منظور تحليلي

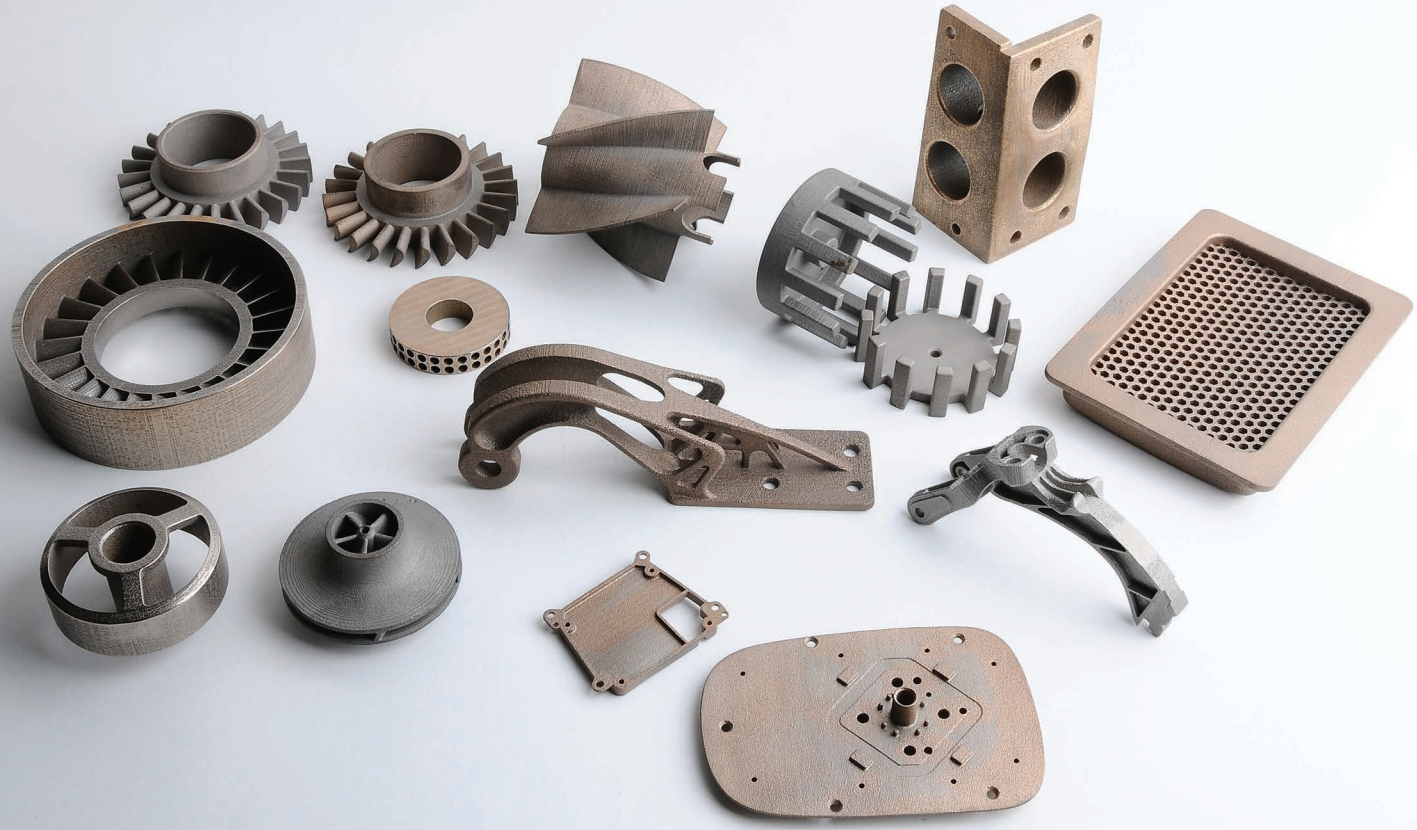
رؤى الخبراء بشأن قضايا السياسات الآنية

RAND CORPORATION

الطباعة الثُلاثية الأبعاد

عملية الإنتاج في المراحل النهائية تحوّل سلسلة الإمداد

سيمون فيرونّو (Simon Véronneau)، جيفري تورينغتون (Geoffrey Torrington)، جاكوب هلافكا (Jakub Hlávka)



يستكشف

هذا المنظور التحليليّ ما تستبطنه الطباعة الثلاثية الأبعاد من قدراتٍ على تحويل سلاسل الإمداد عبر التمكين من الإنتاج في المراحل النهائية. إنّ الطباعة الثُّلاثية الأبعاد، كما نعرّفها في هذا البحث، هي **القدرة** على إنتاج جسمٍ حسب الطلب بشكلٍ شبه آنيّ، بسهولةٍ مساويةٍ لضغطة زر. إننا بفعلنا هذا، نبتعد عن تركيز الدراسات السابقة التي تتناول الهندسة والهوايات على الطباعة الثُّلاثية الأبعاد على إنها مجرّد تقنياتٍ للتصنيع بالإضافة (Additive Manufacturing [AM]). إنّ التصنيع بالإضافة يُنشئُ أجساماً ماديةً عن طريق ترسيب طبقاتٍ رقيقةٍ من المواد (مثلاً، السبائك الفِلزية، أو أنواعٌ من اللدائن البلاستيكية والبوليمرات) بعضها فوق البعض الآخر بناءً على وصفٍ رقميٍّ لتصميم المنتَج. إنّ التصنيع بالإزالة (Subtractive Manufacturing [SM]) التقليديّ والمعتمَد، يُنشِئُ الأجسام عن طريق إزالة المواد (مثلاً، بواسطة الحفر أو الخِراطة) من خامةٍ صلبة، وغالباً بإدارة الحاسوب. إنّ تعريفنا للطباعة الثُّلاثية الأبعاد الذي يستند إلى القدرة، يسمح لنا بمناقشة سير العمليات المتعلق بسلسلة الإمداد والنتائج النهائية، من خلال عدسةٍ محايدةٍ تكنولوجياً، بدلاً من التركيز على عملياتٍ هندسيةٍ محددة. كما ستتم مناقشته في خلال هذا المنظور التحليليّ، فإنّ الطباعة الثُّلاثية الأبعاد أكثر من مجرّد تصنيعٍ بالإضافة أو تصنيعٍ بالإزالة.

إنّ إعادة تقييمٍ لقدرات الطباعة الثُّلاثية الأبعاد بالنسبة للمنظمات التي تدير سلاسل إمدادٍ كبيرةً ومتنوعةً مبَرَّرٌ الآن بسبب التقدم السريع في تكنولوجيا التصنيع بالإضافة. إنّ الصناعات التجارية تطبّق التصنيع بالإضافة في مجموعةٍ واسعةٍ من المجالات — من صناعة الألعاب إلى صنع العُدَد والنماذج الأولية، بوجود تطبيقاتٍ جديدةٍ يتم تطويرها بِوَقعٍ متزايد. إنّ الاهتمام بالتصنيع بالإضافة ينمو أيضاً داخل الحكومة الأمريكية. داخل المختبرات الوطنية التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية (Department of Energy [DoE] National Laboratories)، تستخدم برامج الأبحاث تقنيات التصنيع بالإضافة لإيجاد موادّ جديدةٍ ذات خصائصَ غير متوفرةٍ في الطبيعة، مثل الهياكل واللواقط الهوائية الخفيفة الوزن، التي يمكنها أيضاً أن تؤديَ وظيفةً هيكلية. إنّ وزارة الدفاع الأمريكية (Department of Defense [DoD]) ترى هي أيضاً قدرةً كامنةً في تطبيق التصنيع بالإضافة من أجل دعم الصيانة والإصلاح والتشغيل (Maintenance, Repair, and Operations [MRO]) عن طريق توفير بدائلَ مطابقةٍ للقِطَعِ المتآكلة أو المكلفة أو التي يصعب الحصول عليها.

إنّ تطبيقات الطباعة الثُّلاثية الأبعاد تطرح تحدياتٍ عديدة، بِغَضّ النظر عن التقنية الخاصة المستخدَمَة في التصنيع. بينما تنحصر بعض المنافع والقيود بشكلٍ ضيّقٍ في التقنيات التي تخص كلاً من التصنيع بالإضافة والتصنيع

بالإزالة، فإنّ العديد من الاعتبارات الإدارية العامة وتلك التي تتعلق بسلاسل الإمداد بشأن رقمنة عمليات التصنيع متشابهة. نظراً للتقدم السريع في تقنيات التصنيع بالإضافة، فإنّ جزءاً كبيراً من هذا المنظور التحليليّ سوف يركّز على المنافع والتحديات التي ينفرد بها التصنيع بالإضافة. بالنسبة للتداعيات المحايدة تكنولوجياً في ما يتعلق بسلاسل الإمداد، سوف نستخدم تعريفنا الموسَّع للطباعة الثُلاثية الأبعاد.

من أجل مساعدة وزارة الدفاع الأمريكية على فهم المجال المترامي للتطبيقات الممكنة للطباعة الثُلاثية الأبعاد — بالإضافة إلى التغييرات المتعلقة بالهيكلية والسياسات، والتي قد تلزم من أجل دعم هذه الجهود — شَرَعَ معهد أبحاث RAND للدفاع الوطنيّ (RAND's National Defense Research Institute) بمشروعٍ استكشافيٍّ لدراسة الاستخدامات المحتمَلَة للطباعة الثُلاثية الأبعاد ومنافعها في سياقٍ عسكريّ. يتعقَّب هذا المنظور التحليليّ تكنولوجيا الطباعة الثُلاثية الأبعاد من أصولها وصولاً إلى القدرة التي تستبطنها على تحويل سلاسل الإمداد بالنسبة لوزارة الدفاع الأمريكية. إننا نقوم بوصف تطبيقاتٍ متنوعةٍ لتقنيات الطباعة الثُلاثية الأبعاد ونوفّر إطار عملٍ لمساعدة وزارة الدفاع على التفكير في التأثير المستقبليّ للطباعة الثُلاثية الأبعاد في سياقٍ من الصيانة والإصلاح والتشغيل. إننا نقوم أيضاً بتحليل التوازن الاستراتيجيّ التنافسيّ للولايات المتحدة في تطوير تكنولوجيا التصنيع بالإضافة وتبنّيها. أخيراً، نناقش التداعيات الواسعة لهذه التقنيات الجديدة بالنسبة لاقتنائها من جهة وزارة الدفاع وسواها من عمليات التخطيط.

الطرق

لقد استخدمنا مقاربةً متعددة الطرق لأغراض بحثنا، مماثلةً لتلك التي وَصَفَها بروُر وهنتر (Brewer and Hunter [1989]). هذه المقاربة مزجت بين مراجعة الدراسات السابقة، والزيارات الميدانية لمصنّعي التكنولوجيا، والمقابلات شبه الموحَّدَة مع موظفين في مجال الدفاع وعلماء أكاديميين، من أجل استبيان الوضع الحاليّ للتكنولوجيا. نظراً للطبيعة الاستكشافية لهذا البحث، فإنّ نطاق المقابلات وجمع البيانات كان واسعاً، بالتطابق مع ستيبينز (Stebbinins، [2001]). لقد استخدمنا تقنيةً في المقابلات شبه الموحدة مماثلةً لتلك المبيّنة في روبين وروبين (Rubin and Rubin، [2005]) من أجل السؤال عما يتعلق بالتقنيات المتعددة، وقضايا سلاسل الإمداد داخل وزارة الدفاع، والطرق التي يمكن للطباعة الثُلاثية الأبعاد بحسبها أن تغيّر المشهد. في بعض الحالات، استخدمنا مقابلاتٍ غير موحدةٍ أو غير نظامية، كما بيّنها كفيل (Kvale، [2008])، من أجل تفادي الإخلال بعمليات الصيانة والإصلاح والتشغيل (MRO) الدائرة، والتي لم تكن تُعين على جلسةٍ موحدةٍ مع تقنيي الإصلاح. أجرينا مراجعةً سريعةً لكل الدراسات السابقة المتوفرة — وهي نسخةٌ مخفَّفَةٌ من المراجعة المنهجية التي تسمح بتقييم قضيةٍ آنية — ابتداءً من مُستهَلّ تكنولوجيا التصنيع بالإضافة (AM) في أواخر الثمانينات وحتى الوقت الحاضر، باستخدام مقاربةٍ بيّنها خانغورا وآخرون (Khangura et al.، [2012])، وغرانت وبوث (Grant and Booth، [2009]).

