

التقارب بين الفضاء والأنظمة الفرط صوتية: إعادة تعريف القوة الجوية الاستراتيجية في القرن الحادي والعشرين

د. كاثيرافان ثانغافيل، نورالدين صفوت، روبرتو ساباتيني – قسم هندسة الطيران والفضاء، جامعة خليفة للعلوم والتكنولوجيا، أبوظبي، الإمارات العربية المتحدة

إن ظهور الأنظمة الفرط صوتية، القادرة على الطيران المستمر بسرعات تتجاوز ماخ 5، يقدم فرصاً فريدة وتحديات عميقة للأمن والدفاع العالمي، إن سرعتها الفائقة، وقدرتها العالية على المناورة، وإمكانية عملها ضمن نطاق أنظمة الدفاع الجوي التقليدية أو تجاوزها كلياً، تفرض تحوُّلاً جذرياً في مفاهيم القوة الجوية الاستراتيجية. تتناول هذه الورقة البحثية تحديات "التقارب بين الفضاء والأنظمة الفرط صوتية"، وتؤكد أن التكامل السلس بين المنصات الفضائية والقدرات الفرط صوتية لا يُعد مجرد تحسين تدريجي، بل يمثل قفزة تحويلية جديدة في فاعلية القدرات العسكرية. ويستند الطرح إلى أن تحقيق الاستخبارات والمراقبة والاستطلاع (ISR) الفعال، والدفاع الصاروخي المرن، والردع الموثوق في عصر الأنظمة الفرط صوتية، يعتمد أساساً على دمج مجالي الجو والفضاء في نطاق عملياتي موحد. تطل الدراسة كيف يمكن لدمج بيانات الاستشعار، بالاعتماد على شبكة من الأصول المدارية، تجاوز التحديات الجوهرية في كشف وتتبع التهديدات الفرط صوتية، بما يتيح وعياً موقعياً أنياً ضرورياً لاتخاذ القرار. كما تُناقش مفهوم «الاصطفاف المداري» للضربات الدقيقة، مبرزةً إمكاناته في تمكين الاستجابة العالمية السريعة وتعقيد استراتيجيات منع الوصول أو الحرمان من المنطقة (A2/AD) لـدي الخصوم. وأخيراً، تتناول الورقة التحديات الكبرى أمام منظومة القيادة والسيطرة (C2) التي تفرضها سرعات الأنظمة الفرط صوتية، بما في ذلك الحاجة إلى الأتمتة المتقدمة، والذكاء الاصطناعي، وشبكات الاتصالات المرنة لتطويع حلقة الملاحظة والتوجيه والقرار والتنفيذ (OODA) التقليدية وضمان الاستجابة العملية الفعّالة في بيئات النازع عالية الوتيرة. إن هذا التقارب يُعد بوابة لإعادة تشكيل المشهد العملي، بما يتطلب تطوراً متوازياً في التقنيات والمفاهيم العملية عبر مجالي الجو والفضاء.

الكلمات المفتاحية

الأنظمة الفضائية، الأنظمة الفرط صوتية، أنظمة الدفاع، المنصات الفضائية، القوة الجوية الاستراتيجية، ISR (الاستخبارات والمراقبة والاستطلاع)، الدفاع الصاروخي.

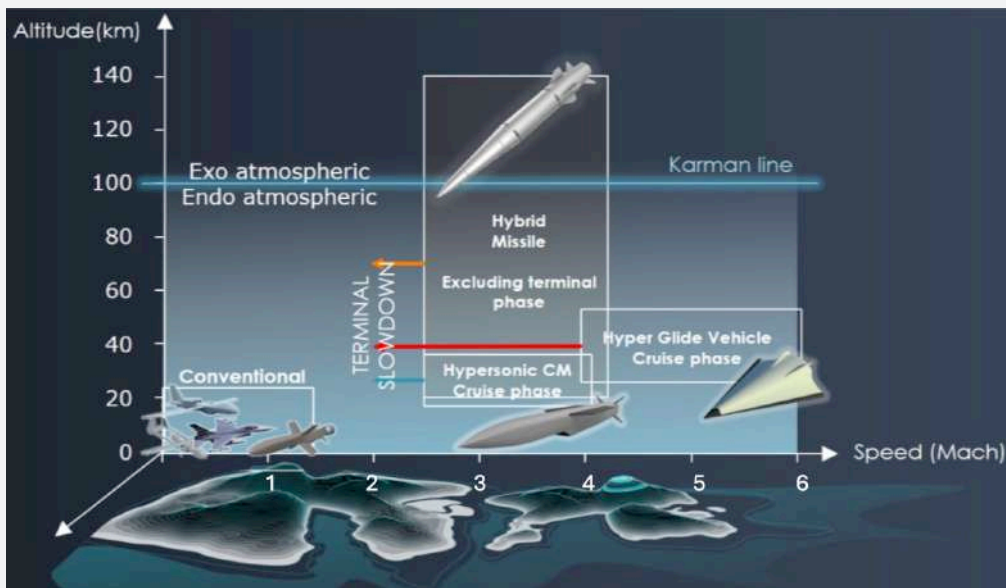
1. المقدمة

يخضع المشهد الأمني العالمي في القرن الحادي والعشرين إلى تحولات عميقة، تقوده إلى حد كبير التطورات السريعة والانتشار الواسع للأنظمة الفرط صوتية. تُعرّف هذه الأنظمة بقدرتها على الطيران المستمر بسرعات تتجاوز 5 ماخ، وهو ما يضيف بُعداً جديداً للقوة الجوية الاستراتيجية، حيث يقدم فرصاً غير مسبوقة وتحديات جسيمة في آن واحد (Schmisseur, 2015). بخلاف الصواريخ الباليستية التقليدية، تُظهر الأسلحة الفرط صوتية قدرة استثنائية على المناورة طوال مسارها، مما يجعل مساراتها غير قابلة للتنبؤ ويعقد بشكل كبير جهود اعتراضها (Belous & Saladukha, 2020). علاوة على ذلك، تستغل العديد من الأنظمة الفرط صوتية ثغرات درجة في قدرات الكشف، إذ تعمل على ارتفاعات أقل من أنظمة الإنذار المبكر التقليدية وأعلى من أنظمة الدفاع

الجوي المعتادة (Little, 2024). يوضح الشكل (1) تصنيف المنصات الفرط صوتية ضمن مجالي السرعة والارتفاع، مُبرِّزاً نطاقاتها التشغيلية مقارنة بالأنظمة التقليدية، فيما يعرض الشكل (2) نماذج للمركبات الفرط صوتية. إن هذا المزيج الفريد من السرعة الفائقة، والقدرة على المناورة، والقدرات الشبكية، يستدعي إعادة تقييم جذرية للهياكل الدفاعية الحالية والعقائد الاستراتيجية (Finabel, 2025; Little, 2024).

تفترض هذه الدراسة أن التكامل السلس بين المنصات الفضائية والقدرات الفرط صوتية، والذي يُطلق عليه هنا "التقارب بين الفضاء والأنظمة الفرط صوتية"، لا يُمثل مجرد تقدم تقني تدريجي، بل يشكّل قفزة تحويلية في الفعالية العسكرية. ويُعد هذا التقارب أمراً حيويًا لتعزيز قدرات الاستخبارات والمراقبة والاستطلاع (ISR)، وتمكين أنظمة الدفاع الصاروخي المرن، وضمان الردع الموثوق في عصر تتزايد فيه التهديدات الفرط صوتية. وتتمثل الحجة المركزية التي تطرحها هذه الدراسة في أن إنشاء مجال عمليات موحّد يجمع بين الجو والفضاء يُعدّ أمراً لا غنى عنه لمواجهة التحديات المميزة التي تفرضها هذه الأنظمة المتقدمة وذلك نحو مماثل لأطر إدارة الحركة متعددة المجالات (MDTM) المقترحة للعمليات الجوية والفضائية المتكاملة. (Thangavel et al., 2025a; Thangavel et al., 2021b)

وعليه، تفترض هذه الدراسة أن التقارب بين الفضاء والأنظمة الفرط صوتية يمتلك القدرة على إعادة صياغة المشهد العملياتي، بما يستلزم تطويراً مبتكراً في القيادة، وتجديداً في الابتكار التكنولوجي، ومفاهيم تشغيلية متكاملة عبر مجالي الجو والفضاء من أجل حماية الاستقرار الاستراتيجي وضمان التفوق. وفي هذا الإطار، تقوم الدراسة بتركيب المعارف القائمة والمفاهيم الناشئة حول التقارب الفضائي الفرط الصوتي. ومنهجياً، تعتمد على مراجعة شاملة للأدبيات وتحليل تركيب مفاهيمي، مستندة إلى مصادر أكاديمية وعلمية ودفاعية متاحة للعامّة. كما يُمكن هذا النهج من دمج مصادر متنوعة لبناء حجة متماسكة حول التداعيات الاستراتيجية والمتطلبات التكنولوجية للتقارب. ومن خلال استناد حججه المفاهيمية إلى الأدبيات والدراسات القائمة، مع تحديد المسارات المستقبلية، تهدف الدراسة إلى تعزيز الفهم للإطار المفاهيمي الناشئ الخاص بالتقارب بين الفضاء والأنظمة الفرط صوتية.



