

## القبة الخالدة: إعادة تعريف الجيل القادم للدفاع الجوي في عصر التقنيات الفرط صوتية

د. حمد الكعبي – شركة "هالكون"، الإمارات العربية المتحدة

لقد تجاوز ظهور الأسلحة الفرط صوتية بنية منظومات الدفاع الجوي القائمة، كاشفاً عن ثغرات حرجية في أجهزة استشعار كشف التهديدات، والاعتراضات، وهياكل القيادة والسيطرة (C2). لذلك، يجب أن تتطور استراتيجيات الدفاع الجوي الوطنية نحو بنية متكاملة لـ "شبكة القتل" (Kill-Web) لتجمع بين أسلحة الطاقة الموجهة (DEWs)، والاعتراضات الحركية، والاستشعار المستمر من الأرض والفضاء. لقد أكدت النزاعات الأخيرة في مناطق متعددة على إلحاح هذه التكيّفات، حيث إن سرعات الصواريخ، ومساراتها، وقدرتها على المناورة، تتجاوز بشكل متزايد قدرات الأنظمة التقليدية. إن الرادارات التقليدية والعمليات التسلسلية للقيادة والسيطرة غير كافية في مواجهة التهديدات فرط الصوتية التي تستغل المناطق العمياء في أجهزة الاستشعار. تعتبر مجموعة المراسد الفضائية للأشعة تحت الحمراء، والدمج المعزز بالذكاء الاصطناعي، والتكليف الحيوي للاعتراضات، ضرورة لبناء المرونة وسرعة الاستجابة. في المحصلة، فإن الأنظمة الدفاعية ضد الصواريخ الفرط صوتية لا تتعلق فقط باعتراض أجسام سريعة الحركة، بل بإنشاء منظومة دفاعية قادرة على الإنذار المبكر، واتخاذ القرار السريع، وتنفيذ الاشتباك الدقيق عبر جميع المجالات والارتفاعات. هذه المقاربات المتكاملة والطبقية فقط من شأنها الحفاظ على الاستقرار الاستراتيجي في العصر الفرط صوتي. تقدم هذه الورقة البحثية إعادة تقييم استراتيجية وتقنية لهياكل الدفاع الجوي المصممة لمواجهة العصر الجديد من السرعة والتعقيد وعدم القدرة على التنبؤ.

### الكلمات المفتاحية

المحطة الأرضية الضوئية، الشبكة الآمنة كميّاً، الاتصالات الضوئية عبر الفضاء الحر، الأمن السيبراني، في عمق الدفاع.

### مقدمة: التهديد المتصاعد للفرط صوتي

يمثل صعود تكنولوجيا الصواريخ الفرط صوتية تحولاً نموذجياً في طبيعة الحروب الجوية والصاروخية، حيث يضغط الجداول الزمنية لاتخاذ القرار، ويوسّع نطاقات التهديد، ويكشف الثغرات الحرجية في هياكل الدفاع التقليدية. فقد أظهرت أسلحة مثل "كينجال" و"أمانغارد" الروسية، و(DF-ZF) الصينية، قدرات تشغيلية تتجاوز آفاق الرادار، وتستغل المناورات الجوية، وتتحدى أطر الردع الإقليمي والاستراتيجي. إن قدرتها على الطيران بسرعات تتجاوز 5 ماخ مع تنفيذ مسارات طيران غير متوقعة جعلت مفهوم الاعتراض الموثوق أكثر هشاشة (Zohuri, McDaniel, Lee, & Rodgers, 2019).

تتمثل المساهمة الفريدة لهذا البحث في اقتراح إطار متكامل لمنهجية "شبكة القتل"، حيث يجمع بين الاستشعار المستمر عبر المجالات، ودمج البيانات المعزز بالذكاء الاصطناعي، وشبكات القيادة والسيطرة الآلية، وطبقات من

الاعتراضات الحركية والطاقة الموجّهة، باعتبارها البنية الأساسية للدفاع الجوي للجيل القادم في العصر الفرط صوتي، ومن خلال الانتقال من سلاسل الاستشعار إلى الإطلاق (Sensor-to-Shooter) إلى شبكات موزعة ومرنة تعمل بسرعة الآلة، يقدم النهج المقترح مخططاً لمواجهة التهديدات المناورة ضمن قيود زمنية وتشغيلية قصوى.

تمثل الأنظمة فرط الصوتية تحديات تتعلق بالفيزياء بقدر ما تتعلق بالسرعة، فقوة دفع المحرك النفث الفرطي "سكرامجت"، ومسارات الانزلاق المعززة، وأغلفة البلازما التي تعطل إشارات (RF) و(GPS) لا تعقّد التوجيه والتتبع فحسب (Waltrup et al., 2002; Haidn, 2008)، بل تفرض أيضاً التحول نحو هياكل استشعار متعددة المدارات، وشبكات رادار ما وراء الأفق، وأنظمة قيادة وسيطرة مدعومة بالذكاء الاصطناعي قادرة على العمل بسرعة الآلة مع بقاء الإنسان في منصة الإشراف.

يسلط البحث الضوء على ثلاث مراحل: أولاً، يستعرض التقنيات التي تقوم عليها الأسلحة الفرط صوتية، ثم يحلل ثغرات أنظمة الدفاع الجوي الحالية، وأخيراً يقترح بنية "شبكة قتل" متكاملة مدعومة بأمثلة واقعية ومتطلبات تشغيلية مستقبلية. ومن خلال تحديد المخاطر التقنية والاستراتيجية معاً، يضع البحث مفهوم "شبكة القتل" باعتباره تطوراً ضرورياً لضمان دفاع وردع موثوقين في العصر الفرط صوتي.