فهم الطباعة الثُلاثية الأبعاد: التصنيع بالإضافة والتصنيع بالإزالة

نحن ننظر إلى الطباعة الثُلاثية الأبعاد على أنها تشمل عمليتَين رئيسيتَين: التصنيع بالإضافة (AM)، والتصنيع بالإزالة (SM) عن طريق التحكم العدديّ بواسطة الحاسوب (Computer Numerical Control [CNC]). إنّ مصطلح **التصنيع بالإضافة** كان أول استخدامه للإشارة إلى عملية التصنيع بنفث الرابط السائل (binder jetting)، وهي تقنيةٌ تم تطويرها في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (Massachusetts Institute of Technology [MIT])، ورُخِّصَت لصالح أكس وَن (ExOne) وزي كورب (ZCorp) في منتصف التسعينات (أصبحت زي كورب [ZCorp] لاحقاً جزءاً من ثري دي سيستمز [3D Systems]) (غيبسون، روزِن، وستكر Gibson, Rosen, and] Stucker]، 2015). التصنيع بالإضافة الذي يُعرَف أيضاً بالتصنيع الإضافيّ أو الصنع السريع للنماذج الأولية،[1] هو تكنولوجيا مستخدمةٌ لتصنيع الأجسام المادية عن طريق ترسيب طبقاتٍ رقيقةٍ من المواد بعضها فوق البعض الآخر بناءً على وصفٍ رقميٍّ لتصميم المنتَج (بيتريك وسيمبسون [Petrick and Simpson]، 2013). إنّ إنشاء مقاطعَ عرضيةٍ ثنائية الأبعاد انطلاقاً من جسمٍ ثلاثيّ الأبعاد يسمح للمصنّعين ببناء منتجاتٍ ذات تصميمٍ هندسيٍّ عالي التعقيد في عمليةٍ واحدةٍ بدلاً من مزج مكوناتٍ متعددةٍ قد صنّعتها التكنولوجيات التقليدية (غيبسون وآخرون [.Gibson et al]، 2015). العملية المادية داخل أيّ آلةٍ للتصنيع بالإضافة تتكوّن من خطوتَين عامّتَين: **الإكساء** و**الإلحام**. في

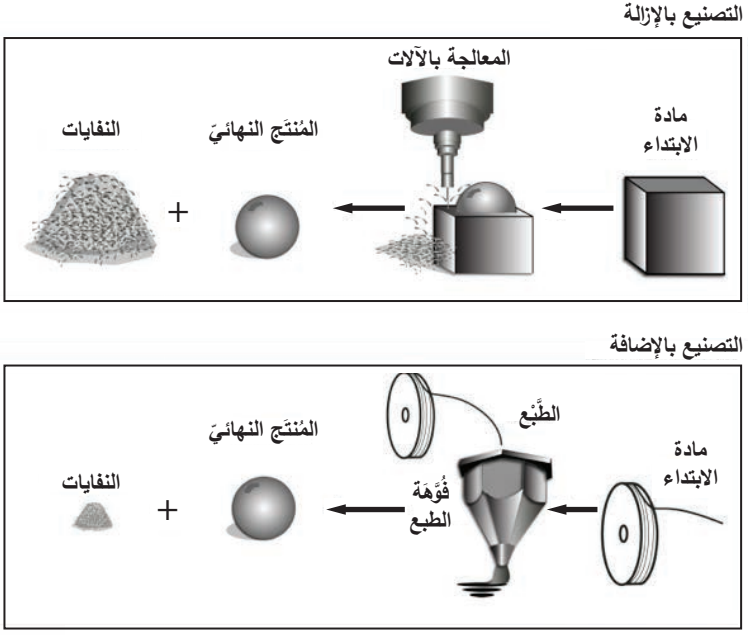
المرحلة الأولى، يجري مدّ طبقةٍ رقيقةٍ — عادةً ما تتراوح سماكتها بين 0.03 مليمتر و0.2 مليمتر — على السطح الذي يجري العمل عليه. في المرحلة الثانية، يُستخدَم مصدرٌ للطاقة مثل مصباحٍ أو شعاعٍ من الليزر، أو شعاعٍ من الإلكترونات لِلَحْمِ الطبقة الجديدة بالسطح الذي دونها (بيتروفيك وآخرون [Petrovic et al.]، 2011). يتبع ذلك في أغلب الأحيان عملية معالجةٍ لاحقة، باستخدام تقنياتٍ مثل الصنفرة، أو الصَّقل، أو المجانسة، أو المعالجة الحرارية (بيتروفيك وآخرون [Petrovic et al.]، 2011).

بينما تركّز مقاربات التصنيع بالإضافة على **إضافة** طبقاتٍ من أجل إنشاء جسمٍ ماديّ، فإنّ **التصنيع بالإزالة** يشير إلى عملياتٍ تشمل القَطعَ والحَفرَ والتفريز والخِراطة، والتي تعمل عن طريق **إزالة** موادَّ من خامةٍ صلبةٍ من أجل صنع أشكالٍ ومكوّنات. بعد حصول عمليات الإزالة هذه، تجري معالجة مكونات التصنيع بالإزالة أو تجميعها في منتَجٍ نهائيّ (بيتريك وسيمبسون [Petrick and Simpson]، 2013). حقق التصنيع بالإزالة أشواطاً من التقدم في النصف الثاني من القرن العشرين، وأصبح مُرَقمَناً بعد وقتٍ قصيرٍ من توفر الحواسيب الأولى لمجتمع الأعمال. في عام 1955، تم تطوير سيج (SAGE)، وهو أول نظامٍ للرسوم البيانية يستند إلى الحاسوب، في مختبر لينكولن للقوى الجوية الأمريكية (Lincoln Laboratory for the U.S. Air Force) التابع لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT)، وفيما بعد، طَوَّرَ باتريك ج. هانراتي (Patrick J. Hanratty) عام 1957 أول نظامٍ تجاريٍّ للبرمجة بتحكمٍ عدديّ، وهو برونتو (PRONTO). هذه التطورات التكنولوجية المبكرة جعلت عهد التصميم والصياغة بمساعدة الحاسوب (Computer-aided design and drafting [CADD]) والتصنيع بمساعدة الحاسوب (computer-aided manufacturing [CAM]) ممكناً (إنتشورِّغوي [Inchaurregui]، 2007).

الاختلافات بين التصنيع بالإزالة والتصنيع بالإضافة معروضةٌ بشكلٍ بيانيٍّ في الشكل رقم 1.

لقد كان التصنيع بالإزالة تكنولوجيا التصنيع الأكثر شيوعاً لقرون، وسوف يظل طريقةً مهمةً ومفيدةً في التصنيع. مع ذلك، فإنّ له بعض المساوئ لدى مقارنته بالتكنولوجيات الناشئة في مجال التصنيع بالإضافة، لأنه ينتج نفاياتٍ أكثر نسبياً، وله محدودياتٌ في ما يتعلق بأنواع الهيكليات التي يتمكن من تشكيلها. إنّ مزاياه الرئيسية تظل تسعيرته الحالية واختراقه للسوق بالنسبة لصناعاتٍ عديدة، وعملية التصديق الخاصة به للقِطَعِ المتعارفة الاستعمال.

الشكل رقم 1. التصنيع بالإزالة وبالإضافة



المصدر: مكتب المحاسبة الحكوميّ الأمريكيّ (U.S. Government Accountability Office)، 2015.

إنّ العديد من المنتجات يتم إنشاؤها باستخدام مقاربات التصنيع الهجينة التي تعتمد الإضافة والإزالة معاً. مثلاً، قد تستلزم المنتجات التي يتم إنشاؤها باستخدام التصنيع بالإضافة أيضاً، استعمال مكوناتٍ تم إنتاجها بواسطة التصنيع بالإزالة. بشكلٍ متزايد، قد تكون مقاربةٌ هجينةٌ في التصنيع هي الأكثر إمكاناً أو فعاليةً من حيث التكلفة.

نظراً للمجموعة الواسعة من تكنولوجيات التصنيع المتقدمة التي يمكن استخدامها للإنتاج في المراحل النهائية، إننا نفترض أنه على وزارة الدفاع أن تنظر إلى قدرة الطباعة الثلاثيّة الأبعاد من خلال عدسةٍ "محايدةٍ تكنولوجياً". معنى ذلك أنّ التركيز الإجماليّ يجب أن يتوجه نحو إنتاج أجسامٍ بشكلٍ شبه آنيٍّ بسهولة ضغطة زِرّ، بغضّ النظر عما إذا كانت تلك العملية تستخدم

تكنولوجيات التصنيع بالإزالة أو التصنيع بالإضافة. بالنسبة لوزارة الدفاع، سوف تستلزم الطباعة الثلاثية الأبعاد على الأرجح مزيجاً من التكنولوجيات ضمن رزمةٍ عاجلةٍ تمنح المُشَغِّل في المراحل النهائية من سلسلة الإمداد، القدرة على صنع القِطَع التي تدعو الحاجة إليها بسرعة. بما أنّ التصنيع بالإزالة هو تكنولوجيا ناضجةٌ ومفهومةٌ بشكلٍ جيّد، فإنّ هذا المنظور التحليليّ سيركّز على فهم التصنيع بالإضافة ودوره في النظام البيئيّ للطباعة الثلاثية الأبعاد. في القسم التالي، نَصِف تطور ونقاط قوة وتحديات التصنيع بالإضافة، فنسلّط الضوء على تلك التي هي الأكثر ملاءمةً للجيش الأمريكيّ ومُمِدّيه.

تطوّر التصنيع بالإضافة

تعود عملية استخدام التصنيع بالإضافة (AM) للأغراض التجارية إلى منتصف الثمانينات، حيث تم تقديم الطلب لنَيل براءات الاختراع الأولى بشكلٍ متوازٍ في اليابان وفرنسا والولايات المتحدة عام 1984.[2] جَرَّبَ المصنّعون استخدام موادَّ مختلفةٍ لإنتاج أجسامٍ مادية، شَمَلَت البوليمرات والمعادن وأنواع السيراميك والأحدث، استخدام الزجاج.

التصنيع بالإضافة بحد ذاته لا يمثّل مقاربةً منفردة، وإنما يستوعب عدداً من تكنولوجيات التصنيع المختلفة. إنّ جذور التكنولوجيات الحديثة في التصنيع بالإضافة مرتبطةٌ بمُستَهَلّ عملية البناء التجسيميّ (stereolithography) وتكنولوجيا الليزر في الخمسينات والستينات (دجاي، لادوس، ولاغوي [Zhai, Lados, and Lagoy]، 2014). بدأ الاختبار المختبريّ لمقاربات التصنيع بالإضافة في السبعينات؛ بحلول أواخر الثمانينات وأوائل التسعينات، كانت أربع مقارباتٍ ريادية قد برزت: عملية البناء التجسيميّ (على النحو الذي طورَته شركة ثري دي سيستمز [3D Systems, Inc.] في الولايات المتحدة)؛ معالجة طبقات السائل المتصلّبة (solid ground curing) (وهي تكنولوجيا تم تسويقها بواسطة شركة كيوبيتال المحدودة [Cubital, Ltd.] في إسرائيل)؛ التلبيد الانتقائيّ بالليزر (selective laser sintering) (الذي كانت جامعة تكساس في أوستن [University of Texas at Austin] رائدًة فيه)؛ وتصنيع الأجسام بواسطة التصفيح (laminated object manufacturing) (الذي كان أول إطلاقه بواسطة شركة هيليسيس [Helisys, Inc.] في كاليفورنيا) (دولِنك [Dolenc]، 1994). أقدم هذه التكنولوجيات، أي عملية البناء التجسيميّ ما زالت مستَخدَمَةً من قِبَل المصنّعين حول العالم لتطبيقاتٍ عديدة، أبرزها إنتاج المُعينات السمعية وغيرها من الأجهزة الطبية (ثري دي سيستمز [3D Systems]، غير مُؤَرَّخ). في المقابل، عانت تقنية معالجة طبقات السائل المتصلّبة من نكساتٍ عديدة ولم تعد مستخدَمَةً بعد ذلك، على الرغم من الدقة العالية نسبياً التي توفرها (أُم [Um]، 2015). في الجدول رقم 1، نميّز بين سبع فئاتٍ من عملية التصنيع بالإضافة، مُفَصَّلَةٍ من قِبَل المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس (International Organization for Standardization [ISO]) والجمعية الأمريكية الدولية للاختبار والمواد (ASTM International) (المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس [ISO] والجمعية الأمريكية الدولية للاختبار والمواد [ASTM International]، 2015).