الشكل 1: أنماط مسارات الطيران والمطلات العملياتية لأنواع المنصات الفرط صوتية المختلفة (مجموعة تاليس، 2024).



(Credit: AIAA High-Speed Task Force - All images taken from the Internet)

الشكل 2: مفاهيم المركبات الطائرة داخل الغلاف الجوي عالية السرعة (Sabatini وآخرون، 2024).

2. الأنظمة الفرط صوتية: القدرات والتحديات

تمثل الأنظمة الفرط-صوتية قفزة كبيرة في التكنولوجيا العسكرية، حيث تتميز بقدرتها على تحقيق تطبيق مستدام بسرعات تتجاوز 5 ماخ. وتشمل القدرات الأساسية لهذه الأنظمة: السرعة الفائقة، والقدرة العالية على المناورة، والتطبيق على ارتفاعات منخفضة، فضلاً عن إمكانية تنفيذ ضربات دقيقة (Finabel, 2025; Little, 2024). كما تتيح هذه الأنظمة التغطية السريعة لمسافات شاسعة وتقلص بشكل كبير أزمته استجابة الخصوم. وعلى عكس الصواريخ الباليستية التقليدية ذات المسارات القطعية المكافئة القابلة للتنبؤ، فإن مركبات الانزلاق الفرط صوتية (HGV) وصواريخ كروز الفرط صوتية (HCM) تتمتع بقدرتها على المناورة طيلة مسارها، مما يجعل اعتراضها شديد التعقيد ويزيد من فرص بقائها. كما يتم إطلاق مركبات الـ HGV عبر معززات صاروخية إلى الغلاف الجوي الخارجي، حيث يمكنها الانزلاق بدون دفع فعال اعتماداً على التوجيه بالأقمار الصناعية، بينما تعمل صواريخ الـ HCM المزودة بمحركات نفاثة للاحتراق الفرط صوتي (Scramjet) على ارتفاعات جوية منخفضة ويمكن إطلاقها من منصات جوية أو برية أو بحرية. تتراوح الارتفاعات العملية النموذجية بين 20 - 30 كم لصواريخ HCM و40 - 100 كم لمركبات HGV، مستفيدة من ثغرة الكشف الناتجة عن التحليق أسفل رادارات الإنذار المبكر الباليستية وأعلى من نطاق تغطية الدفاعات الجوية التقليدية. علاوة على ذلك، فإن قدرتها على حمل رؤوس تقليدية أو نووية بدقة عالية تضاعف من فاعليتها القتالية وأهميتها الاستراتيجية. إن هذه السرعة الفائقة، إلى جانب المناورة المتقدمة، تُغيّر بشكل جذري ديناميكيات القوة الجوية الاستراتيجية وتطرح تحديات فريدة أمام الهياكل الدفاعية القائمة. وتُعرض أهم الإنجازات التكنولوجية في تطوير المركبات/الصواريخ الفرط-صوتية في الجدول 1.

الجدول 1: الإنجازات الرئيسية في الأنظمة الفرط صوتية

المرتبطة/البرنامج	الأهمية	السنة/العقد	الإنجاز
X-15	أنجزت بواسطة X-15، مثبتة قدرة الإنسان على التحمل وجامعة بيانات حاسمة حول ديناميكا الهواء في نطاقات الماخ العالية، وإدارة الحرارة، والتحكم.	1959	أول رحلة فرط صوتية مأهولة
Navaho	الجهود المبكرة في برامج مثل Navaho ساهمت في فهم تشغيل محركات الرامجت وحدودها عند السرعات العالية.	خمسينات القرن الماضي	اختبار دفع الرامجت
AS-BM	أبحاث مركبات إعادة دخول الصواريخ الباليستية (AS-BM) أدت إلى تطورات كبيرة في أنظمة الحماية الحرارية للأجسام الداخلة إلى الغلاف الجوي بسرعات فرط-صوتية.	ستينات القرن الماضي	تصميم متقدم لمركبات إعادة الدخول
NASP, X-43A	اختبارات أرضية واسعة وأعمال نظرية أرست الأساس لتصاميم عملية لمحركات السكريمجت، عالجت تحديات الاحتراق فوق الصوتي.	1990s-1980s	اختبار أرضي لمحرك السكريمجت
X-43A	حقق X-43A سرعة 9.6 ماخ ، مثبتاً بشكل قاطع جدوى الدفع الهوائي بمحركات السكريمجت، مما أعاد إشعال الاستثمارات الكبيرة في هذا المجال.	2004	أول رحلة مستمرة بمحرك سكريمجت
HTV-2	اختبارات الطيران لمركبات مثل HTV-2 أثبتت جدوى الانزلاق الفرط-صوتي عالي المناورة، مؤكدة صلاحية الأشكال الديناميكية المتقدمة وأنظمة الحماية الحرارية.	2010s-2000s	التحقق من ديناميكيات الانزلاق المدفوع
DF-ZF, Avangard	بروز أنظمة مثل DF-ZF و Avangard أظهر التكامل الناجح لتقنيات التوجيه والملاحة والتحكم (GNC) والمواد والديناميكا الهوائية لإنشاء مركبات انزلاق تشغيلية عالية المناورة قادرة على الإفلات من الدفاعات التقليدية.	2010s	تشغيل مركبات المناورة HGV
Zircon, HAWC	نشر Zircon و HAWC أظهر الانتقال الناجح لتكنولوجيا السكريمجت من إثبات المفهوم التجريبي إلى أنظمة أسلحة تشغيلية مستدامة فرط صوتية ضمن الغلاف الجوي.	2020s	صاروخ كروز سكريمجت تشغيلي

على الرغم من قدرات المتقدمة للأنظمة الفرط صوتية ، فإنها تطرح عدة تحديات جوهرية على الأمن العالمي والاستقرار الاستراتيجي (Shepard، 2025 ؛Little، 2024 ؛Finabel، 2025):

• **قيود الكشف:** تم تصميم أنظمة الإنذار المبكر الحالية أساسًا لرصد مسارات الصواريخ الباليستية، ولذلك تواجه صعوبة في اكتشاف المسارات غير المتوقعة للأسلحة الفرط صوتية. كما أن تطبيق هذه الأنظمة على ارتفاعات منخفضة يُعيق قدرة الرادار على رصد الإطلاقات وتقديم إنذارات مبكرة.

• **صعوبات التتبع:** إن الجمع بين السرعة الفائقة، والقدرة على المناورة، والطيران في الغلاف الجوي يخلق تحديات دائمة للأنظمة الاستشعار الحالية، إذ يجعل الحفاظ على التعقب المستمر لأهداف بهذه القدرة العالية على المناورة مهمة معقدة للغاية.

• **دورات اتخاذ القرار المضغوطة:** تؤدي السرعة غير المسبوقة للهجمات الفرط صوتية إلى تقليص كبير في الأثر الزمنية لاتخاذ القرار لدى القيادات، مما قد يقلل نافذة الاستجابة من ساعات إلى دقائق معدودة فقط. وهذا يفرض ضغطًا هائلًا على المؤسسات العسكرية.

• **نوافذ الاعتراض:** تؤدي الأثر الزمنية القصيرة جدًا بين لحظة الكشف ولحظة الاصطدام إلى التأثير بشكل كبير على فرص الاعتراض الناجح بواسطة الأنظمة الدفاعية الحالية. ولا تمتلك أي دولة حاليًا نظامًا دفاعيًا أو راداريًا مضادًا للصواريخ الفرط-صوتية يتمتع بقدرات تشغيلية متكاملة وفعالة.

