Management Model for Unmanned Aerial Vehicles during Flight Operations**. Materials, 15(7), p.2448.
6. (Raballand et al, 2021) Raballand, N., Bertrand, S., Lala, S. and Levasseur, B., 2021, September. **DROSERA: A DROne Simulation Environment for Risk Assessment**. In Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference (pp. 354-361). Research Publishing Services.

7. (Stockwell, Schulman, 2016) Stockwell, W. and Schulman, B., 2016. **Defining a lowest-risk uas category**. DJI Research, LLC, p.27.

8. (Tran et al, 2019) Tran, T.D., Thiriet, J.M., Marchand, N., El Mrabti, A. and Luculli, G., **Methodology for risk management related to cyber-security of Unmanned Aircraft Systems**. In 2019 24th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) September 2019, (pp. 695-702). IEEE.

9. (Washington et al, 2017) Washington A., Clothier, R.A. and Silva, J., 2017. **A review of unmanned aircraft system ground risk models**. Progress in Aerospace Sciences, 95, pp.24-44.

10. (Washington et al, 2019) Washington A., Clothier, R. and Silva, J., 2019, January. **Challenges to the risk-based regulation of unmanned aircraft systems**. In Proceedings of the 18th Australian International Aerospace Congress (AIAC18) (pp. 26-33). Engineers Australia, Royal Aeronautical Society.

11. (السهلي، 2010)، د. عبيدة السهلي، **مقرر الوثوقية في برنامج ماجستير إدارة الجودة**، 2010، الجامعة الافتراضية السورية، دمشق، سوريا.

12.(بدر، 2020)، مها بدر، **تحسين وثوقية طائرة مسيرة صغيرة ذات جناح ثابت باعتماد النظم المتحملة للأعطال**، رسالة ماجستير، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، 2020 .