### التقنيات الحرجة وراء الصواريخ الفرط صوتية

كخطوة أولى، من الضروري تطوير فهم عميق حول التقنيات الحرجة الخاصة بالدفع والتوجيه المستخدمة في الأنظمة الفرط صوتية. على صعيد قوة الدفع، تحافظ محركات "سكرامجت" على سرعات تحليق تتراوح بين 5-15 ماخ من خلال ضغط واحتراق تدفق الهواء الأسرع من الصوت، إلا أنها تتطلب هندسة دقيقة لفتحة الدخول، وتواجه عدم استقرار في الاشتعال، وتتعامل مع أحمال حرارية شديدة تتجاوز 2000 كلفن (Waltrup et al., 2002; Drummond et al., 2001). تظل محركات الصواريخ السائلة، مثل تلك التي تُشغّل صاروخ (Kh-47M2 Kinzhal)، أبسط وأكثر إحكاماً، لكنها تعاني من أحمال الاهتزاز وتحديات التبريد (Haidn, 2008; Siva, 2018).

على القدر نفسه من الأهمية، هناك التحدي الملاحي الناتج عن تشكّل البلازما حول الصاروخ عند السرعات الفرط صوتية. يؤدي الانقطاع الكهرومغناطيسي إلى تعطيل الاتصالات الراديوية (RF) و(GPS)، ما يجبر الصواريخ على الاعتماد على طول داخلية للحفاظ على الدقة (Cooper, 2018) تتكامل هياكل التوجيه الواعدة الآن مع أنظمة الملاحة بالقصور الذاتي (INS) مع تصحيحات الأقمار الصناعية (LOS) القادمة من مجموعات المدار الأرضي المنخفض (LEO).

أظهر عرض (SpaceX) التابع لشبكة ستارلينك على متن نموذج أولي من (Starship)، والذي تضمن بثاً لصور الكاميرات والبيانات بنجاح خلال إعادة الدخول عبر ظروف البلازما، أن الاتصالات ذات النطاق العريض يمكن أن تستمر خلال ظروف الغلاف البلازمي الجزئي (Hofacker, 2024). يشير ذلك إلى أن الاتصال المستمر مع الشبكات الفضائية حتى خلال تحميل البلازما يمكنه استعادة بيانات تحديد المواقع أثناء الطيران.

يمكن لصاروخ فرط صوتي من الجيل القادم أن يدمج بين تقنية (INS)، وروابط بيانات مقاومة للبلازما، وتحديثات خط النظر (LOS) من أقمار صناعية متعددة للحفاظ على مسار دقيق عالي. يوفر هذا الأسلوب الملاحي الهجين دقة أكثر موثوقية من (GPS) أو (INS) منفردين، واللذان يعانيان من الانحراف أو الانقطاع. كما أن الاستفادة من مجموعات المدار الأرضي المنخفض التجارية أو أقمار الاستطلاع (ISR) المخصصة يفتح الطريق لتجاوز فقدان التوجيه الناجم عن البلازما، وضمان بقاء الأسلحة فرط الصوتية على المسار نحو الهدف.

## قيود أنظمة الدفاع الجوي الحالية

الأنظمة الدفاعية الجوية الحالية غير كافية لمواجهة التهديدات فرط الصوتية، يوضح فونتانا ودي لاورو (2022) أن أنظمة الرادار رغم دقتها العالية مقيدة جغرافياً بانحناءات الأرض، ما يجعلها عاجزة عن رصد التهديدات القادمة إلا بعد دخولها في مدى الاشتباك، وعلى وجه الخصوص، لا تستطيع الرادارات الأرضية مثل (AN/TPY-2) و (SPY-1) الكشف خلف أفق الرادار، ما يمنح المدافعين وقتاً محدوداً جداً للرد عند مواجهة صاروخ فرط صوتي بسرعة تفوق 5+ ماخ.

علاوة على ذلك، غالباً ما تبقى المركبات الانزلاقية فرط الصوتية (HGVs) داخل الغلاف الجوي العلوي (على ارتفاعات تقارب 30-70 كم)، ما يسمح لها بتفادي أنظمة التتبع الباليستي خارج الغلاف الجوي، ويزيد من تأخر الاستشعار (انظر الشكل 1). بعبارة أخرى، تطلق مركبات (HGVs) في منطقة عمياء للرادارات والمستشعرات: منخفضة جداً عن أجهزة الاستشعار الفضائية، وسريعة ومناورة بدرجة تمنع الرادارات الأرضية من ملاحظتها، ما يؤخر عملية الكشف والتعقب.

وبشير فونتانا ودي لاورو إلى مفاضلة رئيسية: أجهزة الاستشعار الفضائية بالأشعة تحت الحمراء توفر قدرة إنذار مبكر لكنها تفتقر إلى الدقة اللازمة لتوجيه الاعتراض دون دعم الرادار، وعلى العكس، يمنح الرادار دقة عالية لكنه يتأخر جداً عند العمل منفرداً. هذا التباين في الأداء يترك فجوات في استمرارية التتبع ويؤدي إلى ضياع فرص الاعتراض. كما أن هذه القيود تجعل الأنظمة التقليدية المصممة لاعتراض الصواريخ الباليستية أو التهديدات البطيئة غير مناسبة لعصر الأسلحة فرط الصوتية.