• **مخاطر سوء التفسير:** صعوبة تحديد نوع الرأس الحربي (تقليدي أم نووي) في السلاح الفرط صوتي مُطلق قد تؤدي إلى سوء تفسير خطير للنوايا، مما قد يُصعد صراعًا تقليديًا إلى نووي. كما أن طمس الخطوط الفاصلة بين الأسلحة التقليدية والاستراتيجية يزيد من خطر التصعيد النووي والحروب الاستباقية.

• **ضغوط "استخدمه أو أخسره":** المخاوف من الضربات الاستباقية ضد الترسانات الفرط-صوتية قد تخلق حوافز للاستخدام المبكر أثناء الأزمات، مما يزعزع استقرار سيناريوهات الصراع بشكل أكبر.

• **معادلة تبادل التكلفة:** تطوير أنظمة دفاعية قادرة على مواجهة التهديدات الفرط-صوتية يتطلب عادةً تكاليف أعلى بكثير من الأنظمة الهجومية التي صُممت لمواجهةها، مما يخلق معادلة غير مواتية لتبادل التكلفة.

• **مخاوف الانتشار:** التطوير السريع ونشر الأسلحة الفرط-صوتية من قبل القوى الكبرى ، (مثل الولايات المتحدة، وروسيا، والصين) ، مع زيادة استثمارات القوى المتوسطة أيضًا ، يُحفّز سباق التسلح عالميًا. وهذا يثير مخاوف من انتشار هذه التقنيات إلى دول إضافية وربما إلى جهات غير حكومية، مما يقوض الاستقرار الإستراتيجي بشكل أكبر.

معالجة هذه التحديات تتطلب اتباع نهج مبتكر يتجاوز نماذج الدفاع الجوي والصاروخي التقليدية، مع التأكيد على الدور الحاسم للأصول الفضائية والخصائص الرئيسية للأنظمة الفرط-صوتية، كما هو موضح في الجدول 2.

الجدول 2: الخصائص الرئيسية لأنظمة الأسلحة الفرط صوتية.

الخاصية	الوصف	الانعكاس الإستراتيجي
السرعة الفائقة	سرعات تتجاوز 5 ماخ.	تضغط بشكل كبير جداول اتخاذ القرار لدى الخصوم، مما يقلل نوافذ الاستجابة إلى دقائق معدودة.
القدرة العالية على المناورة	القدرة على تغيير المسار أثناء الطيران، بخلاف الصواريخ الباليستية.	المسارات غير المتوقعة تعقد جهود الكشف والاعتراض، مما يزيد من فرص البقاء.
ملف الطيران على ارتفاع منخفض	تعمل على ارتفاعات أقل من أنظمة الإنذار المبكر ولكن أعلى من الدفاعات التقليدية.	تستغل فجوة الكشف، مما يعيق قدرة الرادار على توفير إنذار مبكر.
قدرة الضربة الدقيقة	توصيل رؤوس حربية تقليدية أو نووية بدقة عالية.	يعزز الفتك والتأثير الاستراتيجي المحتمل، ويزيد من طمس الخطوط الفاصلة بين الأسلحة التقليدية والاستراتيجية.
أنواع الدفع	مركبات انزلاق فرط-صوتية (HGVs) تُطلق بواسطة معززات صاروخية ثم تنزلق. صواريخ كروز فرط-صوتية (HCMs) تستخدم محركات نفاثة فائقة الاحتراق (سكرامجت).	توفر الـ HGVs مدى طويل ودقة، بينما توفر الـ HCMs طيراناً على ارتفاع منخفض ولكن بمدى أقصر.

3. المنصات الفضائية: تمكين القوة الجوية الاستراتيجية

تُعد المنصات الفضائية أصولاً أساسية للعمليات العسكرية الحديثة، إذ توفر مجموعة واسعة من القدرات التي تدعم الميزة الاستراتيجية. تعمل هذه الأنظمة المدارية كـ "العيون والآذان ووسائل الاتصال الممتدة" للدول، ما تؤثر بعمق على القرارات الاستراتيجية وفعالية العمليات. وتوفر الأقمار الصناعية العسكرية وغيرها من الأنظمة الفضائية قدرات حاسمة (انظر الجدول 1) عبر عدة مجالات (NewSpace Economy، 2025).

• **الاستخبارات والمراقبة والاستطلاع (ISR):** توفر أقمار الاستطلاع ومراقبة الأرض استخبارات تصويرية (بصرية، رادارية، تحت الحمراء)، بالإضافة إلى المراقبة، والرصد، ورسم الخرائط، وتقييم أضرار المعارك. كما تعترض أقمار الاستخبارات الإشعاعية (SIGINT) الإشارات الإلكترونية الأجنبية وتحللها لجمع المعلومات الاستخباراتية. وتُعد هذه القدرات ضرورية لتكوين صورة شاملة عن بيئة العمليات (Naval Information Warfare Center Pacific، 2025).

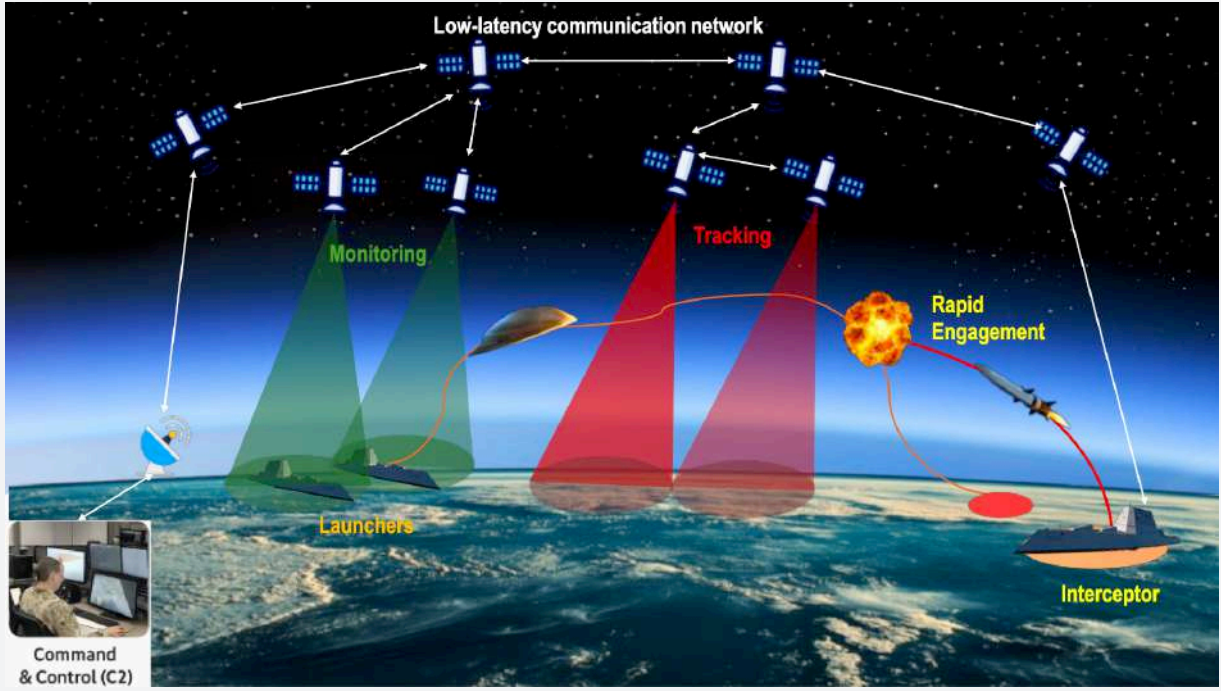
الجدول 3: القدرات الرئيسية للمنصات الفضائية العسكرية