المصطلحات التقنية المستخدَمَة لوصف عمليات التصنيع هذه في تطورٍ مستمرٍ مع توسيع التقدم التكنولوجيّ لآفاق ما هو ممكن. من أجل تقييم أحد مقاييس الاهتمام المتنامي بالمجال، جَمَعنا عدد المقالات التي تتناول تكنولوجيا التصنيع بالإضافة في المجلات الأكاديمية، والتي تم نشرها كل سنةٍ ما بين أعوام 1994 وحتى نوفمبر/تشرين الثاني 2016، مستخدمين الباحث العلميّ من جوجل (جوجل سكولار [Google Scholar]). وجدنا زيادةً ترتفع من أرقامٍ مفردةٍ في الأعوام من 1994 وحتى 2002، حتى تصل إلى 1,526 مقالةٍ نُشِرَت خلال الأشهر العشْر الأولى من عام 2016 وحده. وجدت الشركة البحثية وولرز أسوشييتس (Wholers Associates) ما يُعَدّ مقياساً آخر، هو أنّ صناعة التصنيع بالإضافة توسعت بمعدل نموٍّ سنويٍّ مُرَكَّبٍ (Compound Annual Growth Rate) قدره 26.2 في المئة في الفترة ما بين 1989 و2015 (ماك كيو [McCue]، 2016).

يمكن استخدام التصنيع بالإضافة في الصناعة السريعة لقِطَع الإصلاح وتحقيق الوضع الأمثل في سلاسل الإمداد، كما لبناء قِطَع إصلاحٍ ذات قدراتٍ يستعصي تحقيقها باستخدام التقنيات التقليدية في التصميم والتصنيع. مثلاً، بوسع التصنيع بالإضافة أن يمزج وظائفَ متعددةً في مكوّنٍ واحد (مثلاً، أجهزة الاستشعار والعناصر الهيكلية) أو صناعة قِطَعٍ في خطوةٍ واحدةٍ كانت لتستلزم عمليات تصنيعٍ متعددةٍ ومتباعدةٍ في التصنيع التقليدي.[3]

التصنيع بالإضافة ملائمٌ بشكلٍ فريدٍ لاستخدام **التصميم التوليديّ** *(generative design)* — وهي عملية تحقيق للوضع الأمثل وتستخدَم الحواسيب فيها لاستكشاف عددٍ كبيرٍ من التغيّرات في الأشكال تستوفي المقاييس التي

الجدول رقم 1. فئات عملية التصنيع بالإضافة (AM)

فئة العملية	التعريف	نوع المواد	عدد نتائج البحث (الباحث العلميّ من جوجل [جوجل سكولار])	التكنولوجيات المرتبطة
بَثْقُ المواد (Material extrusion)	عمليةٌ يجري بموجبها التخلص انتقائياً من المواد من خلال فُوَّهَةٍ أو ثقب	• البوليمرات • الرمل	3,510	• النمذجة بإلحام الطبقات المُرَسَّبَة
تصفيح الرقائق (Sheet lamination)	عمليةٌ يجري بموجبها إلصاق رقائقَ من المواد لتكوّن قِطعةً ما	• البوليمرات • المعادن	1,920	• تصنيع الأجسام بواسطة التصفيح • التمتين بالأمواج فوق الصوتية
الإلحام في مِهادٍ من المسحوق (Powder bed fusion)	عمليةٌ تقوم بموجبها طاقةٌ حراريةٌ بإلحامٍ انتقائيٍّ لأجزاءٍ من مهادٍ من المسحوق	• البوليمرات • المعادن • أنواعٌ من السيراميك؛ الرمل، والكربون	1,810	• الصَّهْر بشعاع الإلكترونات • التلبيد الانتقائيّ بالليزر • التلبيد الانتقائيّ بالحرارة • التلبيد المباشر للمعادن بالليزر
التصنيع بنفث المواد (Material jetting)	عملية ترسيبٍ انتقائيٍّ لقطراتٍ صغيرةٍ من مواد البناء	• البوليمرات • المعادن • الشمع والمواد البيولوجية	679	• النمذجة بالنفث المتعدد
التصنيع بنفث الرابط السائل (Binder jetting)	عمليةٌ يجري بموجبها ترسيبٌ انتقائيٌّ لعاملٍ رابطٍ فوق موادَّ من المسحوق	• البوليمرات • المعادن • الزجاج	602	• مِهاد المسحوق والرأس النافث للحبر • الطباعة الثلاثية الأبعاد على أساسٍ من الجُصّ
الترسيب بالطاقة الموجَّهَة (Directed energy deposition)	عمليةٌ تُستخدَم فيها طاقةٌ حراريةٌ مركَّزَةٌ لإلحام موادَّ عن طريق صَهْرِها أثناء ترسيبها	• المسحوق • المعادن	517	• ترسيب المعدن بالليزر
البلمرة الضوئية في الحوض (Vat photopolymerization)	عمليةٌ تتم فيها معالجةٌ انتقائيةٌ لسائلٍ من البوليمرات الضوئية داخل حوضٍ بواسطة البلمرة الضوئية المُنَشَّطَة	• البوليمرات • السيراميك والشمع	205	• عملية البناء التجسيميّ • معالجة الضوء الرقمية

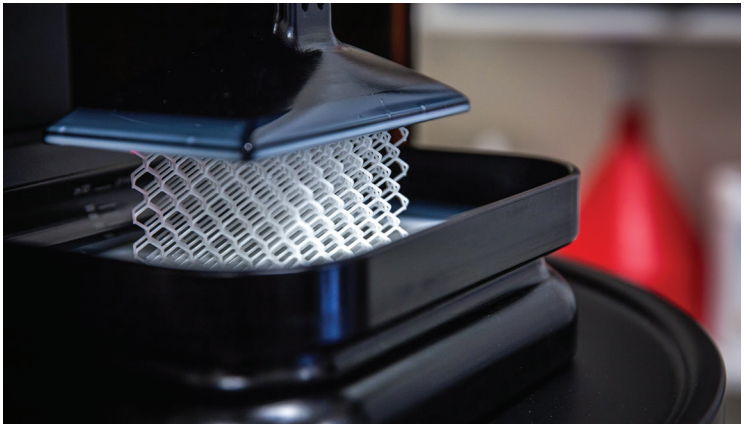
المصدر: تصنيفٌ نقّذَته مؤسسة RAND استناداً إلى المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس (ISO) والجمعية الأمريكية الدولية للاختبار والمواد (ASTM International) (2015)، غيبسون وآخرون (Gibson et al.) (2015)، ووزارة الطاقة الأمريكية (DoE) (2015).

يحددها المُستخدِم بطرقٍ متعددة. بما أنّ التصاميم التوليدية في التصنيع بالإضافة لا ترتبط بقيود التصنيع بالإزالة (SM)، فإنّ النتائج غالباً ما تتخذ أشكالاً ذات "استيحاءٍ بيولوجيّ"، كما هو مُبَيَّنٌ في الشكل رقم 2. من الأمثلة، المفهوم التصميميّ لمشروعٍ بحثيٍّ نفّذته شركة أوتودسك (Autodesk)، يُسَمَّى دريم كاتشر (Dreamcatcher)، الذي يطبّق الحوسبة السحابية والتصنيع بالإضافة في سير عملٍ يبدأ بالمتطلبات وينتهي إلى التصنيع (أبحاث شركة

الشكل رقم 2. التصميم التوليديّ مُطبَّقاً على مُكوِّنٍ تصوّريّ

المصدر: صورةٌ ترويجيةٌ من شركة الأنظمة الكهربائية البصرية (إيوس [EOS]).
ملاحظة: قطعةٌ مُعَدَّةٌ للعرض، لجزءٍ من صفيحة ارتكاز المفصلة في هيكل المحرك في طائرة إيرباص آي 320 (Airbus A320) مع ملائمتها بالشكل الأمثل من حيث الخصائص الهندسية اللامتغيّرة (التوبولوجيا): بُنِيَت من التايتانيوم باستخدام آلة إيوس أم 290 (EOS M290).

الشكل رقم 3. دعامات (جمالونات) منسوخةٌ مصنوعةٌ بواسطة التصنيع بالإضافة



المصدر: شركة كاربون ثري دي (Carbon3D)، غير مُؤَرَّخ.

أوتودسك [Autodesk]، غير مُؤَرَّخ). عن طريق ترسيب المواد بحسب أنماطٍ محددةٍ ثلاثية الأبعاد، يمكن تحقيق مجموعاتٍ من الخصائص الميكانيكية لا تتوفر في الكتلة السائبة للمواد.

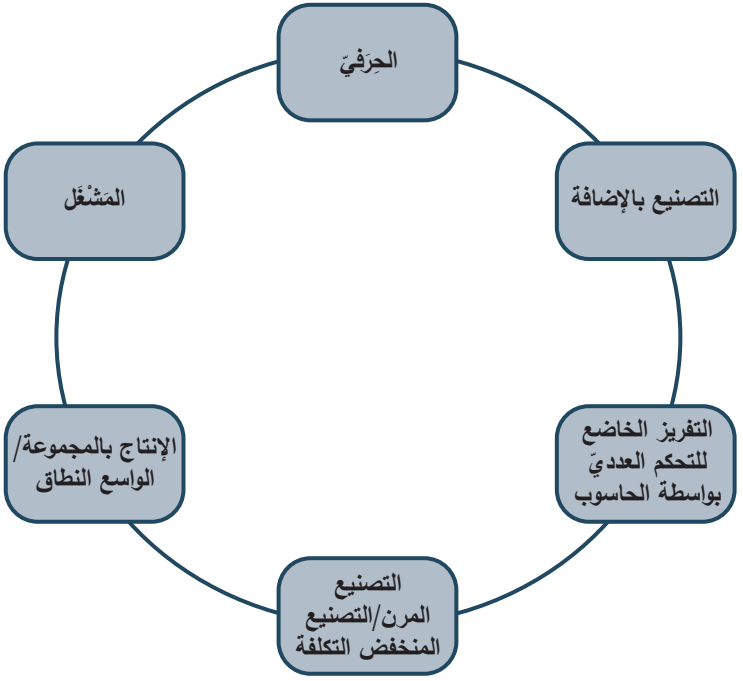
تكنولوجيات التصنيع بالإضافة مفيدةٌ أيضاً في التصاميم القابلة للتصميم حسب الحاجة أو حداثة التصميم. يبين الشكل رقم 3 مثلاً لخصائصَ قابلةٍ للتصميم حسب الحاجة باستخدام دعامات (جمالونات) منسوخةٍ على المستوى المجهريّ من أجل إنشاء موادَّ تحافظ على الصلابة المكونة من الكتلة السائبة للمادة، وبكتلةٍ مُخَفَّفَةٍ إلى حدٍّ كبير (دجَنغ وآخرون [Zheng et al.]، 2014).