من الضروري التأكيد على أن هياكل القيادة والسيطرة التقليدية (C2) مبنية على عمليات متسلسلة وقرارات هرمية، وهي عمليات بطيئة بطبيعتها أمام الأسلحة فائقة السرعة، فعادةً ما تقوم هذه الهياكل بدمج بيانات الرادارات وأجهزة الاستشعار ووسائل الاستطلاع، ثم تحليلها وتصنيفها وتحديد أولوياتها، لتقديم خيارات للقادة، وإصدار أوامر للوحدات، ومزامنة الأنظمة الدفاعية، وإدارة الاتصالات والروابط، وتخصيص المنظومات، والحفاظ على صورة تشغيلية شاملة. إلا أن التهديدات فرط الصوتية تقلص بشكل كبير زمن اتخاذ القرار، ما يفرض ضغطاً شديداً على الاكتشاف والتعقب والتصنيف والتقييم والاعتراض.

إضافة إلى ذلك، تستطيع مركبات (HGVs) إجراء تغييرات مفاجئة في المسار أثناء الطيران، ما يطرح بالافتراضات المعتمدة في التتبع الراداري، هذه التحديات تطرح إشكاليات كبيرة أمام النماذج الحالية للقيادة والسيطرة، وتجبر الأنظمة على تقصير دورات القرار والتعامل مع مستويات أقل من اليقين.

حتى أفضل صواريخ الاعتراض لن تكون فعالة ضد التهديدات فرط الصوتية ما لم تدعمها أنظمة قادرة على دمج بيانات متعددة المستشعرات، والحفاظ على تعقب مستمر، وتمكين اتخاذ قرارات لحظية، للتعامل مع هذه الأسلحة فائقة السرعة، يجب على أنظمة الدفاع الجوي أن تتجاوز الاعتماد الحصري على الرادار الأرضي، بل ينبغي لها استخدام جميع بيانات المستشعرات المتاحة سواء من الفضاء أو الجو أو الأرض ومعالجتها بسرعة كي تتمكن من الكشف واتخاذ القرار والرد خلال ثوان معدودة.

## الأسلحة الموجهة بالطاقة والاعتراضات الحركية

بينما توفر أسلحة الطاقة الموجهة (DEWs) قدرات اعتراض ثورية بسرعة الضوء، فإن أي دفاع جوي متكامل يجب أن يشمل أيضاً الاعتراضات الحركية المثبتة الفعالية، حيث تُعد أسلحة الطاقة الموجهة مثل "الليزر عالية الطاقة"

(HELs) فعّالة بشكل خاص في تحييد التهديدات السريعة أو الصغيرة أو الهجومية بأعداد كبيرة، وذلك بفضل دقة الاستهداف وقدرتها على إطلاق نيران متكررة بسرعة.

يشير جونسون (2024) إلى أن أسلحة (DEWs) توفر جداول زمنية شبه فورية للاشتباك، وسعة إطلاق عميقة، وتكلفة منخفضة لكل طلقة، عادةً ما تُقاس بالدولارات مقارنة بمئات الآلاف المطلوبة للصواريخ الاعتراضية، ما يجعلها جذابة للغاية لحماية الأصول عالية القيمة تحت هجمات الإغراق.

لقد كشفت الأزمة البحرية الأخيرة في مناطق متنازع عليها عن فجوات كبيرة في استدامة الدفاع الجوي، حيث أنفقت القوات البحرية كميات كبيرة من الذخائر الحركية للتصدي لموجات من الطائرات دون طيار (UAVs) والصواريخ منخفضة التكلفة، ما أثار مخاوف بشأن عمق المخزون وفجوة التكاليف، ورغم أن (DEWs) لم تُستخدم في تلك المواجهة، فقد أشار القادة العسكريون إلى إمكانياتها في التخفيف من هذه المشكلات عبر توفير خيارات دفاعية منخفضة التكلفة وغير محدودة عملياً ضد هجمات الأسراب (Johnson, 2024).

لكن من المهم الإشارة إلى أن أسلحة (DEWs) ليست حلاً سحرياً، إذ يمكن أن تتأثر فعاليتها بعوامل بيئية مثل الأمطار أو الضباب أو الاضطرابات الجوية، علاوة على ذلك، لا تزال أجهزة الليزر عالية الطاقة تتطلب قدرات كبيرة من الطاقة والتبريد، ما يقيد نشرها على المنصات الصغيرة ويجعلها أكثر ملاءمة للقواعد المتقدمة أو السفن الكبيرة.

وهنا يبرز الدور الحاسم للأنظمة الحركية، ففي مايو 2023، نجح نظام باتريوت (PAC-3) في اعتراض صاروخ مصنف ضمن فئة الأسلحة فرط الصوتية وهو أحد الانتصارات القليلة المؤكدة ضد مثل هذا النوع من التهديدات في ساحة المعركة. شكّل هذا الحدث إنجازاً بارزاً، إذ دحض الاعتقاد بأن الأسلحة فرط الصوتية لا يمكن إيقافها، وأظهر القيمة الكبيرة للتتبع الراداري المتقدم، والتوجيه متعدد الطبقات، والقدرة العالية على المناورة للاعتراضات في هزيمة أهداف تتجاوز سرعتها 10 ماخ في المرحلة النهائية. كما مكّن الباحث الراداري النشط وزعانف التحكم المرنة النظام، من تعديل مساره قبل ثوانٍ قليلة من الاصطدام، مؤكداً أهمية الدقة في لحظة الاشتباك الأخيرة.