نوع القمر الصناعي	الوظائف الأساسية	المدارات النموذجية	الأهمية الاستراتيجية
الاستطلاع / مراقبة الأرض	استخبارات تصويرية (بصرية، رادارية، تحت الحمراء)، مراقبة، رصد، رسم خرائط، وتقييم أضرار المعارك.	مدار أرضي منخفض (LEO)، مدار ثابت بالنسبة للأرض (GEO)	يوفر وعياً شاملاً بالموقف ومعلومات استخباراتية لدعم القرارات الاستراتيجية.
الاتصالات (MILSATCOM)	نقل آمن للصوت/البيانات/الفيديو، القيادة والسيطرة (C2)، الاتصال العالمي للقوات المنتشرة.	LEO, MEO, GEO	يضمن اتصالات آمنة ومرنة للقوات المنتشرة وقياداتها.
الملاحة (PNT)	تحديد المواقع والملاحة والتوقيت بدقة، توجيه الذخائر الموجهة بدقة، المزامنة للشبكات.	مدار متوسط الارتفاع (MEO)	ضروري لتوجيه الأسلحة الدقيقة وتنسيق العمليات العسكرية المعقدة.
الإنذار المبكر	كشف إطلاق الصواريخ الباليستية والفرط-صوتية، تتبع المسار، إنذار إستراتيجي/تكتيكي.	HEO, MEO, GEO	يوفر إنذاراً حاسماً ضد التهديدات لصاروخية، مما يمكن من الاستجابة الدفاعية.
الاستخبارات الإشارية (SIGINT)	اعتراض وتحليل الإشارات الإلكترونية الأجنبية (اتصالات، رادارات، قياسات) لجمع المعلومات.	GEO, MEO, LEO	يعزز جمع المعلومات وفهم قدرات الخصم.
الوعي بالفضائي (SSA/SDA)	تتبع الأقمار الصناعية والحطام، مراقبة البيئة الفضائية، توصيف الأجسام الفضائية ونواياها.	MEO, LEO, GEO	يحمي الأصول الفضائية ويوفر فهماً لمجال المدارات لأغراض التخطيط الإستراتيجي.
الطقس (الأرصاد الجوية)	رصد أنماط الطقس، غطاء السحب، الظروف الجوية، حالة المحيطات لدعم العمليات العسكرية.	GEO, LEO	يدعم العمليات العسكرية من خلال توفير بيانات بيئية أساسية للتخطيط والتنفيذ.

• **الإبذار الصاروخي:** صُممت أقمار الإذار المبكر لاكتشاف إطلاق الصواريخ باليستية والفرط-صوتية، وتتبع مساراتها، وتوفير إنذارات استراتيجية وتكتيكية.

• **الرصد البيئي:** تقوم الأقمار الصناعية الخاصة بالطقس برصد أنماط الطقس، وغطاء السحب، والظروف الجوية، وحالة المحيطات، بما يدعم العمليات العسكرية من خلال توفير بيانات بيئية حيوية.

• **اتصالات الأقمار الصناعية (SATCOM):** توفر أنظمة الاتصالات العسكرية عبر الأقمار الصناعية (MILSATCOM) نقلًا آمنًا للصوت والبيانات والفيديو، مما يمكن من قيادة وسيطرة (C2) قوية واتصال عالمي للقوات المنتشرة. وتقدم أنظمة مثل (Mobile User Objective System (MUOS و(Protected Tactical Waveform (PTW) قدرات اتصالات متقدمة ومرونة وكفاءة في استخدام النطاق الترددي (Naval Information Warfare Center Pacific, 2025).



الشكل 3: هيكلية دفاع فرط صوتية متعددة الطبقات تتكون من طبقة للرصد، وطبقة للتتبع، وطبقة لشبكة اتصالات منخفضة الكمون.

• **الملاحة والتوقيت وتحديد المواقع (PNT):** تسمح أقمار PNT الصناعية، مثل نظام تحديد المواقع العالمي (NAVSTAR GPS)، للقوات العسكرية بتحديد الموقع بدقة، والملاحة الفعالة عبر البر والبحر والجو، ومزامنة العمليات بدقة عالية، وتُعد هذه البيانات أساسية لتوجيه الذخائر الدقيقة وتنسيق تحركات القوات.

• **(SDA) الوعي بالمجال الفضائي / (SSA) الوعي بميدان الفضاء:** تقوم هذه الأقمار الصناعية بتتبع الأقمار الصناعية الأخرى والحطام الفضائي، ومراقبة بيئة الفضاء، وتوصيف الأجسام الفضائية ونواياها، وهو أمر بالغ الأهمية لحماية الأصول الفضائية وفهم ساحة المعركة المدارية.

تشكل هذه القدرات المتنوعة مجتمعة العمود الفقري للقوة الجوية الاستراتيجية الحديثة، إذ توفر البيانات الأساسية ووسائل الاتصال اللازمة لفعالية العمليات العسكرية عبر جميع المجالات (Naval Information Warfare Center Pacific, 2025).

4. الاندماج الفضائي الفرط صوتي: قفزة تحويلية

يشكّل اندماج المنصات الفضائية مع القدرات الفرط-صوتية تطورًا تحويليًا في الفاعلية العسكرية، متجاوزًا التحسينات التدريجية ليعيد تعريف المشهد العملياتي من الأساس. هذا التكامل ضروري ليس فقط للتخفيف من التحديات الفريدة التي تفرضها التهديدات الفرط-صوتية، بل أيضًا لتوليد مزايا استراتيجية جديدة. يوضح الشكل 3 هيكلية الدفاع الفرط صوتي في ثلاثة مستويات، تتكون من، طبقة للرصد، وطبقة للتتبع، وطبقة لشبكة اتصالات منخفضة زمن الاستجابة. كما توفر طبقة الرصد مراقبة مستمرة واسعة النطاق، مما يتيح الكشف عن التهديدات الفرط-صوتية والحفاظ على الوعي الميداني خلال المراحل المبكرة الحرجة من الطيران.

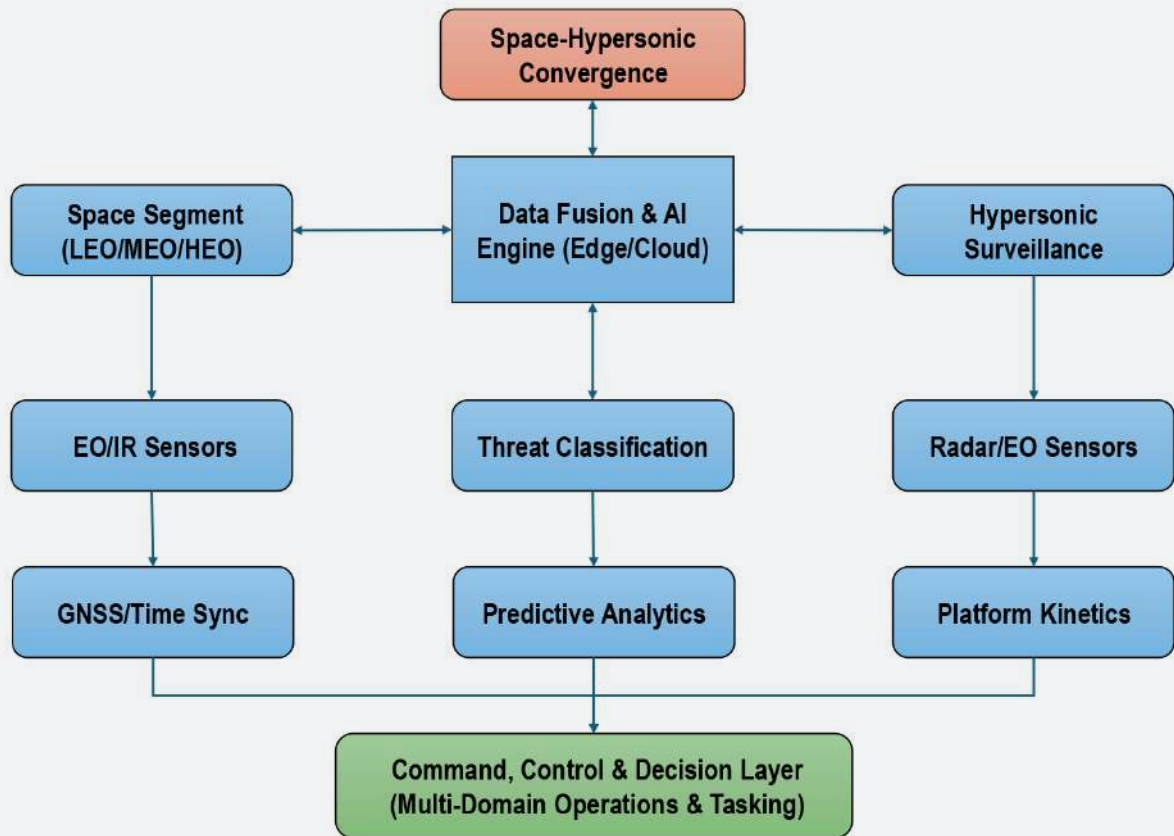
تضمن طبقة التتبع تتبعًا مستمرًا عالي الدقة للأهداف عبر المراحل اللادقة، مما يدعم التنبؤ الدقيق بالمسار. أما طبقة شبكة الاتصالات منخفضة زمن الاستجابة، والمكوّنة من أقمار صناعية مترابطة عبر وصلات بين الأقمار وصلات ليزيرية موجهة نحو المستقبلات الأرضية، فتمكّن من نقل البيانات بسرعة ومرونة بين أجهزة الاستشعار الفضائية ومنظومة القيادة والسيطرة (C2) الأرضية، ويتولى نظام القيادة والسيطرة معالجة هذه البيانات في الوقت الفعلي لتنسيق عمليات الاعتراض فور حدوثها، مما يضمن قدرة استجابة متكاملة وسريعة قادرة على مواجهة السرعات الفائقة، والمناورة العالية، وفترات الإنذار القصيرة المرتبطة بالمركبات الفرط-صوتية.