تلك القدرات المُستحدَثَة تستبطن قدرة بناء طلبٍ في السوق على التصنيع بالإضافة في تطبيقات الدفاع والفضاء الجويّ والتطبيقات النووية. المهم هو أنّ الأنظمة التي تستخدم هذه القدرات المُستَحدَثَة سيستلزم أن تكون "مُصَمَّمَةً لأغراض التصنيع بالإضافة"، وبالتالي، قد لا يمكن استبدال القِطَع المُصَنَّعَة بصورةٍ تقليديةٍ في التصميم لاحقاً (روزِن [Rosen]، 2007). نناقش هذه النقطة بشكلٍ إضافيٍّ في القسم الذي أفردناه للخلاصات والتداعيات.

يمكن النظر إلى التصنيع بالإضافة على إنه أحدث خطوةٍ تدرّجيةٍ في تطوّر التصنيع، إذ يمزج بين الوعد بكفاءة الإنتاج الذي يكون في الوحدة المفردة، والقِطَع العالية الجودة، والتراصف مع الطلب. في مَعرِض التفكير في تطوّر أنماط الإنتاج، يمكننا إرجاع النظر لمئاتٍ من السنين، إلى العهود المبكرة لإنتاج الأجسام، التي كانت تركّز على الحِرَفيّ و"المشتغلين بالمعادن" المتنوعين (مثلاً، الحدّاد، وصائغ الفضة)، الذين كان هدفهم إنتاج قِطعةٍ ذات نوعيةٍ مفردة، الواحدة بعد الأخرى، وتستجيب للطلب المحليّ. مع الزمن، دفع الاقتصاد نحو الابتكار في الإنتاج، مما أدى إلى تركيزٍ على إنتاج قِطَعٍ بكلفةٍ زهيدةٍ وبشكلٍ يمكن الاعتماد عليه على نطاقٍ واسع. لقد ظَلَّ هدف الحدّ من الكلفة ثابتاً، إن يكن من خلال جماعات الحِرَفيين العاملين في المشاغل أو في التصنيع على نطاقٍ واسع. مع الوقت، أدى طلب المستهلكين على السلع المصنوعة حسب الطلب إلى مقارباتٍ جديدةٍ في الإنتاج، تشمل التصنيع المرن، وأنظمة الإنتاج المنخفضة التكلفة، وآلات التفريز الخاضعة للتحكم العدديّ بواسطة الحاسوب (CNC mill–ing machines)، وفي نهاية المطاف إلى التصنيع بالإضافة.

بالرغم من أنّ تطور أنماط الإنتاج خطّيٌّ عند النظر إليه مع مرور الزمن، إلا إنه يمكن رؤية التصنيع بالإضافة كعودةٍ إلى التصنيع المُموضَع: العودة إلى الحِرَفيّ (كما هو موَضَّحٌ في الشكل رقم 4). معنى ذلك أنّ الطباعة الثلاثية

الشكل رقم 4. البحث عن كفاءة الوحدة المفردة



الأبعاد توفّر القدرة على إنتاج قِطَعٍ بشكلٍ محليٍّ تكون ذات جودةٍ عالية وتستجيب لطلبٍ محدد، تماماً كما كان يفعل الحِرَفيون. من الصحيح أنّ اعتماد التصنيع بالإضافة للجمهور العامّ سيكون مماثلاً لوجود حِرَفيٍّ خاصٍّ بكل منزل، إلا إنّ رؤيتنا التي نعرضها لوزارة الدفاع (DoD) والتطبيقات التجارية، تستأنس بالعودة إلى نموذج المَشْغَل، الذي يركّز على إنتاج إمدادٍ ذي استجابةٍ عالية، ويعتمد على الحاجات المباشرة للمستخدِمين النهائيين، ويشمل ذلك القوات القتالية.

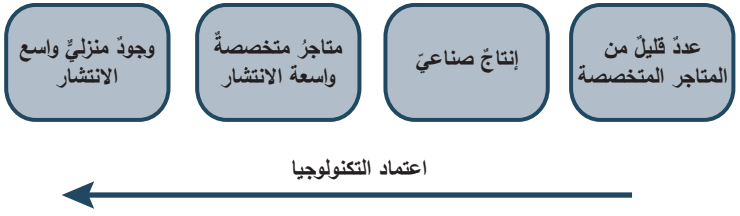
مستقبل الطباعة الثلاثية الأبعاد

في القسم السابق، ناقشنا تطوّر أنماط الإنتاج الذي أدى إلى تطوير التصنيع بالإضافة (AM). ننظر الآن باتجاه المستقبل ونوفر إطار عملٍ لمساعدة وزارة الدفاع (DoD) على التفكير بالكيفية التي قد يتطور بحسبها التصنيع بالإضافة، وما قد تكون تداعياتها بالنسبة لمستقبل تصميم سلسلة الإمداد وإدارتها.

قبل أن نعرض إطار العمل، من المفيد مراجعة تطور تكنولوجيا أخرى، أي الطباعة التقليدية، أو "الطباعة الثنائية الأبعاد"، نظراً لأوجه التشابه بين تطور الاثنتَين واعتمادهما (راجِع الشكل رقم 5). الطباعة الثنائية الأبعاد التي نشأت في القرن الخامس عشَر مع آلة يوهانِس غوتنبرغ (Johannes Gutenberg) الطابعة من النوع المتحرك، ظلّت لوقتٍ طويلٍ محدودةً بالمتاجر الصغيرة المتخصصة التي كانت تتطلب يداً عاملةً خبيرةً من أجل تحقيق إنتاجيةٍ ضئيلةٍ جداً. بعد عدة قرون، أحدثت الطابعات الدوّارة ثورةً في مجال الطباعة بتمكينها من الإنتاج الواسع النطاق في عددٍ قليلٍ من المواقع المتخصصة. بعد مضيّ قرنٍ كامل، في الثمانينات والتسعينات، بدأت متاجر الطباعة في الجوار تقدّم خدمات الطباعة والنسخ والمسح الضوئيّ، مما جعل التكنولوجيا متوفرةً للجمهور العام بكلفةٍ منخفضةٍ نسبياً. أخيراً، أصبحت الطابعات والماسحات الضوئية المنزلية واسعة الانتشار في التسعينات والألفية الثانية، فأزالت العوائق أمام تكنولوجيا الطباعة الثنائية الأبعاد بالكامل، وتركت المراكز الطباعية في الجوار تعيد التركيز على خدمات الطباعة المتخصصة وغيرها من الأنشطة ذات القيمة المضافة، مثل اليافطات الإعلانية المطبوعة بشكلٍ احترافيّ، والمطبوعات العملاقة، كما كانت توفّر توزيعاً متكاملاً للوثائق.

بينما جاء اعتماد الطباعة الثلاثية الأبعاد مضغوطاً في فترةٍ زمنيةٍ أقصر

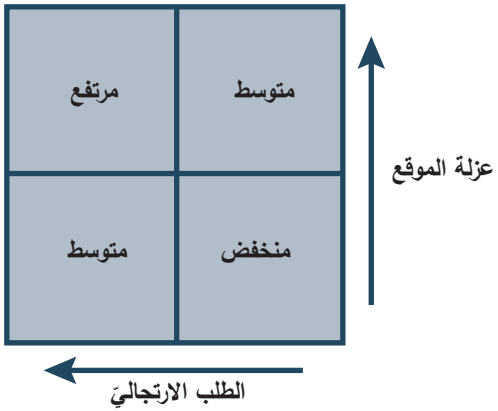
الشكل رقم 5. اعتماد التكنولوجيا في الطباعة الثنائية الأبعاد والثلاثية الأبعاد



بكثير، إلا إنه اتّبع نفس المراحل على وجه التقريب. في عام 2016، قطع التصنيع بالإضافة (AM) المرحلتَين الأولَيَتين وهو يدخل في نفس الوقت المرحلتَين الأخيرتَين، كما يدلّ عليه نشوء مختبرات التصنيع ("fab-labs") في العديد من المدن الكبيرة، والطابعات الثلاثية الأبعاد الشخصية البسيطة التي تُباعُ إلى مستخدِمين خاصّين لقاء أقل من 500 دولار أمريكيّ. بإمكان المخترعين والهُواة ورجال الأعمال أن يستخدموا مختبرات التصنيع بالطباعة الثلاثية الأبعاد على أساس الدفع في مقابل كل استخدام، الذي يماثل استخدام متجرٍ للطباعة الورقية في الماضي. لقد تحولت بعض الصناعات اليوم بشكلٍ جزئيٍّ من طُرُق الإنتاج التقليدية إلى التصنيع بالإضافة لاسيما في الأسواق المتخصصة مثل تصنيع المُعينات السمعية. إنّ توفّر الطابعات الثلاثية الأبعاد العالية الجودة للجمهور العام وسهولة الوصول إليها ليس سوى مسألة وقت. إنّ شركاتٍ مثل يو بي أس (UPS) قد بدأت بالفعل بتقديم التكنولوجيا في مواقعَ مُختارة (يو بي أس [UPS]، غير مُؤَرِّخ). من الصحيح أنّ العمليات الصناعية العالية التعقيد، مثل الإلحام في مِهادٍ من المسحوق (powder bed fusion)، من غير المرجح أن تكون متوفرةً على نطاقٍ واسعٍ خلال السنوات القليلة القادمة، إلا إنّ آلات المُرَكّبات البلاستيكية (plastic composite machines) التي تستطيع بناء قِطَع الغيار وغيرها من الأجسام باستخدام عملية البناء التجسيميّ (stereolithography) أو الإنتاج بواسطة تكنولوجيا الواجهة البينيّة السائلة المتّصلة (continuous liquid interface production technology) هي في الأفق للعقد القادم.

نظراً للحجم الذي يستبطنه السوق المتنامي للطباعة الثلاثية الأبعاد، فقد نظر بحُثُنا في المنافع التي قد توفرها هذه التكنولوجيا لوزارة الدفاع وغيرها من سلاسل الإمداد المماثلة. عن طريق استكشاف هذا السؤال، تعرّفنا إلى مكوّنَين أوّليَّين يدفعان بالتأثير الكامن للطباعة الثلاثية الأبعاد: (1) العِزلة النسبية (أو الترابطية) لمصدر الطلب وصولاً إلى سلسلة الإمداد، و(2) الطبيعة الارتجالية (أو تغيّر) الطلب. يبيّن الشكل رقم 6 مصفوفة اثنَين-في-اثنَين توضح هذه المفاهيم. يشير الشكل إلى أنّ الطلب كلما ازداد ارتجالاً من حيث طبيعته، وكلما كان الموقع معزولاً أكثر عن مراكز التوزيع (مثلاً، قاعدةٌ أماميةٌ للعمليات أو سفينة)، كان تأثير تكنولوجيا الطباعة الثلاثية الأبعاد أكبر. على العكس من ذلك، في موقعٍ يكون الطلب فيه مستقراً وذا صِلَةٍ جيّدةٍ بسلاسل الإمداد القائمة، قد توجد فرصٌ قليلةٌ لاختراقٍ تقوم بها الطباعة الثلاثية الأبعاد. يمكن استخدام الشكل رقم 6 لفهم أيّ أنواع الطلب سوف يدفع باعتماد تكنولوجيا الطباعة الثلاثية الأبعاد.