ومن الجدير بالذكر، أن الأسلحة فرط الصوتية في تطور مستمر، وأن التصدي للتهديدات ذات القدرة العالية على المناورة ومسارات الطيران غير المتوقعة مثل المركبات الانزلاقية فرط الصوتية، حيث يمثل مطلباً متزايد الأهمية للقوات المسلحة. ولمواجهة ذلك، يتعيّن على الاعتراضات الحركية تبني أحدث تقنيات الدفع، وتُعد تقنية توجيه الدفع (Thrust Vector Control) واحدة من أكثر الحلول الواعدة لتحسين قدرة الاعتراضات على المناورة في المرحلة الأخيرة، حيث حققت صواريخ جو - جو مثل (AIM-9X Sidewinder) معدلات نجاح عالية بفضل قدرتها على تغيير اتجاهها أثناء الطيران عبر إعادة توجيه عادم المحرك، أما تقنيات الحقن السائل (Fluid Injection) فتتيح مستويات أكبر من المناورة بزمن استجابة شبه لحظي.

إن مستقبل الدفاع الجوي يجب أن يكون طبقياً وهجيناً. كما هو موضح في الشكل 2، توفر مركبات (DEWs) والاعتراضات الحركية قدرات مختلفة لكنها متكاملة لهزيمة الأسلحة فرط الصوتية. ففي البيئات التي تُنشر فيها (DEWs)، يمكن أن تعمل كخط الدفاع الأول، لكنها لا تقوم بوظيفة الاعتراض بعيد المدى مثل الاعتراضات الحركية. وتبقى الأنظمة الحركية مثل باتريوت وTHAD، و(SM-6) ضرورية لحماية المدن والمواقع عالية الأهمية، خاصةً عندما تتأثر أنظمة الليزر بالظروف الجوية أو قيود خط النظر. فقط من خلال دمج كلا النمطين في بنية منسقة يمكن لنظام دفاعي أن يتكيف مع النطاق الكامل للتهديدات الجوية الحديثة، بما في ذلك الأسلحة فرط الصوتية.

## مجموعات المستشعرات الفضائية

تمثل مجموعات المستشعرات الفضائية أحد أكثر الطول الواعدة للتعامل مع تحديات التتبع التي تفرضها الأسلحة فرط الصوتية، وعلى عكس الصواريخ الباليستية، التي تتبع مسارات يمكن التنبؤ بها نحو الفضاء، تطلق المركبات الانزلاقية فرط الصوتية ضمن الغلاف الجوي العلوي على ارتفاعات وسرعات متغيرة، وغالباً ما تكون أدنى من آفاق الرادار وخارج نطاق أقمار الإنذار المبكر الباليستي التقليدية، وتظل أنظمة الرادار الأرضية فعّالة لكنها مقيدة بخط النظر (LOS)، خصوصاً ضد التهديدات السريعة والمناورة.

وللتغلب على هذه الفجوات، يصبح الانتقال إلى الاستشعار المستمر من الفضاء بالأشعة تحت الحمراء أمراً أساسياً، فالأقمار الصناعية في المدار الأرضي المنخفض (LEO) قادرة على تقديم تصوير حراري عالي الدقة، يمكنه رصد البصمات الحرارية القوية التي تولدها المركبات فرط الصوتية أثناء مراحل الدفع والانزلاق والدخول النهائي. وفي المقابل، توفر المنصات في المدار الثابت بالنسبة للأرض (GEO) تغطية أوسع ومراقبة مستمرة لمناطق ثابتة، مما يجعلها أداة فعّالة للإنذار المبكر الاستراتيجي.

يتضمن برنامج وكالة تطوير الفضاء الأمريكية (SDA) المسمى "بنية الفضاء الموزعة للمقاتل PWSA" طبقة تتبع مخصصة في المدار الأرضي المنخفض، تهدف إلى توفير كشف وتتبع عالمي مستمر للتهديدات الصاروخية المتقدمة، بما في ذلك المركبات الانزلاقية فرط الصوتية. يجري الآن نشر دفعة (Tranche 1)، على أن تُستكمل بدفعة (Tranche 2) بحلول عام 2027، لتوفير بيانات تتبع بالأشعة تحت الحمراء بجودة تمكّن من دعم الدفاع الطبقي (Space Development Agency, 2024).

يشير فونتانا ودي لاورو (2022) إلى أن المستشعرات العاملة بالأشعة تحت الحمراء يمكنها رصد عمليات الإطلاق خلال ثوانٍ، بفضل أعمدة الحرارة الناتجة عن أنظمة الدفع الصاروخي، حتى مع وجود تداخل جزئي من الغلاف الجوي. ويضيف فوردين (2006) بعداً استراتيجياً لهذه الأنظمة، مؤكداً أن المراقبة الفضائية تحسن دقة التتبع وتُسهم في الحد من احتمالية الأزمات الدولية عبر تقليل الإنذارات الكاذبة. ففي حالات الإنذار القصوى السابقة (مثل حادثة نوراو عام 1979)، وفرت المستشعرات الفضائية تأكيداً حاسماً بعدم وجود إطلاقات فعلية. ومن دون ذلك اليقين، كان من الممكن أن تتصاعد الإنذارات الكاذبة إلى صراع نووي. وينطبق المبدأ ذاته على الدفاع ضد الأسلحة فرط الصوتية: فالكشف المبكر والدقيق والمستمر يقلل من احتمالية سوء التقدير ويتيح استجابات أسرع وأكثر تناسباً. علاوة على ذلك، يجب تصميم أنظمة الدفاع الجوي بمسارات تحقق مستقلة وتكرار في المستشعرات، لمنع الإنذارات الكاذبة من إشعال ردود فعل استراتيجية مفرطة.