4.1 دمج أجهزة الاستشعار للكشف عن التهديدات الفرط صوتية وتتبعها

يُعد الكشف عن التهديدات الفرط-صوتية وتتبعها، نظرًا لسرعتها الفائقة وقدرتها العالية على المناورة، تحديًا هائلًا بالنسبة لأنظمة الدفاع التقليدية (Little, 2024). يعالج الاندماج الفضائي-الفرط صوتي هذا التحدي من خلال دمج متقدم لأجهزة الاستشعار، بالاستفادة من شبكة متعددة الطبقات من الأصول المدارية والبرية. كما أن مجموعة شاملة من أجهزة الاستشعار عالية الأداء في المدار، بما في ذلك المستشعرات البصرية والرادار والأشعة تحت الحمراء، أمر ضروري، إذ لا تقتصر هذه المستشعرات الفضائية على اكتشاف الأجسام فحسب، بل توفر أيضًا البيانات اللازمة للتصنيف (مثل نوع الصاروخ) والتعريف (مثل صديق، عدو، محايد). ويتم الجمع بين المستشعرات البصرية وتحت الحمراء لتحديد الأشكال والبصمات الحرارية، ما يتيح التصنيف، بينما يمكن استخدام أجهزة إرسال "الصديق أو العدو" (IFF) للتعريف.

ويُعد نظام القمر الصناعي (Hypersonic and Ballistic Tracking Space Sensor (HBTSS) مثالًا على هذا النهج (Shepard, 2025). كما تم تصميم HBTSS ليكون مكوّنًا أساسيًا في كوكبة (-Overhead Persistent Infrared (OPIR)) متعددة الطبقات (Chaplain وآخرون، 2014)، حيث يوفر مسارات محدثة باستمرار وعالية الجودة لاستهداف التهديدات الفرط صوتية، ويتيح تغطية شبه عالمية عند تلقي الإشارة من أنظمة OPIR الأخرى (Northrop Grumman, 2025) تستخدم أقمار HBTSS الصناعية تقنيات التصوير متعدّد الأطياف لتعزيز الأداء في الظروف الصعبة، ويمكنها توفير بيانات تتبع مستمرة.

يُعد دمج أجهزة الاستشعار أمرًا حيويًا لأن لكل نوع من المستشعرات قيوده الخاصة. فعلى سبيل المثال، بينما تعد المستشعرات تحت الحمراء مفيدة لاكتساب الأهداف، في حين يمكن للرادار الفضائي تتبع المسارات. إن الجمع بين الاثنين، مدعومًا بمعالجة عالية السرعة، ويتيح دمجًا مستمرًا للمستشعرات. فإذا فقد الرادار تثبيت الهدف، يمكن لمستشعر الأشعة تحت الحمراء المساعدة في إعادة اكتسابه (Zhang وآخرون، 2015). بالإضافة إلى تعقيدات الإضافية الناتجة من الغلاف البلازما الذي يتشكل حول المركبات الفرط صوتية نتيجة التسخين الديناميكي الهوائي الشديد أثناء الرحلات عالية السرعة. وقد يُضعف هذا الغلاف المؤيّن أو يحجب إشارات الترددات الراديوية (RF)، مما يؤدي إلى تعقب متقطع وتدهو في أداء الاتصالات، خصوصًا خلال المراحل الوسطى والنهائية. وتكون أجهزة الاستشعار الفضائية، التي تعمل فوق هذا الغلاف البلازما، أقل عرضة لمثل هذا التداخل، وبالتالي تلعب دورًا محوريًا في الحفاظ على التعقب المستمر واستمرارية البيانات. كما أن دمج تقنيات الاستشعار البصري وتحت الحمراء مع الرادار المتقدم والتحليلات التنبؤية يساعد في التخفيف من فترات الانقطاع الناتجة عن البلازما ويضمن مرونة واستمرارية سلسلة اتخاذ القرار المعتمدة على بيانات المستشعرات.



الشكل 4: الإطار المفاهيمي لاندماج الفضاء والأنظمة الفرط صوتية لكشف التهديدات.

تلعب أنظمة الرادار الأرضية أيضًا دورًا في الهيكلية متعددة الطبقات، ففي حين يواجه الرادار الأرضي التقليدي صعوبة في التعامل مع الصواريخ الفرط صوتية منخفضة الارتفاع بسبب قيود خط الرؤية، فإن رادار ما وراء الأفق (OTH- Headrick & Skolnik- 1974) يمكنه كشف الأهداف على مسافات بعيدة. كما أن رادارات المصفوفة الممسوحة إلكترونيًا النشطة المتقدمة (AESA) مثل نظام Lower-Tier Air and Missile Defense Sensor (LTAMDS)) تستطيع الكشف عن وتتبع تهديدات متعددة في الوقت ذاته ومن أي اتجاه، وذلك باستخدام أجهزة

طاقة تعتمد على نيتريد الغاليوم (GaN) لمدى أطول ودقة أعلى. كم أن دمج هذه المستشعرات الفضائية والأرضية المتنوعة من خلال دمج أجهزة الاستشعار يُعد أمرًا لا غنى عنه لدفاع فعال ضد الصواريخ الفرط-صوتية (Shepard, 2025).

ويُوضح الإطار المفاهيمي المعروض في الشكل 4 هيكلية متعددة المستويات تدمج القدرات الفضائية والقدرات الخاصة بالمجال الفرط صوتي لتعزيز كشف التهديدات والوعي بالموقف. عند القمة، تُنسق طبقة الاندماج التبادلي الثنائي الاتجاه للبيانات بين القطاع الفضائي، الذي يضم منصات الأقمار الصناعية في المدارات المنخفضة (LEO) والمتوسطة (MEO) والعالية (HEO)، وأنظمة المراقبة الفرط-صوتية. ويتم إرسال البيانات المستمدة من أجهزة الاستشعار الكهروضوئية (EO) وتحت الحمراء (IR) والرادار عبر مراحل معالجة هرمية، بما في ذلك المزامنة الزمنية عبر نظام الملاحة العالمي (GNSS)، وتُدخل في محرك مركزي لدمج البيانات والذكاء الاصطناعي (AI). يقوم هذا المحرك بتنفيذ تصنيف فوري للتهديدات وإرسال النتائج إلى وحدات التحليلات التنبؤية من أجل تقدير المسار والتنبؤ بالسلوك، لتلقي المعلومات الاستخباراتية المعالجة من كلا المجالين في طبقة القيادة والسيطرة واتخاذ القرار (C2DL)، التي تُركب صورة عملياتية متعددة المجالات متماسكة وتُسهل مهامًا مستقلة أو بإشراف بشري، إن اتجه تدفق البيانات، المُمثلة بالأسهم العمودية والأفقية، تُبرز الطبيعة المتسلسلة والتكرارية والمتزامنة لخطوط البيانات الممتدة من الاستشعار إلى اتخاذ القرار عبر هذه الهيكلية.