الشكل رقم 6. مصفوفة تأثير الطباعة الثلاثية الأبعاد

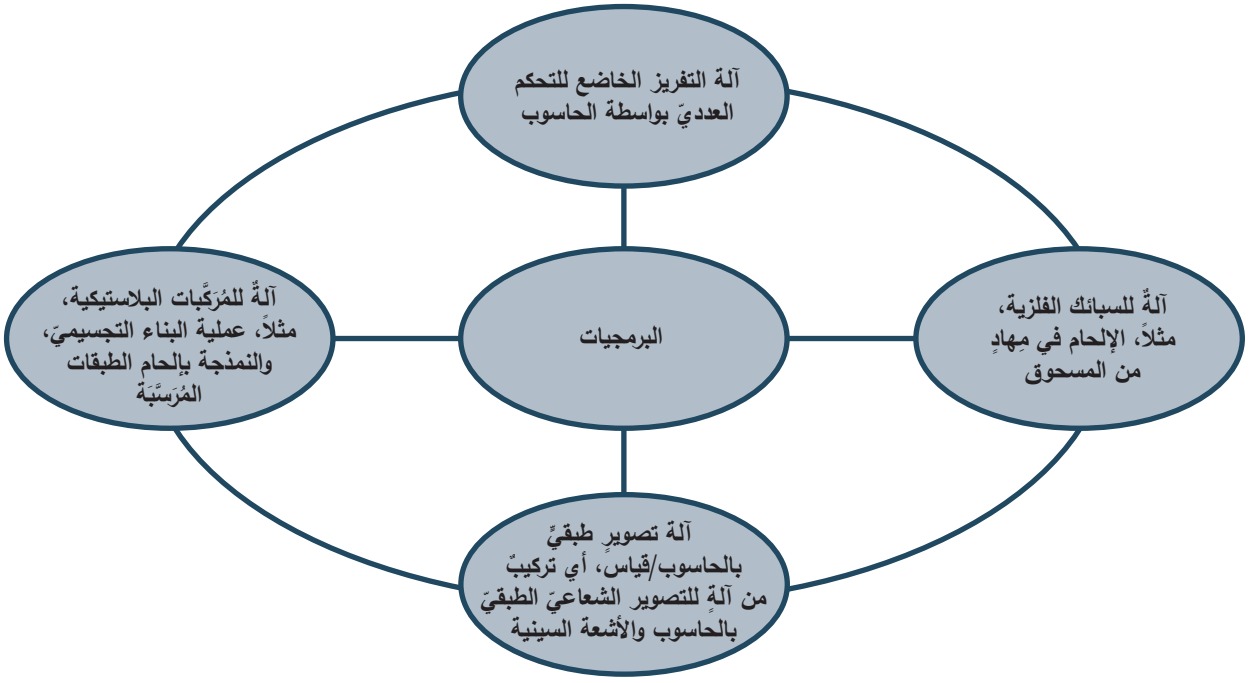


من أجل استكشاف الخيارات المستقبلية بالنسبة للطباعة الثلاثية الأبعاد بشكلٍ إضافيّ، طوّرنا "حلّ الآلات الأربع" الممكن مستفيدين من نموذج مختبر التصنيع (fab-lab)، الذي يمكن استخدامه لدعم عمليات المراحل النهائية في الصيانة والإصلاح والتشغيل (MRO) في البيئات البعيدة. بينما قد يتغير الحجم والقدرة الدقيقَين للآلات اعتماداً على الفضاء والقيود البيئية (مثلاً، حاملة الطائرات في مقابل المُدَمِّرة، أو قاعدةٌ أساسيةٌ للوجستيات في مقابل قاعدةٍ أماميةٍ للعمليات). إنّ تشكيل مختبر التصنيع هذا يمكن أن يوفّر مجموعةً كاملةً من القدرات. إنّ الشكل رقم 7 يبيّن مختبراً للتصنيع مؤلّفاً من المكوّنات التالية:

- آلة التفريز الخاضع للتحكم العدديّ بواسطة الحاسوب (CNC milling machine)
- آلة التصنيع بالإضافة للسبائك الفِلزية (Metal alloy AM machine)
- آلة التصنيع بالإضافة للمُرَكّبات البلاستيكية (Plastic composites AM machine)
- آلة التصوير الطبقيّ بالحاسوب – والقياس (computed tomography [CT]-metrology machine)، أو آلةٌ تجمع بين التصوير الشعاعيّ الطبقيّ بالحاسوب والأشعة السينية (CT scan/X-Ray).

توفّر الأنماط الثلاثة الأولى من آلات الإنتاج قدراتٍ مُكَمِّلَةً، بينما يوفر

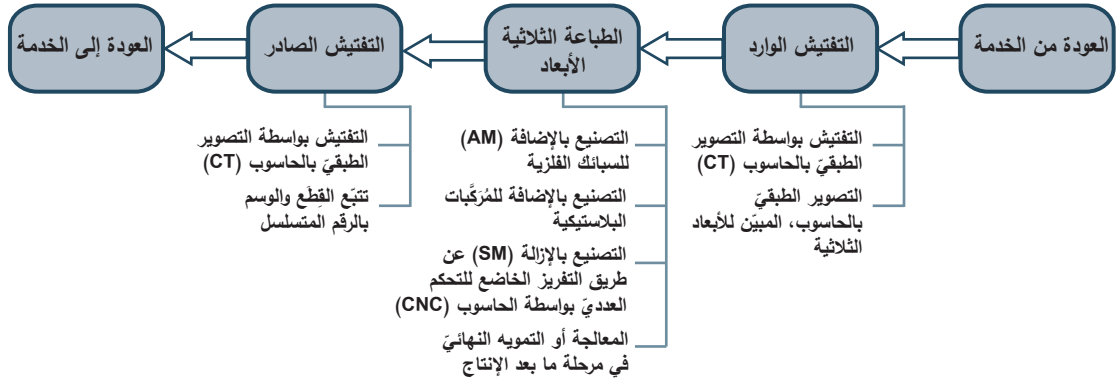
الشكل رقم 7. النظام البيئيّ لمختبر التصنيع المُقتَرَح للاستخدام في بيئة المراحل النهائية أو البيئة العسكرية البعيدة



مُكوِّن التصوير الطبقيّ بالحاسوب – والقياس قدرةً لا تلقى حقّها من التقدير، تلزم للاستفادة من إمكانية الطباعة الثلاثية الأبعاد. الآلات الحديثة التي تجمع بين التصوير بالأشعة السينية والتصوير الطبقيّ بالحاسوب، والتي يقدّمها عمالقة آلات القياس مثل زايس (Zeiss) ونيكون (Nikon)، تُمَكِّنُ من مستوياتٍ غير مسبوقةٍ في الكشف عن الشوائب والهيكلية، وتبيين الخصائص، والإظهار المرئيّ. تؤدي هذه الآلات تفتيشاً مُمَكنَاً باستخدام تكنولوجيا الإشعاعات السينية والتصوير الطبقيّ بالحاسوب لإجراء مسحٍ ضوئيٍّ للقِطَع بحثاً عن الشوائب. عند جَمعِها مع البرمجيات الملائمة، بوسعها إنشاء رسومٍ هندسيةٍ لقِطَعٍ معقّدةٍ في أقلّ من 30 دقيقة.[4] بالتالي، بوسع هذه الآلات ضمان أنّ قِطعةً ما، ما تزال مُؤهَّلَةً للخدمة وتوليد تصميمٍ ثلاثيّ الأبعاد قابلٍ للطبع، والتحقّق من أنّ قطعةً صُنِعَت للتّو بواسطة الطباعة الثلاثية الأبعاد تستوفي مواصفاتها. بينما تتمكّن الماسحات الضوئية بالليزر غير المُكلفة من تقديم التقاطٍ سريعٍ للبيانات الثلاثية الأبعاد بالنسبة للعديد من التطبيقات، فإنها لا توفر القدرة على الرؤية التي تخترق القِطَع بحيث تبيّن الهيكلية المعقدة، كما إنها لا تكشف عن الشوائب كجزءٍ من التحقق في مرحلتَي ما قبل وما بعد الإنتاج. بالتالي، بينما قد يستخدم حلٌّ موجَزٌ في بعض الحالات، ماسحةً ضوئيةً بالليزر محمولةً باليد، فمن المرجح أن يستلزم مختبرٌ للتصنيع حلاً أكثر تقدماً في التصوير الشعاعيّ. يوضح الشكل رقم 8 سير عملياتٍ شاملاً وبسيطاً للطباعة الثلاثية الأبعاد باستخدام نظامنا البيئيّ المُقتَرَح ذي الآلات الأربع.

إنّ ضبط حجم مختبرٍ للتصنيع يستلزم تقديراً للإنتاجية. إنّ الوقت الإجماليّ

الشكل رقم 8. رسمٌ بيانيٌّ لسير العمليات



لسير العمليات يصعب التنبؤ به بالنسبة لكل قِطعةٍ يمكن إنتاجها، إذ إنّ كل آلةٍ سوف تحقق أزمنة بناءٍ مختلفة، بحسب تعقيد وحجم القِطعة التي يلزم إنشاؤها. مع ذلك، إنّ التصوير الطبقيّ بالحاسوب، المستخدم لأغراض التفتيش والقياس ثابت، وبالتالي، في حدٍّ أدنى، نُقَدِّر أن تبيين خصائص قطعةٍ لا يتوفر لها رسمٌ بيانيٌّ ثلاثيّ الأبعاد يقتضي ساعةً تقريباً. إنّ تبيين خصائص قطعةٍ غير أساسية، مثل غطاءٍ بلاستيكيٍّ لا يستلزم اختباراً دقيقاً قبل نشره، يمكن إنتاجه في وقتٍ قصيرٍ لا يتجاوز 45 دقيقة من البداية إلى النهاية. إنّ التصنيع الفعليّ ومرحلة ما بعد التصنيع لقطعةٍ ما، يمكن تحقيقه في فترةٍ تتراوح بين دقائقَ وساعاتٍ بحسب حجم القطعة وتعقيدها ومتطلبات مرحلة ما بعد الإنتاج. إذا تم تطوير عمليات طباعةٍ ثلاثية الأبعاد موحّدة المقاييس في الأماكن التابعة لوزارة الدفاع، قد يكون من الممكن إنتاج قِطَع غيارٍ أو مكوّناتٍ ضمن نوبة عملٍ اعتياديةٍ من 8 ساعات، مما يجعل التصنيع بالإضافة خياراً قابلاً للحياة، من أجل تسليم المُنتَج من خلال القنوات اللوجستية الاعتيادية، لاسيما للبيئات التي يصعب الوصول إليها مثل الغواصات أو المسارح المُتَنازَع عليها. في عام 2016، حتى أمازون برايم (Amazon Prime) لا تتمكن من تحقيق سرعةٍ مماثلةٍ في التسليم بانتظام، لاسيما عند النظر إلى المواقع المعزولة.

من أجل فهم قيمة الطباعة الثلاثية الأبعاد في سياق وزارة الدفاع، سيكون من المهم مقارنة تكاليف مفهوم النظام البيئيّ للطباعة الثلاثية الأبعاد هذا، بتكاليف العملية الإجمالية لسلسلة الإمداد التي سوف يحل محلها — ويشمل ذلك الوقت اللازم لإجراء المعاملات والتصاريح العديدة اللازمة لشراء قطعةٍ ما. بينما تنظر وزارة الدفاع في خياراتها بالنسبة لعمليات الصيانة والإصلاح والتشغيل في البيئات المُتقشِّفة، فإنّ مقارنة تكاليف استخدام مختبرٍ للتصنيع من أجل الإنتاج المحليّ، بتكاليف نظامٍ مركزيٍّ يجب أن تشمل مقاربةً للكلفة الإجمالية لسلسلة الإمداد.

براءات الاختراع والاعتبارات الاستراتيجية

من أجل فهم التوازن الاستراتيجيّ التنافسيّ في تطوير تكنولوجيا التصنيع بالإضافة (AM) واعتمادها، قيّمنا نشاط براءات الاختراع بالنسبة للتصنيع بالإضافة في القطاع الخاص والمجتمعات الدفاعية في بلدانٍ مُختارة. بينما نوفر مقياساً محدوداً بعض الشيء، فإننا نستفيد من كاتيلا (Katila) (2000)، وآكس، آنسلين، وفارغا (Acs, Anselin, and Varga) (2002)، الذين يستخدمون نشاط براءات الاختراع كممثّلٍ على حدة النشاط الابتكاريّ. تستبطن تكنولوجيات التصنيع بالإضافة القدرة على تقديم مزايا بالنسبة لعمليات سلاسل الإمداد، أو التهالك، أو نهاية إدارة حياة المُنتَج، والخصائص المادية المُستَحدَثة، والبلدان التي تعتمد التصنيع بالإضافة قد تزيد من تنافسيتها الاقتصادية أو تكسب منفعةً عسكرية.