يساهم ساوتر (2004) برؤية تصميمية مهمة، موضحاً أن هندسة الكوكبة الفضائية تؤثر بشكل مباشر على جداول التغطية ونجاح الاعتراض. وتقتصر دراسته مجموعة في المدار الأرضي المنخفض تتألف من 21 قمراً فقط، موزعة بطريقة تزيد من معدلات إعادة الزيارة وتضمن تداخل مجالات الرؤية للتحقق من المسارات، ويستخدم ساوتر في نماذجه مزيجاً من المدارات الدائرية والبيضاوية، مُحسّنة عبر خوارزميات وراثية، لدعم التتبع في منتصف المسار وتمكين ما يسميه "فرص اعتراض متعددة"، حيث يجري تسليم بيانات التوجيه بين الأقمار حتى مع استمرار مناورة التهديد.

إن دمج مثل هذه المجموعات في بنية "Kill-Web" الأوسع يضمن القدرة على تتبع الصواريخ فرط الصوتية طوال مسار طيرانها الكامل. ويمكن لهذه البيانات الفضائية الفورية أن تُوجّه كلاً من الاعتراضات الحركية وأسلحة الطاقة الموجهة بدقة أكبر بكثير من الرادار وحده. وبهذا تصبح المستشعرات الفضائية عنصراً محورياً ليس فقط في الإنذار المبكر، بل أيضاً في التصحيح أثناء المسار، والتحقق من الأهداف، وتعزيز صمود سلسلة القتل. ومن دونها، يبقى الدفاع الطبقي ضد التهديدات فرط الصوتية ناقصاً.

## نحو بنية متكاملة لشبكة (Kill-Web)

من خلال جمع التحديات الأساسية التي نوقشت في الأقسام السابقة، بدءاً من المسارات غير المتوقعة للأسلحة فرط الصوتية وصولاً إلى القيود على المستشعرات، يجب أن تتطور منظومة الدفاع الجوي المستقبلية إلى نظام متعدد المجالات، يتميز بالمرونة، والقدرة على الصمود، وقائم على مبادئ التكامل والأتمتة والسرعة، وكما هو موضح في الشكل 3، فإن المفهوم المركزي هو بنية شبكة (Kill-Web): شبكة دفاعية موزعة وطبقية، تدمج أجهزة الاستشعار، وعناصر القيادة، والاعتراضات عبر البر والبحر والجو والفضاء لتعمل كآلية استجابة موحدة ضد التهديدات فرط-الصوتية.

تبدأ هذه البنية بالكشف والتتبع المستمر، المدعوم بمجموعة من المستشعرات الفضائية بالأشعة تحت الحمراء في كل من مدارات (LEO) و(GEO) يمكن لهذه المستشعرات رصد البصمات الحرارية القوية للأسلحة فرط الصوتية منذ لحظة الإطلاق وحتى مرحلة الانزلاق النهائية. وللحفاظ على وعي دائم على الرغم من السرعات العالية والمناورات المزاوغة، فإن وجود مستشعرات زائدة عن الحاجة وأنظمة تحقق مستقلة أمر ضروري سواء لتوجيه الاعتراضات أو لتفادي الإنذارات الكاذبة (فوردين، 2006)، فإنها تُعدّ المراقبة الفضائية طبقة دمج بيانات مدعومة بالذكاء الاصطناعي، وتجمع بين الأشعة تحت الحمراء والرادار والتتبع البصري لبناء صورة متماسكة وفورية للتهديد.

في أعقاب ذلك، تُعالج هذه البيانات المدمجة عبر نظام قيادة وسيطرة (C2) آلي يستخدم التحليلات الفورية، والاستهداف التنبؤي، والتكليف الديناميكي، وتشير الأبحاث الحديثة إلى أن هياكل القيادة والسيطرة المعززة بالذكاء الاصطناعي قادرة بشكل متزايد على العمل بسرعة الآلة، وتعزز الضغط باتجاه دورات الكشف إلى الاشتباك، وتقلل من العبء المعرفي البشري في البيئات الحرجة للمهام (SCSP، 2024).

وكما يوضح ماتيراك (2023)، يجب أن تكون هذه الطبقة من القيادة والسيطرة قادرة على اتخاذ القرار ضمن جداول زمنية مضغوطة، تتضمن الكشف، والتصنيف، والقرار، والرد خلال ثوانٍ. ويجب أن تكون قادرة أيضاً على تكليف الاعتراضات المناسبة بالمهام حيويًا، آخذةً في الاعتبار الظروف البيئية، وتغطية المستشعرات، وهندسة التهديد. ومع ذلك، فإن تحقيق التنسيق الكامل بسرعة الآلة عبر مختلف المجالات يتطلب درجة غير مسبوقه من قابلية التشغيل البيئي والأتمتة، إذ غالباً ما تكافح المنصات القديمة لمشاركة بيانات المستشعرات أو تنفيذ ردود مشتركة ضمن الجداول الزمنية القصيرة التي تفرضها التهديدات فرط الصوتية (GAO، 2023).