4.2 الاصطفاف المداري للضربات الدقيقة

مفهوم الاصطفاف المداري للضربات الدقيقة يستفيد من الوصول العالمي وسرعة استجابة الأصول الفضائية لتمكين قدرات استجابة عالمية سريعة، ومن ثم تعقيد استراتيجيات منع الوصول/منع المنطقة (A2/AD) لدى الخصم (National Defense University, 2025). تتجسد هذه القدرة في مبادرات مثل برنامج الضربة السريعة التقليدية (Conventional Prompt Strike, CPS) للولايات المتحدة (Woolf, 2019; Bunn & Manzo, 2011). كان CPS يُعرف سابقًا باسم الضربة العالمية السريعة (Prompt Global Strike, PGS)، وهو جهد عسكري لتطوير نظام قادر على توصيل ضربة سلاح تقليدي موجه بدقة إلى أي مكان في العالم خلال ساعة واحدة (Watts, 2013). يُقصد بهذا النظام أن يُكمل قوى الاستجابة السريعة الحالية، التي تُقاس أوقات استجابتها عادةً بالأيام أو الأسابيع. تشمل أنظمة الإيصال المحتملة لرؤوس حربية CPS صواريخ كروز فرط-صوتية تُطلق من الجو أو الغواصات، وأسلحة حركية تُطلق من منصات فضائية مدارية.

تكامل الأسلحة الفرط-صوتية مع قدرات الفضاء المعتمدة على تحديد الموقع، والملاحة، والتوقيت (PNT) والاستخبارات والمراقبة والاستطلاع (ISR) يتيح سرعة ودرجة دقة غير مسبوقة في الاستهداف. تقدم صواريخ الانزلاق الفرط صوتية المعززة، مثل تلك التي يجري تطويرها في إطار برنامج CPS، مدى أطول، وأوقات طيران أقصر، ودرجة بقاء عالية أمام دفاعات العدو (Lockheed Martin, 2025) يمكن لهذه القدرة أن تُجبر الخصوم على العمل بمسافات أبعد، مما يقلل فعالية استراتيجياتهم A2/AD. لا سيما في مناطق متنازع عليها مثل بحر الصين الجنوبي (Little, 2024; National Defense University, 2025). تمكّن القدرة على توصيل ضربة دقيقة عالمية خلال ساعة، مدعومة بالاصطفاف المداري والتوصيل الفرط صوتي، لتكون أداة حاسمة لردع وهزيمة المنافسين الاستراتيجيين المحتملين إذا دعت الحاجة (Lockheed Martin, 2025). كما توفر بديلًا تقليديًا للأسلحة النووية لبعض الأهداف خلال نزاع، مما قد يقلل من خطر التصعيد النووي. ومع ذلك، يبقى التحدي في ضمان أن مثل هذا النظام، وخصوصًا إذا أُطلق عبر مسارات شبيهة بالصواريخ العابرة للقارات (ICBM-like)، لا يُساء تفسيره على أنه هجوم نووي من قبل دول تمتلك نظم كشف إطلاق متقدمة. يؤكد هذا على ضرورة تطوير عقائد دقيقة وإشارات استراتيجية محسوبة.

5. تحديات منظومة القيادة والسيطرة (C2) في عصر الأسلحة الفرط صوتية

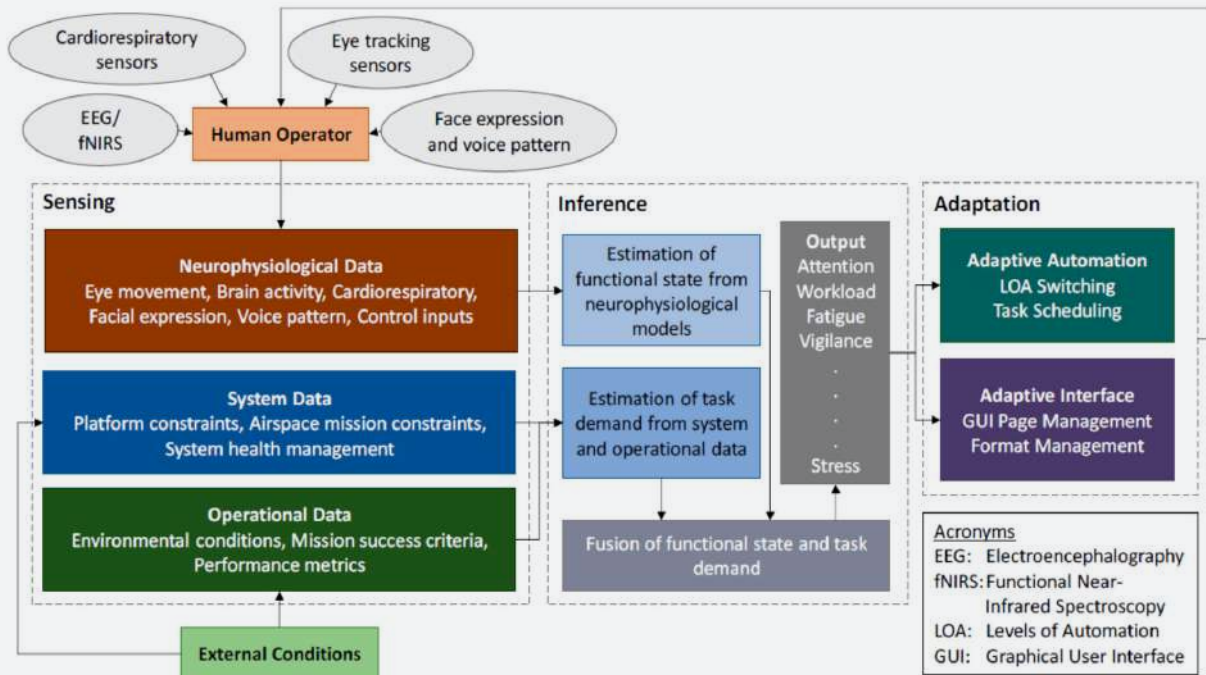
تفرض السرعات الفائقة والمسارات غير المتوقعة للأنظمة الفرط صوتية متطلبات غير مسبقة على أنظمة القيادة والسيطرة (C2)، مما يستلزم إعادة تقييم جوهريه لعمليات صنع القرار. إن دورة "الملاحظة والتوجيه والقرار والفعل" (OODA)، رغم كونها أساسية، تواجه ضغوطًا كبيرة في بيئة الأسلحة الفرط صوتية نتيجة لضغط الزمن وسرعة الأحداث.

5.1 تضيق حلقة OODA

حلقة OODA، وهي دورة استعارية لاتخاذ القرار، تُبرز الملاحظة السريعة، والتوجيه، والقرار، والفعل (CSIS Nuclear Network, 2025؛ Johnson, 2022) في سياق العمليات الفرط صوتية، تقلّ الفترة المتاحة لكل مرحلة من هذه الحلقة بشكل كبير. قد يتوفر لدى القادة دقائق فقط، بدلاً من ساعات، لتحديد الردود المناسبة على الإطلاقات المكتشفة (Little, 2024). يتطلب هذا التضيق ما يلي:

• **الأتمة المتقدمة:** لمعالجة كميات هائلة من البيانات وتقديم استخبارات قابلة للتنفيذ بسرعة، تُعدّ الأتمة أمراً حاسماً. ويشمل ذلك جمع البيانات الآلي، والتحليل الأولي، وتقييم التهديدات.

• **الذكاء الاصطناعي:** القدرات المدعومة بالذكاء الاصطناعي، لا سيما تقنيات التعلم الآلي مثل تمييز الصور، والتعرّف على الأنماط، ومعالجة اللغة الطبيعية، يمكنها سدّ الثغرات المعلوماتية استنتاجياً، وتحديد الأنماط والاتجاهات، وزيادة سرعة ودقة بعض العمليات العسكرية القياسية بشكل ملحوظ. يمكن للذكاء الاصطناعي أن يدعم التنبؤات باستخدام قواعد إرشادية مشتقة من مجموعات تدريبية ضخمة (CSIS Nuclear Network, 2025).



الشكل 5: إطار عمل CHMI²، ليم وآخرون (2021).

• **شبكات اتصال مرنة:** تفرض بيئات الصراع ذات الوتيرة العالية شبكات اتصال لا تقتصر على كونها سريعة فحسب، بل أيضاً شديدة التحمل ضد التعطل، ويجب أن تضمن هذه الشبكات نقل بيانات منخفض الكمون بين الحساسات ونقاط القيادة والسيطرة (C2) وأنظمة الفعل.