نقلًا عن الباحثين في معهد التحليلات في مجال الدفاع (Institute for Defense Analyses [IDA])، الذين حلّلوا قرابة 4,000 براءة اختراعٍ تتعلق بمجال التصنيع بالإضافة، فإنّ معظم الأبحاث الرائدة في مجال التصنيع بالإضافة قد قام بها القطاع الخاص، ولقد لَقِيَت بعض التكنولوجيات فقط دعماً نشطاً من الهيئات التي تدعمها الدولة (بينيا، لال، وميكالي [Peña, Lal, and Micali]، 2014؛ ويبر وآخرون [Weber et al.]، 2013). بحسب معهد التحليلات في مجال الدفاع (IDA)، فإنّ الشركات التالية التي تتخذ الولايات المتحدة مقراً لها: ثري دي سيستمز (3D Systems)، وستراتاسيس (Stratasys)، وزي كوربوريشن (Z Corporation)، وسوليدسكيب (Solidscape) قد باعت أكثر من 60 في المئة من الآلات الصناعية ذات المستوى الاحترافيّ لأغراض التصنيع بالإضافة حول العالم (بينيا، لال، وميكالي [Peña, Lal, and Micali]، 2014). بالرغم من النشاط المزدهر في القطاع الخاص، فقد كان الدعم الحكوميّ مهماً للتكنولوجيا في سنواتها الأولى، حيث صَدَرَت اثنتان من براءات الاختراع التأسيسية الستّ التي جرى تقديمها في الولايات المتحدة عن تمويلٍ من قِبَل مؤسسة العلوم الوطنية (National Science Foundation [NSF]). براءات الاختراع التأسيسية الستّ جميعها، كما هو مبَيَّنٌ في الجدول رقم 2، صَدَرت خلال إطارٍ زمنيٍّ قصيرٍ نسبياً هو 1984–1995، لكنّ نشاط براءات الاختراع في مجال التصنيع بالإضافة ازداد بشكلٍ إضافيٍّ منذ ذلك الحين.

قمنا بمراجعة للأعمال السابقة التي رَكَّزَت على النشوء التكنولوجيّ

الجدول رقم 2. براءات الاختراع التأسيسية للتصنيع بالإضافة، كما تم التعريف عنها من قِبَل معهد التحليلات في مجال الدفاع (IDA)

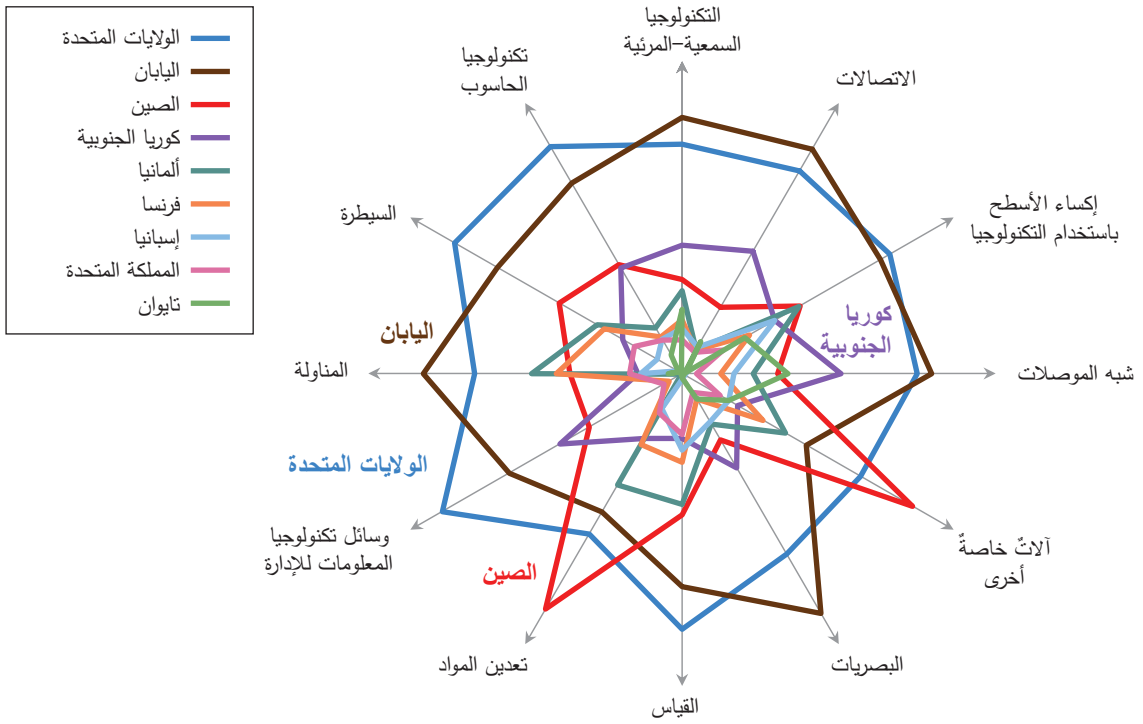
الفئة	عملية التصنيع بالإضافة (AM)	عنوان براءة الاختراع ورقمها	المخترع (المخترعون)	سنة التطبيق
تأسيسيّة	البلمرة الضوئية في الحوض (Vat photopolymerization)	4575330: جهازٌ لإنتاج الأجسام الثلاثية الأبعاد بواسطة عملية البناء التجسيميّ	تشارلز هلّ (Charles Hull)	1984
	الإلحام في مِهادٍ من المسحوق (Powder bed fusion)	4863538: طريقةٌ وجهازٌ لإنتاج القِطَع بواسطة التلبيد الانتقائيّ	كارل ديكارد (Carl Deckard)	1986
	بَثْقُ المواد (Material extrusion)	5121329: جهازٌ وطريقةٌ لإنشاء الأجسام الثلاثية الأبعاد	س. سكوتّ كرامب (S. Scott Crump)	1989
	التصنيع بنفث الرابط السائل (Binder jetting)	5204055: تقنياتٌ في الطباعة الثلاثية الأبعاد	إيمانويل ساكس (Emanuel Sachs) جون هاغرتي (John Haggerty) مايكل سيما (Michael Cima) بول ويليامز (Paul Williams)	1989
بمساعدة المؤسسة الوطنية للعلوم (NSF)	تصفيح الرقائق (Sheet lamination)	4752352: جهازٌ وطريقةٌ لتشكيل جسمٍ متكاملٍ ابتداءً من صفائح	مايكل فِغِن (Michael Feygin)	1987
	صياغة خط الكفاف (Contour Crafting)	5529471: جهازٌ وطريقةٌ في التصنيع بالإضافة	بِهروخ خوشنفيس (Behrokh Khoshnevis)	1995

المصدر: مُقتَبَسٌ بتصرّفٍ من بينيا وآخرون (Peña et al.) (2014) وويبر وآخرون (Weber et al.) (2013).

والشبكات التي تستخدم بيانات براءات الاختراع وتستفيد من البيانات المتوفرة للعموم من أجل تقييم التوزيع الحاليّ لبراءات الاختراع التي جرى تقديم طلباتٍ لنيلها في مجالاتٍ تتعلق بالتصنيع بالإضافة، بحسب البلد (يوسيبي وسيلبرغليت [Eusebi and Silberglitt]، 2014). مع أنّ براءات الاختراع ليست نظيراً مباشراً للتجارب العسكرية أو الاعتماد من قِبَل القوى العسكرية، فإنّ النشاط الاقتصاديّ النابض في مجال التجارة يستبطن القدرة على أن يُرَحَّلَ إلى المجال العسكريّ. في تحليلنا، طورنا مصطلحاتٍ بحثيةً تستند إلى المواضيع الحالية في مجال التصنيع بالإضافة، ثم بحثنا في قواعد بيانات مكتب التسميات والعلامات والبراءات في الولايات المتحدة (U.S. Patent and Trademark Office [USPTO])، والمنظمة العالمية للملكية الفكرية (World Intellectual Property Organization [WIPO]) لإيجاد هذه المصطلحات.[5] وضعنا في جدولٍ عدد براءات الاختراع لكل بلدٍ في منظورَين منفصلَين: بحسب صنف براءة الاختراع وبحسب المصطلحات البحثية.

في الشكل رقم 9، نبيّن مُخَطَّطاً رادارياً يمثّل حجم النشاط في الأصناف

الشكل رقم 9. مخططٌ راداريٌّ لنشاط براءات الاختراع في مجال التصنيع بالإضافة، بحسب البلد وبحسب الصِّنف



المصدر: عمليات حسابيةٌ نفذها المؤلفون باستخدام بياناتٍ نقب عنها كريستوفر يوسيبي (Christopher Eusebi) في مكتب التسميات والعلامات والبراءات في الولايات المتحدة (U.S. Patent and Trademark Office [USPTO])، والمنظمة العالمية للملكية الفكرية (World Intellectual Property Organization [WIPO]).

ملاحظة: يبيّن الشكلُ الحجمَ النسبيّ لنشاط براءات الاختراع بحسب الصنف بالنسبة للبلدان التسعة الأولى في بحثنا. المسافة من مركز التخطيط تشير إلى المستوى النسبيّ للنشاط المُصوَّر بالخوارزميات لأغراض الوضوح.

الاثنَي عَشَر من براءات الاختراع، والتي تحتمل الملاءمة للتطبيقات العسكرية، وتطبيقات الفضاء الجويّ، والتطبيقات الاستخباراتية. لأغراض الوضوح، النتائج مبَيَّنَةٌ للبلدان التسعة الأولى فقط. بشكلٍ عام، إنّ أقوى حافظات براءات الاختراع وأكثرها تنوعاً توجد في الولايات المتحدة واليابان. بالنسبة لكل أصناف براءات الاختراع تقريباً، فإنّ اليابان أو الولايات المتحدة هي الرائدة. لقد طورت الصين موقعاً قوياً في صناعة التعدين وغير ذلك من الآلات الخاصة، مما يمكنه دعم التكنولوجيات العسكرية والاستخباراتية في الفضاء الجويّ، والمواد الخفيفة، والدروع، وتصنيع العُدَد.

في الشكل رقم 10، نبيّن حجم براءات الاختراع بحسب السنة بالنسبة لمصطلحاتنا البحثية. إنّ المنافسة الحادة بين اليابان والولايات المتحدة ظاهرة، في وقتٍ تملك فيه الصين وأوروبا أحجاماً أدنى بالنسبة لمعظم هذه التكنولوجيات. إنّ الولايات المتحدة رائدةٌ واضحةٌ في الإلحام في مِهادٍ من المسحوق (powder bed fusion)، وهي تقنيةٌ في التصنيع بالإضافة (AM) الذي يستخدم المعادن، تملك اليابان الريادة في النمذجة بالنفث المتعدد (multi-jet modeling)، وهي عمليةٌ تطبع الهيكليات الداعمة في مادةٍ أكثر طراوةً يمكن إزالتها من غير عملٍ يدويّ.