وفيما يتعلق بالاشتباك، تنشر هذه البنية مزيجاً متعدد الطبقات من الاعتراضات. في المدى المتوسط، تتولى الاعتراضات الحركية مثل منظومة ناد و(SM-6)، أو صواريخ المناورة الأخرى معظم محاولات الاعتراض. أما في المرحلة النهائية، فيوفر مزيج من الأنظمة الحركية مثل (Patriot)، و(NASAMS)، وأسلحة الطاقة الموجهة دفاعاً نقطياً.

إن أسلحة الطاقة الموجهة غير مصممة للاعتراض بعيد المدى، لكنها تتفوق في الاشتباكات القصيرة إلى متوسطة المدى (عادة 5-10 كم)، حيث يمكنها تحييد التهديدات السريعة أو الهجومية بأعداد كبيرة وبزمن استجابة منخفض وسعة إطلاق عميقة. تتحقق فعاليتها بشكل أفضل في بيئات مثل المناطق الحضرية أو المنصات البحرية أو القواعد الجوية، حيث تكمل الأنظمة الحركية في التعامل مع هجمات الإغراق أو اعتراض التهديدات في المرحلة النهائية.

وتظل الاعتراضات الحركية ضرورية للاشتباكات الأخيرة ضد التهديدات فرط الصوتية المناورة، كما برهنت على ذلك عملية اعتراض ناجحة بصاروخ باتريوت ضد سلاح مصنع ضمن فئة فرط الصوتية. هذه الطبقة الحركية أساسية في الظروف التي قد تتأثر فيها أسلحة الطاقة بعوامل الغلاف الجوي أو قيود الطاقة.

وباختصار، فإن "شبكة القتل" ليست معرّفة بإنجاز واحد منفرد، بل بتزامن العديد من الأنظمة المترابطة: الاستشعار الفضائي، الدمج المعزز بالذكاء الاصطناعي، القيادة والسيطرة التكييفية، والاعتراضات الطبقية. إنها تستبدل سلسلة القتل الخطية القديمة بشبكة دفاعية غير خطية، محايدة للمجالات، تمكّن استجابات سريعة ومرنة وموثوقة لأحد أكثر التهديدات تعقيداً في العصر الحديث. هذا التكامل الشامل هو فقط ما يمكّن الدفاع الجوي من التطور لمجاراة سرعة وارتفاع وعدم القدرة على التنبؤ للأسلحة الفرط صوتية.

### الخاتمة: التداعيات الاستراتيجية والتوصيات

تعيد الأسلحة فرط الصوتية تشكيل ساحة المعركة، حيث تشكل ضغطاً على الجداول الزمنية للاستجابة، وتتجاوز النماذج التقليدية للدفاع الصاروخي الخطي. أظهر هذا البحث أن البنية الشبكية الموزعة والمعززة بالذكاء الاصطناعي، والمرتكزة على الاستشعار المستمر متعدد المجالات والقدرات الطبقية، تمثل المسار الأكثر واقعية لمواجهة هذه الفئة من التهديدات.

تتمثل المتطلبات التشغيلية الناشئة عن هذا التحليل في ثلاثة محاور: الاستثمار في المراقبة الدائمة متعددة المدارات، ودمج المستشعرات المعزز بالذكاء الاصطناعي للحفاظ على تتبع مستمر للتهديدات فرط الصوتية عبر مسارها الكامل، وتطوير وسائل طبقية متكاملة تجمع بين أسلحة الطاقة الموجّهة للدفاع القريب منخفض التكلفة مع الاعتراضات الحركية لمرحلة المدى المتوسط والنهائي، وأتمتة القيادة والسيطرة الموزعة المركزة على الشبكات، مع بقاء الإنسان ضمن حلقة الإشراف، بما يتيح اتخاذ القرارات بسرعة الآلة في ظل ضغط زمني شديد، مع الحفاظ على سلطة القيادة المسؤولة.

يأعطاء الأولوية لهذه القدرات، يمكن لشبكات الدفاع الجوي المستقبلية أن تتحول من هياكل تفاعلية ضعيفة، وخطية، إلى شبكات موزعة ومرنة واستباقية قادرة على ردع وهزيمة التهديدات فرط-الصوتية من الجيل التالي. وبهذا، وعليه فإن نموذج "شبكة القتل" لا يحافظ على الصلة العملية فحسب، بل يحدد أيضاً الركيزة الأساسية للدفاع الجوي والصاروخي المتكامل في القرن الحادي والعشرين.

### المراجع

Cooper, J. (2018) 'Russia's invincible weapons: today, tomorrow, sometime, never?'; Changing Character of War Centre Occasional Paper, Pembroke College, University of Oxford.

Drummond, J.P., Bouchez, M. and McClinton, C.R. (2006) 'Overview of NATO background on scramjet technology', NASA Technical Report, NASA Technical Reports Server.

Fontana, S. and Di Lauro, F. (2022) 'An overview of sensors for long-range missile defence', Sensors, 22(24), 9871. <https://doi.org/10.3390/s22249871>

Fornden, G. (2006) 'A constellation of satellites for shared missile-launch surveillance', MIT Program on Science, Technology and Society Working Paper, pp. 1–21.

Haidn, O.J. (2008) 'Advanced rocket engines', in Advances on Propulsion Technology for High-Speed Aircraft. Paper 6. Neuilly-sur-Seine: NATO Research and Technology Organisation, pp. 1–40.