5.2 دور التعاون بين الإنسان والآلة

بينما تُعدّ تقنيات الذكاء الاصطناعي والأتمتة ضرورية لتسريع دورة OODA، يبقى دور التدخل البشري في اتخاذ قرارات القيادة والسيطرة (C2) أمراً حاسماً، بل وربما أكثر أهمية. ينتقد البعض المبالغة في التركيز على السرعة ضمن دورة OODA، حيث يرون أن فائدتها محدودة على المستوى الاستراتيجي، مثل إدارة مواقف حافة الهاوية النووية. إن الإدراك البشري، بما يشمله من إحساس وعاطفة وخبرة وحس، يظل عنصراً أساسياً لفهم البيئة الاستراتيجية الأوسع، خصوصاً في الأنظمة التنظيمية التكيفية المعقدة وغير الخطية. أما الآلات، التي تفتقر إلى السمات الإنسانية الجوهرية مثل النوايا، والقيادة الأخلاقية والمعنوية، والقدرة على التنبؤ بالنتائج في بيئات تتمحور حول الإنسان، فلا يمكنها أن تحل محل البشر بفعالية أو موثوقية في اتخاذ الأحكام الاستراتيجية (CSIS Nuclear Network, 2025; Johnson, 2022).

تُقدّم الأنظمة الإدراكية الناشئة للتكامل بين الإنسان والآلة (CHMS) حلاً محتملاً من خلال تسهيل تقاسم سلطة اتخاذ القرار بين المشغّلين البشريين والوكلاء المُمكنين بالذكاء الاصطناعي. وتدمج هذه الأنظمة هياكل معرفية متعددة الطبقات تدعم الإدراك، وتمثيل المعرفة، والاستدلال، والتعلّم، مما يمكّن الآلات من معالجة البيانات المعقدة والتكيّف مع متطلبات المهام المتطورة. ومع ذلك، فإن التطبيق الفعّال لـ CHMS يتطلب إشرافاً بشرياً وتفسيراً سياقياً لتجنّب الإفراط في الاعتماد على الأتمتة والحفاظ على مرونة النظام. وكما شدّد ساباتيني (2024) وصفوت وآخرون (2024، 2025)، فإن التكامل الفعّال بين الإنسان والآلة يتطلب توافقاً معرفياً، وتوقعاً متبادلاً، ومعايرة تكيفية للثقة، بما يضمن أن تعمل الآلات كزملاء تعاونيين لا كأدوات حتمية.

ولتشغيل هذه المبادئ عملياً، يوفّر نظام الواجهات والتفاعلات الإدراكية بين الإنسان والآلة (CHMI²) إطاراً قوياً لاتخاذ القرارات التكيفية بين الإنسان والآلة. ففي هذا النظام، يعمل الوكلاء الأذكيا كمضاعفات إدراكية تقوم بمعالجة مدخلات متعددة الأنماط من المستشعرات وإنتاج تقييمات ميدانية مُركبة لدعم القرارات البشرية. وكما هو مبين في الشكل (5)، يدمج هيكل CHMI² بين أنماط الاستشعار العصبية الفسيولوجية والسلوكية، مع البيانات التليمترية البيئية للنظام، لاستنتاج الحالة الإدراكية الوظيفية للمشغّل البشري. وتلتقط هذه العملية مؤشرات حيوية مثل عبء العمل، والانتباه، والإرهاق، والإجهاد، وتدمجها مع تقديرات متطلبات المهام لتوليد استراتيجيات أتمتة تكيفية في الوقت الفعلي وتعديلات على تكوين واجهة الاستخدام.

في سياق منظومة القيادة والسيطرة (C2) في البيئة الفرط الصوتية، تُعدّ الأنظمة الإدراكية التكيفية مثل (CHMI²) ضرورية لإدارة وتيرة العمليات العالية وحجم البيانات الكبير، مع الحفاظ على وعي القائد الميداني بالموقف، وسعة إدراكه، ومسؤوليته الأخلاقية. كما تعمل آليات التكيف مثل تبديل مستويات الأتمتة (LOA)، وإعادة توزيع المهام ديناميكياً، وتعديلات واجهة الاستخدام الرسومية (GUI) على ضبط مستوى استقلالية الآلة بما يتوافق مع حالة المشغّل وتعقيد المهمة. والهدف الأسمى هو إرساء نموذج تكامل تعاوني بين الإنسان والآلة، حيث يعزز الذكاء الاصطناعي سرعة ودقة تفسير البيانات، بينما تبقى سلطة اتخاذ القرارات الاستراتيجية بيد الإنسان، محكومة بالمبادئ الأخلاقية، والنية العملية، وقواعد الاشتباك المعتمدة.

الجدول 4: تحديات القيادة والسيطرة والحلول في عصر فرط-الصوت

التحدي	الوصف	الحل المقترح (تقارب الفضاء وفرط-الصوت)
دورات قرار مضغوطة	سرعات فرط-الصوت تقلص زمن الاستجابة من ساعات إلى دقائق.	الأتمتة المتقدمة والذكاء الاصطناعي: قدرات مدعومة بالذكاء الاصطناعي لمعالجة سريعة للبيانات، والتعرف على الأنماط، وتقييم التهديدات
مسارات غير متوقعة	قدرة المناورة تجعل مسارات الطيران صعبة التنبؤ.	دمج المستشعرات: تكامل مستشعرات فضائية متنوعة (بصرية، تحت الحمراء، رادارية) مع مستشعرات أرضية لتتبع دقيق ومستمر.
عبء البيانات والغموض	كميات هائلة من البيانات من مستشعرات متعددة، مقترنة بعدم اليقين بشأن نوع الحمولة.	التوليف المعلوماتي بالذكاء الاصطناعي: استخدام الذكاء الاصطناعي لسد فجوات المعلومات، والتعرف على الاتجاهات، وتقديم معلومات قابلة للتنفيذ لصانعي القرار.
الحفاظ على السيطرة البشرية	ضغوط لتفويض صلاحيات الإطلاق بسبب عامل السرعة، مع خطر التصعيد غير المقصود.	الفريق البشري-الآلي: الذكاء الاصطناعي يعزز صنع القرار البشري، لكن الأحكام الاستراتيجية الحرجة تبقى بيد القادة البشريين، مع التأكيد على الحدس والأخلاق وقواعد الاشتباك.
تأخر التواصل والمرونة	الحاجة لتدفق بيانات سريع وآمن وغير منقطع في بيئات متنازع عليها.	الحاجة لتدفق بيانات سريع وآمن وغير منقطع في بيئات متنازع عليها.

وعليه، فإن مستقبل C2 في عصر فرط-الصوت يكمن في تحقيق تكامل متقدم بين الإنسان والآلة في عملية اتخاذ القرار، حيث تقوم الآلات الذكية بتحليل البيانات وتركيبها لإثراء الحكم البشري. وستزداد الحاجة إلى حدس القادة، وهامش تحركهم، ومرونتهم للتخفيف من العواقب غير المقصودة في بيئة تحركها وتيرة الانتشار السريع للتكنولوجيا. والتحدي كما هو مبين في (الجدول 4) يتمثل في الاستفادة من الذكاء الاصطناعي لتحقيق السرعة ومعالجة البيانات، مع ضمان بقاء القرارات الحرجة، وخاصة تلك ذات الأبعاد الاستراتيجية، في نطاق السيطرة البشرية الكاملة، وضمن إطار الاعتبارات الأخلاقية وقواعد الاشتباك (Johnson, 2022؛ CSIS Nuclear Network, 2025).

6. الخاتمة

لقد أعاد ظهور الأنظمة الفرط صوتية تشكيل طبيعة القوة الجوية الاستراتيجية بشكل جذري، إذ توفر قدرات فريدة بينما تطرح في الوقت ذاته تحديات كبيرة أمام الأمن العالمي. إن تقارب الفضاء والفرط صوتية أي دمج المنصات الفضائية مع أنظمة الأسلحة الفرط صوتية، ليس مجرد تطور تدريجي، بل هو نموذج تحولي للحفاظ على الفعالية العسكرية والاستقرار الاستراتيجي في القرن الحادي والعشرين. ومن خلال الاستفادة من التجمعات المدارية ودمج أجهزة الاستشعار المتقدمة، يمكن لهذا التقارب التخفيف من الصعوبات الجوهرية في كشف وتتبع الأهداف عالية السرعة والقابلة للمناورة، مما يتيح وعياً آتياً بالمجال والبيئة التشغيلية مع دعم عملية اتخاذ القرار في الوقت المناسب. كما أن مفهوم الاصطاف المداري، كما يتضح من مبادرات مثل الضربة السريعة التقليدية، يبرز الإمكانيات الهائلة لتحقيق ضربات دقيقة وسريعة عالمياً، مما يعقد استراتيجيات منع الوصول أو الحرمان من المنطقة لدى الخصوم ويعزز من الردع.