بينما تستثمر الصين في تكنولوجياتٍ محددةٍ يمكن أن تكون ملائمةً عسكرياً، فإنها داخلٌ جديدٌ بالنسبة للولايات المتحدة واليابان، حيث حصلت أكثر تقديمات (براءات الاختراع) الصينية بعد عام 2005. روسيا غائبةٌ تقريباً بالكامل من سِجِلّ براءات الاختراع، وبينما لا يشكّل هذا دليلاً كافياً على أنّ جيشها لا يستثمر في التصنيع بالإضافة، فإنه يشير بالفعل إلى نشاطٍ اقتصاديٍّ محدودٍ بشكلٍ أكبر مقارنةً بغيره. في الواقع، إنّ التَدَنّي النسبيّ في تمثيل روسيا، والقوة المتنامية للصين في التصنيع بالإضافة قد تكون أكثر ارتباطاً بالمحفزات الاقتصادية بالنسبة للطلبات المُقَدَّمَة لنيل براءات الاختراع في الصين، من ارتباطها في التطوير أو النضوج الاقتصاديّ.[5] ألمانيا رائدةٌ مُعتَرَفٌ بها في مجال التصنيع بالإضافة، ولكنها ذات تمثيلٍ مُتَدَنٍّ نسبياً في المسح الذي أجريناه، إلا إنّ هذا الاختلال في التوازن يَقِلّ عند إجراء مقارنةٍ تحتسب براءات الاختراع لكل فرد.[6] قد تشمل التفسيرات المحتملة استراتيجيات حماية الملكية الفكرية التي تعتمد على أسرار المهنة في ما يتعلق ببراءات الاختراع، أو المقاربات المختلفة تجاه إنشاء نظامٍ بيئيٍّ للطباعة الثلاثية الأبعاد، أو التوزيع المختلف للأبحاث الأساسية بين مؤسسات القطاعَين العامّ والخاص،

إنّ المكونات المتعددة الوظائف، والتصاميم التوليدية، والخصائص القابلة للتصميم حسب الحاجة للمواد، ستحوّل الطريقة التي تُصنَع بحسبها كلٌّ من المُنتَجات العسكرية والمدنية — ابتداءً من الأجسام البسيطة وحتى المَرْكَبات الكاملة، وهياكل الطائرات، والسفن.

أو المعايير المختلفة لجودة براءات الاختراع، أو غيرها من العوامل.

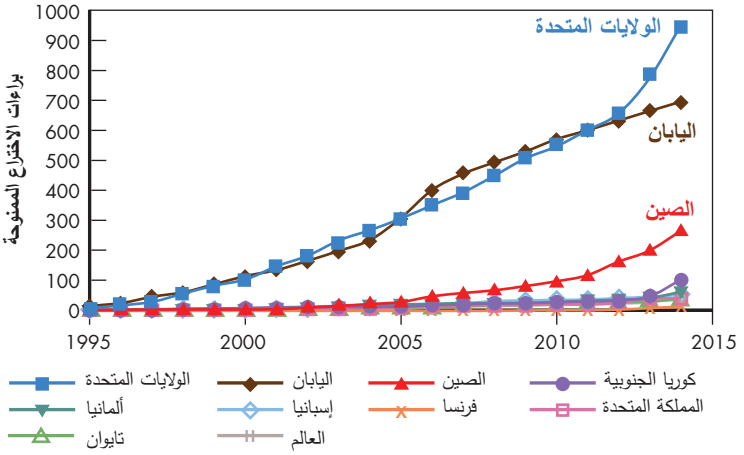
الخلاصات والتداعيات

إنّ تكنولوجيات الطباعة الثلاثية الأبعاد تتطور بسرعةٍ كبيرة في القطاع المدنيّ. لقد قادنا بحثنا إلى استخلاص أنّ مستوى قدرة واستقرار ونضوج هذه التكنولوجيات جاهزٌ لتطوير تطبيقاتٍ عسكريةٍ ومدنيةٍ فعالةٍ من حيث التكلفة. بالتالي، بينما قد شغل التصنيع بالإضافة (AM) تاريخياً، دوراً اختصاصياً في صنع النماذج الأولية وتصنيع القِطَع غير المألوفة، فإنّ مستقبله سيشمل على الأرجح اعتماداً واسع النطاق في الصيانة والإصلاح والتشغيل (MRO) على مستوياتٍ مختلفةٍ من سلسلة الإمداد. سوف تستفيد الموجة اللاحقة من هذه القدرة التكنولوجية في صميم التصاميم المستقبلية بحد ذاتها للمكوّن والمُنتَج. إنّ المكونات المتعددة الوظائف، والتصاميم التوليدية، والخصائص القابلة للتصميم حسب الحاجة للمواد، ستحوّل الطريقة التي تُصنَع بحسبها كلٌّ من المُنتَجات العسكرية والمدنية — ابتداءً من الأجسام البسيطة وحتى المَرْكَبات الكاملة، وهياكل الطائرات، والسفن.

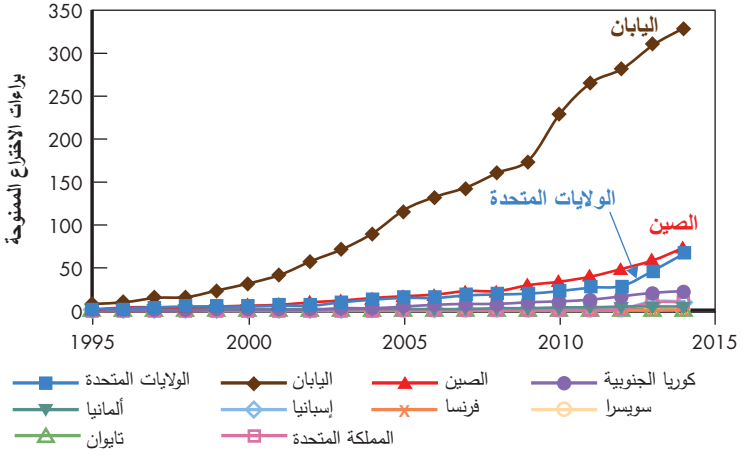
إنّ السيناريو الأكثر تشاؤماً بالنسبة للطباعة الثلاثية الأبعاد يكون بالنظر إليها على أنها بديلٌ مؤقتٌ لقدراتٍ تدخل ضمن مجموعة أدواتنا الحاليّة. حتى وإن لم يُقِرَّ المرء بالإمكانات المادية الثورية للتصنيع بالإضافة، فإنّ القدرات الجديدة التي يمكنه جلبها إلى المواقع المعزولة بوجود سيرةٍ من الطلب الارتجاليّ، يجب الاعتراف بها والاستفادة منها من قِبَل القادة العسكريين الأمريكيين. من

الشكل رقم 10. حجم براءات الاختراع، بحسب السنة وبحسب المصطلح البحثيّ

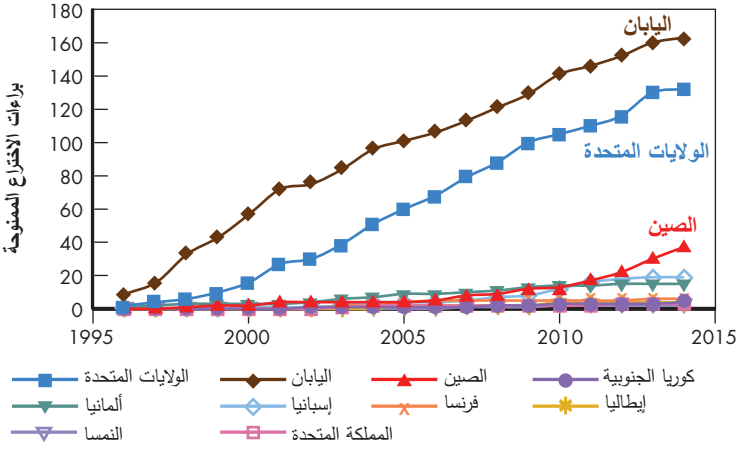
a. المصطلحات البحثية المتعلقة ببراءات الاختراع: الفتيل أو المعجون



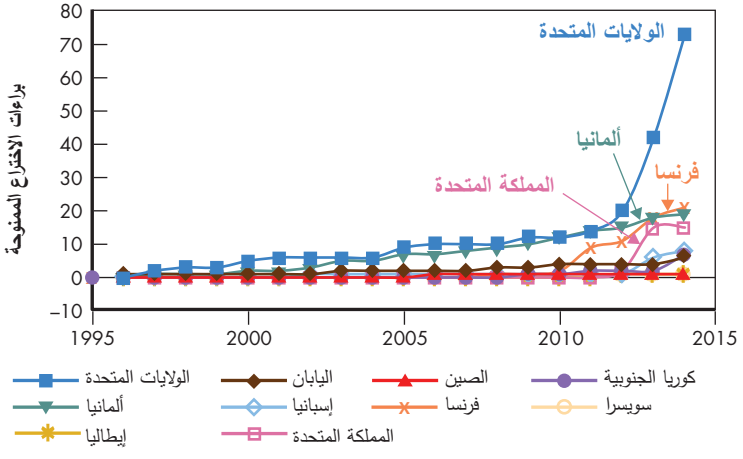
b. المصطلحات البحثية المتعلقة ببراءات الاختراع: النمذجة بالنفث المتعدد



c. المصطلحات البحثية المتعلقة ببراءات الاختراع: بثْقُ المواد، الرمل، البوليمر



d. المصطلحات البحثية المتعلقة ببراءات الاختراع: الإلحام في مِهادٍ من المسحوق



ملاحظة: تُبَيِّن الرسوم البيانية العدد المطلق لبراءات الاختراع الممنوحة بحسب البلد وبحسب صنف براءة الاختراع بالنسبة لأربعة مصطلحاتٍ بحثيةٍ مأخوذةٍ من المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس (ISO) والجمعية الأمريكية الدولية للاختبار (ASTM) (2015). بالنسبة لحساباتنا، لقد استخدمنا بياناتٍ من مكتب التسميات والعلامات والبراءات في الولايات المتحدة (USPTO) والمنظمة العالمية للملكية الفكرية (WIPO).

الصحيح أنّ التطبيقات التي قد يقوم بها المستهلكون ما زالت غير واضحة، ولكنّ التطبيقات التجارية بالنسبة لصنع العُدَد وصنع النماذج الأولية وعمليات الصيانة والإصلاح والتشغيل جاهزةٌ للاعتماد الواسع النطاق في السياق الدفاعيّ. لقد عَرَّفَ بحثنا بأربعة اعتباراتٍ رئيسيةٍ بالنسبة لوزارة الدفاع، في حال اختيارها المضيّ قُدُماً في تكنولوجيات الطباعة الثلاثية الأبعاد.

هناك مزايا كبيرةٌ مُحتَمَلَةٌ في تنفيذ تكنولوجيات الطباعة الثلاثية الأبعاد. تستبطن الطباعة الثلاثية الأبعاد القدرة على أن تكون أصلاً تكتيكياً أساسياً عن طريق زيادة أداء وقدرات وجهوزية وحدةٍ ما في المناطق البعيدة أو المعزولة. باستطاعة الطباعة الثلاثية الأبعاد أنّ تُنتِج جهوزيةً أكبر في المُعَدّات، في حالاتٍ لا يمكن شراء السلع فيها بطريقةٍ أخرى، إما بداعي التهالك أو بسبب سلسلة إمدادٍ بائدة. يمكن استخدامها أيضاً لإنشاء قِطَعٍ بسرعةٍ أكبر مما كان سيكون عليه الحال لو أنه تحتّم الحصول على القطعة من خلال سلسلة الإمداد الطبيعية، كما إنها سوف تُمَكِّنُ من إنتاج القِطَع المصمَّمَة حسب الحاجة كما لم تفعله أيّ تكنولوجيا مستخدمةٍ اليوم.

إضافةً إلى ذلك، يمكن تحقيق بعض الوفورات النقدية عن طريق نشر قدرات الإنتاج في المراحل النهائية أو الإنتاج الموزَّع باستخدام الطباعة الثلاثية الأبعاد. استناداً إلى نتائجنا، نعتقد أنّه يجب إجراء تقييمٍ شاملٍ لفعالية التكنولوجيا من حيث التكلفة، ونتوقع أن تكون الوفورات المحتمَلة كبيرةً عند النظر إلى التكلفة الإجمالية لسلسلة الإمداد، بالنسبة إلى العملية القائمة. في بعض الحالات، قد تكون التكلفة بحد ذاتها لقِطعةٍ مصنّعَةٍ بواسطة الطباعة الثلاثية الأبعاد، أقلّ مما كانت لتكون عليه من خلال التصنيع التقليديّ. إنّ استخدام الطباعة الثلاثية الأبعاد لإنشاء قِطَعٍ لا يمكن شراؤها حالياً بوسعه جلب وفوراتٍ هائلةٍ عن طريق تفادي الإلغاء المبكر للأنظمة بسبب خسارة مكوناتٍ قليلة.