Hofacker, C. (2024) 'Putting Starship's plasma in perspective', Aerospace America, 1 April. Available at: <https://aerospaceamerica.aiaa.org> (Accessed: 8 July 2025).

Johnson, B. (2024) 'The coming of age of directed-energy weapons and the Red Sea crisis', Center for International Maritime Security – Red Sea Topic Week, pp. 1–12.

MacDonald, T. (2025) 'Tracking mobile missiles', *Journal of Strategic Studies*, 48(2), pp. 297–333. <https://doi.org/10.1080/01402390.2024.2435961>

Materak, W. (2023) 'The evolution of air threats in future conflicts', *Safety & Defense*, 9(1), pp. 24–30.

Sauter, L. (2004) 'Satellite constellation design for mid-course ballistic-missile intercept', MSc thesis, Massachusetts Institute of Technology.

Siva, V. (2018) 'Theoretical investigation of liquid-propellant rocket-engine performance', *International Journal of Engineering Research and Applications*, 8(3), pp. 38–41.

Space Development Agency (2024) Tracking Layer Fact Sheet, Proliferated Warfighter Space Architecture (PWSA), August.

Available at: <https://www.sda.mil/wp-content/uploads/2024/09/Tracking-Layer-Fact-Sheet.pdf> (Accessed: 29 July 2025).

Special Competitive Studies Project (SCSP) (2024) Reimagining Military C2 in the Age of AI, SCSP Defense Paper Series.

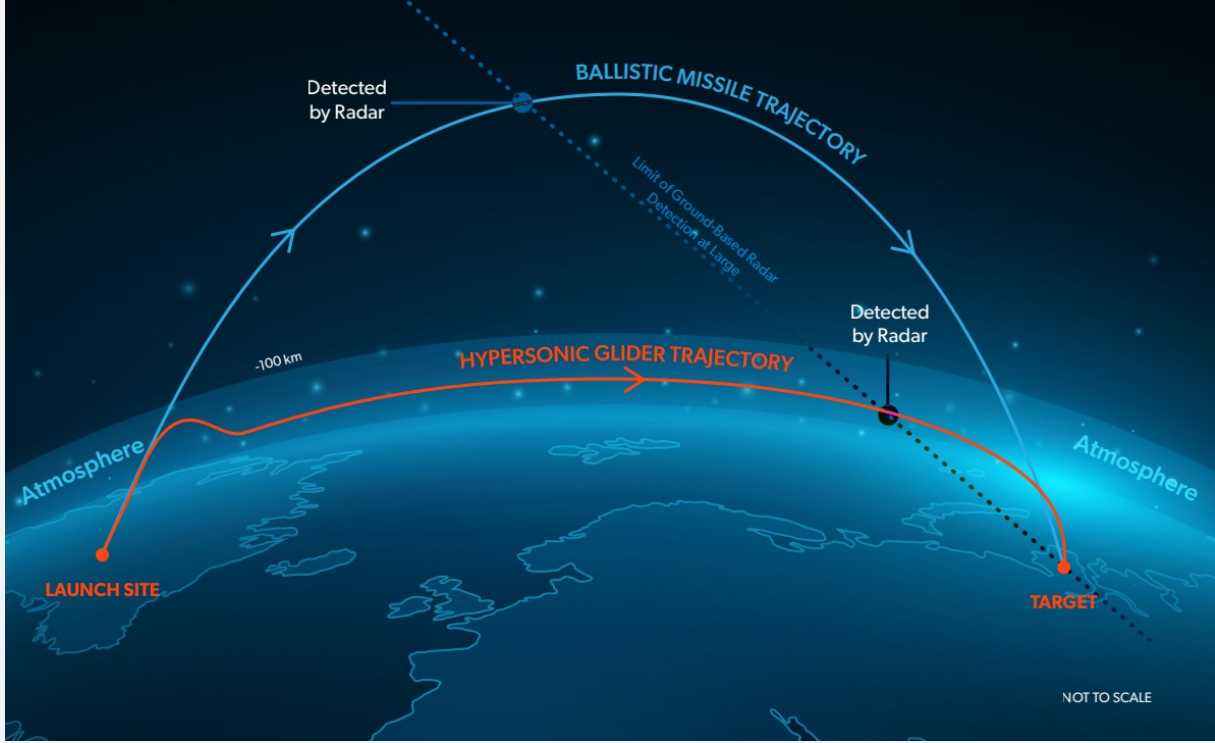
Available at: <https://www.scsp.ai/wp-content/uploads/2024/12/DPS-Reimagining-Military-C2-in-the-Age-of-AI.pdf> (Accessed: 29 July 2025).

U.S. Government Accountability Office (GAO) (2025) Defense Command and Control: Further Progress Hinges on Establishing a Comprehensive Framework, GAO-25-106454. Available at: <https://files.gao.gov/reports/GAO-25-106454/index.html> (Accessed: 29 July 2025).