ومع ذلك، فإن دمج القدرات الفرط صوتية يتطلب تطوراً في دورة "المراقبة والتوجيه والقرار والفعل (OODA)، الأمر الذي يفرض تحديات حادة في مجال القيادة والسيطرة. وبينما يُعدّ الذكاء الاصطناعي والآتمتة وشبكات الاتصالات المرنة عناصر أساسية لتسريع تدفق المعلومات، يبقى الحكم البشري والقيادة الأخلاقية ضروريين، مما يدفع نحو توسيع آفاق التعاون بين الإنسان والآلة. إن النجاح في تحقيق تقارب الفضاء والفرط صوتي سيتوقف إلى حد كبير على السياسات، والتطور التكنولوجي المستمر، والمفاهيم التشغيلية المتكاملة عبر مجالي الجو والفضاء. وتُعدّ هذه الجهود ضرورية لضمان أن يكون مستقبل القوة الجوية الاستراتيجية قائماً على المرونة، والتكيف، والقدرة على الوصول العالمي.

7. الشكر والتقدير

يتوجه المؤلفون بالشكر إلى حكومة دولة الإمارات، وجامعة خليفة للعلوم والتكنولوجيا على دعم هذا العمل من خلال المشروعين FSU-2022-013 و RIG-2024-030. كما يود المؤلفون الإشارة إلى الاستفادة من "Gemini" من شركة Google، لما وفره من موارد ومساهمة في تحسين صياغة هذا البحث.

المراجع

Belous, A. and Vitali Saladukha (2020). *Modern Weapons: Possibilities and Limitations*. Springer eBooks, pp.731–820. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-47218-4_8.

Bunn, M.E. & Manzo, V. (2011). *Conventional Prompt Global Strike: Strategic Asset or Unusable Liability?* Strategic Forum, no. 263. Washington, D.C.: Institute for National Strategic Studies, National Defense University.

Chaplain, C., Gallegos, A., Cherveney, M., Guarneros, B., Patton, K. and Tallon, J. (2014). *Space Acquisitions: Assessment of Overhead Persistent Infrared Technology Report*. [online] Dtic.mil. Available at: <https://apps.dtic.mil/sti/html/trecms/AD1167360/>.

CSIS Nuclear Network (2025) "Automating the OODA Loop in the Age of AI", *CSIS Nuclear Network*. Available at: <https://nuclearnetwork.csis.org/automating-the-ooda-loop-in-the-age-of-ai/> (Accessed: 28 July 2025).

Finabel (2025) "The Strategic Implications of Hypersonic Weapons", *Finabel*. Available at: <https://finabel.org/the-strategic-implications-of-hypersonic-weapons/> (Accessed: 26 July 2025).

Headrick, J.M. and Skolnik, M.I. (1974). Over-the-Horizon radar in the HF band. *Proceedings of the IEEE*, 62(6), pp.664–673. doi: <https://doi.org/10.1109/proc.1974.9506>.

Johnson, J. (2022) 'Automating the OODA loop in the age of intelligent machines: reaffirming the role of humans in command-and-control decision-making in the digital age', *Defence Studies*, 23(1), pp. 43–67. doi: 10.1080/14702436.2022.2102486.

Lim, Y., Pongsakornsathien, N., Gardi, A., Sabatini, R., et al. (2021) "Adaptive human-robot interactions for multiple unmanned aerial vehicles", *Robotics*, 10(1), p.12.

Little, J. (2024) "Hypersonic Weapons: Strategic Implications in 21st Century Great Power Competition", *Strategic Studies Quarterly*, vol. 17, no. 2, pp. 45-60. Lockheed Martin (2025) "Hypersonic Missile Innovation", *Lockheed Martin*. Available at: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/hypersonics.html> (Accessed: 28 July 2025).

NASA (2025) "Hypersonics", *NASA Langley Research Center*. Available at: <https://sacd.larc.nasa.gov/vab/vab-projects/hypersonics/> (Accessed: 26 July 2025).

National Defense University (2025) "AY23 Weapons-Cleared", *National Defense University*. Available at: <https://es.ndu.edu/Portals/75/Documents/industry-study/reports/2023/AY23%20Weapons-Cleared.pdf> (Accessed: 24 July 2025).

Naval Information Warfare Center Pacific (2025) "Space Systems", *NIWC Pacific*. Available at: <https://www.niwc-pacific.navy.mil/Technology/Space-Systems/> (Accessed: 28 July 2025).

NewSpace Economy (2025) "The Evolution and Future of Military Satellites", *NewSpace Economy*. Available at: <https://newspaceeconomy.ca/2025/06/17/the-evolution-and-future-of-military-satellites/> (Accessed: 23 July 2025).

Northrop Grumman (2025) "Hypersonic and Ballistic Tracking Space Sensor Satellites", Northrop Grumman. Available at: <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/missile-defense/hypersonic-and-ballistic-tracking-space-sensor-satellites> (Accessed: 28 July 2025).

Sabatini, R. (2024) "Cognitive human-machine systems for future aviation", *IEEE AESS Distinguished Lecture, FAA New and Emerging Aviation Technologies (NEAT) Series*, March, Washington D.C. (delivered online from Abu Dhabi), United States Federal Aviation Administration (FAA). Available at: https://www.researchgate.net/publication/379484452_Cognitive_Human-Machine_Systems_for_Future_Aviation

Sabatini, R., Fasano, G., Gardi, A. and Blasch, E. (2024). *Digital Avionics for Sustainability*. [online] doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16143.29604>.

Safwat, N.E.D., Thangavel, K., Hussain, K.F., Gardi, A. and Sabatini, R. (2024) "Intelligent cyber-physical system for advanced air mobility and UAS traffic management", 2024 AIAA DATC/IEEE 43rd Digital Avionics Systems Conference (DASC), September, pp. 1–10. IEEE.

Safwat, N.E.-D., Gardi, A., Thangavel, K. and Sabatini, R., (2025). Assessing the impact of communication delays on advanced air mobility cooperative surveillance. *Vehicular Communications*, 46, p.100896. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2025.100896>

Schmisser, J.D. (2015). *Hypersonics into the 21st century: A perspective on AFOSR-sponsored research in aerothermodynamics*. *Progress in Aerospace Sciences*, 72, pp.3–16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.09.009>.

Shepard, J. (2025) "What Sensors Are Needed to Counter the Hypersonic Threat?", *Design World Online*. Available at: <https://www.designworldonline.com/what-sensors-are-needed-to-counter-the-hypersonic-threat/> (Accessed: 28 July 2025).

Thales Group (2024) *Hypersonic Defence – Chapter 1: Early Warning*. Available at: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/magazine/hypersonic-defence-chapter-1-early-warning> (Accessed: 2 August 2025).

Thangavel, K., Safwat, N.E.-D., Gardi, A. & Sabatini, R. (2025a). Multi-domain traffic management: Toward integrated air and space transport operations. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 40(8), pp.4–22. <https://doi.org/10.1109/MAES.2025.3555246>

Thangavel, K., Gardi, A., Hilton, S., Afful, A.M. & Sabatini, R. (2021b). Towards multi-domain traffic management. In: 72nd International Astronautical Congress (IAC 2021). Dubai, United Arab Emirates, October 2021. Intelligent and Autonomous Aerospace Systems Laboratory.

Watts, B.D., (2013). *The Evolution of Precision Strike*. Washington, D.C.: Center for Strategic and Budgetary Assessments.

William Cammack et.al., UPRISE Vehicle Design Report, AIAA. Available at: https://aiaa.org/wp-content/uploads/2024/12/graduate-team-missile-design-1st-place-georgia-tech-2022_design_report.pdf (Accessed: 23 July 2025).

Wolf, A.F. (2019) *Conventional Prompt Global Strike and Long-Range Ballistic Missiles: Background and Issues*. Congressional Research Service Report R41464. Washington, D.C.: Congressional Research Service. Available at: <https://crsreports.congress.gov>.

Zhang, X., Wang, G., Song, Z. and Gu, J. (2015). Hypersonic sliding target tracking in near space. *Defence Technology*, 11(4), pp.370–381. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2015.05.004>.