Waltrup, P.J., White, M.E., Zarlingo, F. and Gravlin, E.S. (2002) 'History of U.S. Navy ramjet, scramjet, and mixed-cycle propulsion development', *Journal of Propulsion and Power*, 18(1), pp. 14–22. <https://doi.org/10.2514/2.5955>

Zohuri, B., McDaniel, P., Lee, J. and Rodgers, C.J. (2019) 'New weapon of tomorrow's battlefield driven by hypersonic velocity', *Journal of Energy and Power Engineering*, 13(5), pp. 177–196. <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2019.05.002>

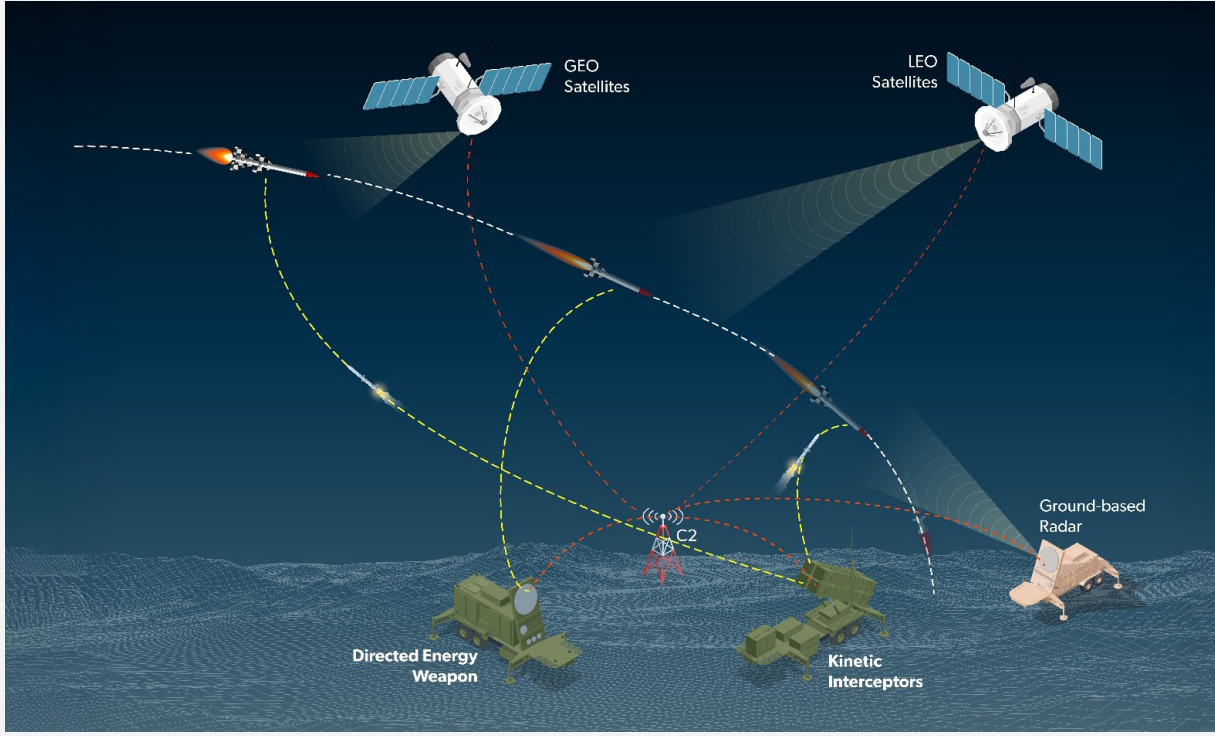
## المرفقات



الشكل 1: رسم يوضح مناطق العمى الرادارية في كشف وتتبع مسارات الصواريخ باليستية والمركبات الانزلاقية فرط الصوتية.

اعتراضات المرحلة الأخيرة	الميزة	أسلحة الطاقة الموجّهة (DEWs)
تأثير حركي عبر صواريخ موجهة أو مقذوفات	آلية العمل	تستخدم طاقة مركزة (مثل الليزر أو الموجات الميكروية) لتعطيل الأهداف
ثوانٍ (تختلف حسب سرعة الصاروخ ومدى الاعتراض)	سرعة الاشتباك	شبه لحظية (بسرعة الضوء)
مرتفعة (قد تتجاوز مليون دولار لكل صاروخ)	تكلفة الطلقة	منخفضة للغاية (مثال: نحو 12 دولار لكل طلقة ليزر)
محدودة (مرتبطة بعدد الصواريخ المحمولة)	سعة الذخيرة	غير محدودة تقريباً (مقيدة بإمداد الطاقة)
منخفضة — عموماً أقل تأثراً بالطقس	الحساسية للطقس	عالية — الأداء يتدهور في الضباب أو المطر أو الغبار
متوسطة إلى طويلة (بحسب نوع الصاروخ)	المدى التشغيلي	قصيرة إلى متوسطة (يتطلب خط رؤية مباشر)
احتمال حدوث شظايا وآثار انفجارية	الأضرار الجانبية	ضئيلة — لا حطام انفجاري
تتطلب إعادة تزويد بالصواريخ وصيانة منصات الإطلاق	الصيانة والدعم اللوجستي	تتطلب أنظمة تبريد وتوليد طاقة عالية
ناضجة، ومنتشرة على نطاق واسع ومجربة ميدانياً	النضج والانتشار	ناشئة، نماذج أولية ونشر محدود
صواريخ كروز، التهديدات الباليستية، الطائرات	الأهداف المثالية	الطائرات المسيّرة، الذخائر المتحركة، المقذوفات الصغيرة

الشكل 2: جدول يقارن بين القدرات والخصائص لأسلحة الطاقة الموجّهة (DEWs) والاعتراضات الحركية في المرحلة الأخيرة.



الشكل 3: بنية مفهوم "شبكة القتل" متعددة الطبقات للدفاع ضد الصواريخ فرط الصوتية.