مع هذا، يجب معالجة قضايا حيازة الملكية الفكرية وترخيصها، بالإضافة إلى قضايا الأمن الإلكترونيّ. إنّ تحديد حيازة الملكية الفكرية وترخيص القِطَع، بحيث يستفيد المخترعون والمصنّعون الأصليون للمُعَدات من الإنتاج في المراحل النهائية، قد يكون أكبر عقبةٍ أمام التنفيذ. بوجود إرشادٍ محدودٍ في السياسات ونطاقٍ كبيرٍ للشك في ما يتعلق بتداعيات الملكية الفكرية في ما يخصّ التكنولوجيا القائمة، من المهم أن تبادر وزارة الدفاع إلى مناقشةٍ شاملةٍ مع أصحاب الشأن الملائمين لمعالجة المخاوف المتعلقة بحيازة بالملكية الفكرية وتوليد الأرباح في عهدٍ من الإنتاج المُموضَع. من بعض الجوانب، يمكن مقارنة هذه الرقمنة للتصنيع برقمنة الموسيقى، مما يستدعي إلى الذهن تعطيل هيكلية الترخيص والإيرادات بالنسبة لصناعة التسجيلات الذي تسببت به آي تيونز (iTunes) وتحديات التحويل إلى نقدٍ في العصر الرقميّ. إنّ هذا سيظلّ اعتباراً مهماً حتى يتم تطوير قرارٍ في السياسات.

بالإضافة إلى حلّ التداعيات القانونية والنقدية للتكنولوجيا، على وزارة الدفاع أن تتخذ قراراتٍ داخليةً بشأن حماية التصاميم الحساسة والعثور على مقاربةٍ لِخَزْنِ التصاميم الحساسة وتلك التي تحمل ملكيةً مسجَّلَةً للقِطَع، بشكلٍ آمنٍ ويمكن الاعتماد عليه. سوف تستهدف الهجمات الإلكترونية هذه المستودعات على الأرجح، وإنّ تعديلاتٍ على الشبكات الآمنة القائمة قد تكون ضروريةً لمواءمة حاجات الطباعة الثلاثية الأبعاد في المواقع البعيدة.

نِسبَةً للجهات الفاعلة الأخرى في الميدان، تملك الولايات المتحدة موقعاً قوياً، تُكمّله قاعدةٌ اقتصاديةٌ قويةٌ نسبياً في بعض الأمم المتحالفة، لاسيما في اليابان وألمانيا والمملكة المتحدة. إننا نتوقع أن تتزايد المنافسة في مجال التصنيع بالإضافة (AM) نظراً للقدرة الكبيرة التي تستبطنها التكنولوجيا. إنّ اليابان تكاد تساوي الولايات المتحدة في حيازاتها للملكية الفكرية، وبينما يتدنى تمثيل ألمانيا في قاعدة بيانات براءات الاختراع، فإنّ الخبراء في المجال على نطاقٍ واسعٍ يعتبرونها رائدةً عالمية. يوجد أيضاً تخوّفٌ كبيرٌ من أن تتفوق بلدانٌ مثل الصين وروسيا على الولايات المتحدة في تطوير قدراتٍ في التصنيع بالإضافة. المكونات التي "صُمِّمَت للتصنيع بالإضافة" يمكن مواءمتها لأغراض التسلح، مثلاً، باستخدام موادَّ متعددة الوظائف من أجل توفير خصائصَ جديدةٍ للدروع السلبية والنّشطة، بالإضافة إلى الأسلحة الفعلية. من دون برنامجٍ عسكريٍّ نشطٍ للأبحاث، يزيد احتمال أن يعثر الخصوم على مزايا تكون الولايات المتحدة غافلةً عنها ويستغلوها. ينبغي على وزارة الدفاع أن تستفيد من النشاط التجاريّ حيث استطاعت، ولكن يجب أن تُتبِعَ هذا الأمر بتطويرٍ انتقائيٍّ للمكونات الجديدة في المجالات التي توفر ميزةً عسكرية.

إن سياسات الحيازة القائمة وعملياتها يجب مراجعتها من أجل النظر في تداعيات التصنيع بالإضافة (AM) بالنسبة للمنصات العسكرية. إنّ الإفصاح عن الحاجة وحتى التخويل بإلزام استخدام التصنيع بالإضافة هو إحدى المقاربات المحتملة. المقاربات الأخرى تشمل تبرير المقاربة إلى الترخيص والاختبار بالنسبة لمكوناتٍ مُصنَّعَةٍ بواسطة تكنولوجيا التصنيع بالإضافة، مما يضمن أن تكون قِطَع الصيانة والإصلاح والتشغيل (MRO) متوافقةً مع الطباعة الثلاثية الأبعاد،

كجزءٍ من التصميم الأصليّ، ويزيد من مرونة الشراء في حالاتٍ توفر فيها قِطَع التصنيع بالإضافة وأدواتها أداءً مساوياً أو متفوقاً على المنتجات الحالية. في غضون السنوات القليلة القادمة، من المنطقيّ توقُّعُ رؤية أنظمة أسلحةٍ تشتمل على قِطَعٍ صُمِّمَت للتصنيع بالإضافة، والتي سوف تستلزم قدرةً في التصنيع بالإضافة من أجل استبدالها.

الخلاصة

إنّ الطباعة الثلاثية الأبعاد الميسورة التكلفة، المحلية أو تلك التي تكون في المراحل النهائية، سوف تؤثّر على مجالات التصنيع حول العالم، وقد تقدّم لوزارة الدفاع مزايا كبيرةً في إدارة سلسلة الإمداد وجهوزيتها وقدراتها الجديدة. لكنّ التحديات في مجالاتٍ مثل إدارة الملكية الفكرية، والأمن الإلكترونيّ، وسياسات الحيازة، يجب التعامل معها من أجل ضمان النجاح. إنّ المنافسة الدولية الحادة في المجالَين الاقتصاديّ والعسكريّ توفر حافزاً قوياً من أجل استثمارٍ متينٍ من جهة وزارة الدفاع. لكي ينجح الجيش الأمريكيّ في نشر هذه التكنولوجيا، فإنّ تغييراتٍ هيكليةً سوف تكون لازمةً لتحقيق انتقالٍ فعال. مع حلول التصنيع بالإضافة (AM) محل بعض العمليات التقليدية في التصنيع وإدارة سلسلة الإمداد، فإنّ التعاون ما بين الجيش الأمريكيّ، والقطاع الصناعيّ، والأوساط الأكاديمية، سوف يكون مهماً لضمان أن تتحقق القدرة الناتجة ووفورات التكلفة إلى مداها الأقصى.

الملاحظات

[1] من المصطلحات المستخدمة سابقاً لتسمية التصنيع بالإضافة (AM): التصنيع المُمَكْنَن، وتصنيع الأشكال الحرة، والتصنيع المعتمِد على تصفيف الطبقات.

[2] غيبسون وآخرون (Gibson et al.)، 2015؛ مكتب المحاسبة الحكوميّ الأمريكيّ (U.S. Government Accountability Office)، "الطباعة الثلاثية الأبعاد: الفرص والتحديات والتبعات في السياسات للتصنيع بالإضافة" *(3D Printing: Opportunities, Challenges, and Policy Implications of Additive Manufacturing)*، GAO-15-505SP، يونيو/حزيران 2015.

[3] راجِع: محمّد واعظي (Mohammad Vaezi)، سريسيت شيانرابوترا (Srisit Chianrabutra)، برايان مِلور (Brian Mellor)، وشوفِنغ يانغ (Shoufeng Yang)، "التصنيع بالإضافة المتعدد المواد — الجزء الأول: مراجعة" (Multiple Material Additive Manufacturing—Part 1: A Review)، فيرتشوال أند فيزيكال بروتوتايبينغ *(Virtual and Physical Prototyping)*، مجلد رقم 8، عدد رقم 1، 2013، ص. 19-50؛ وجوزيف إي. غريدي وآخرون (Joseph E. Grady et al.)، "محرّكٌ نفاثٌ لا معدنيٌّ غازيٌّ (باحتراقٍ داخليّ) بالكامل أصبح ممكناً بواسطة التصنيع بالإضافة، الجزء الأول: تحليل النظام، تعريف المكونات، التصنيع بالإضافة، واختبار المُرَكَّبات البوليمرية" *(A Fully Nonmetallic Gas Turbine Engine Enabled by Additive Manufacturing*, Part I: *System Analysis, Component Identification, Additive Manufacturing, and Testing of Polymer Composites)*، الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (National Aeronautics and Space Administration)، NASA (ناسا)/ TM—2015-218748، مايو/أيار 2015.

[4] إعلان الأداء لشركة نيكون (Nikon)، كما شَهِدَه الفريق البحثيّ خلال إظهارٍ حَيٍّ في 21 أغسطس/آب، 2016.

[5] استخدمنا المصطلحات البحثية التالية: بَثْق المواد، الرمل، البوليمر، تصفيح الرقائق، الإلحام في مِهادٍ من المسحوق، النمذجة بالنفث المتعدد، التصنيع بنفث الرابط السائل، الفتيل أو المعجون. كان العدد الإجماليّ لسجلات براءات الاختراع التي تم تحليلها 102,947.

[6] راجِع: حقوق الملكية الفكرية في الصين "الصين تعتزم توفير حوافزَ ماليةٍ لقاء تقديم طلباتٍ لنَيل براءات الاختراع في الخارج" (China to Provide Financial Incentives for Filing Patent Applications Abroad)، منشورٌ في مُدَوَّنَة، 12 يونيو/حزيران، 2016. راجِع أيضاً: وزارة الخارجية للشؤون المالية في جمهورية الصين الشعبية، "إشعارٌ بشأن طباعة الإجراءات المتعلقة بإدارة الصناديق الخاصة المعنية بالمساعدة على نَيل براءات الاختراع، وتوزيعها في البلدان الأجنبية" (Notice on Printing and Distributing the Measures for the Administration of Special Funds for Patent Assistance to Foreign Countries)، 14 أبريل/نيسان، 2012.

[7] محادثةٌ للمؤلفين مع موظفي مختبرات لورنس ليفرمور الوطنية (Lawrence Livermore National Laboratories)، 28 يونيو/حزيران، 2016.

المراجع

3D Systems, "Learn About Our Processes," web page, undated. As of November 21, 2016: http://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production

Acs, Zoltan J., Luc Anselin, and Attila Varga, "Patents and Innovation Counts as Measures of Regional Production of New Knowledge," *Research Policy*, Vol. 31, No. 7, 2002, pp. 1069–1085. As of June 8, 2017: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733301001846

Autodesk Research, "Project Dreamcatcher," web page, undated. As of November 21, 2016: https://autodeskresearch.com/projects/Dreamcatcher

Brewer, John, and Albert Hunter, *Multimethod Research: A Synthesis of Styles*, Newbury Park, Calif.: Sage Publications, 1989.

Carbon3D, homepage, undated. As of June 8, 2017: http://carbon3d.com

China IPR, "China to Provide Financial Incentives For Filing Patent Applications Abroad," blog post, June 12, 2016. As of November 21, 2016: https://chinaipr.com/2012/06/12/china-to-provide-financial-incentives-for-filing-patent-applications-abroad

DoE—*See* U.S. Department of Energy.

Dolenc, A., *An Overview of Rapid Prototyping Technologies in Manufacturing*, working paper, Helsinki University of Technology, July 24, 1994. As of August 15, 2016: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.9496&rep=rep1&type=pdf

EOS, "Welcome to EOS," homepage, undated. As of June 8, 2017; https://www.eos.info/en

Eusebi, Christopher, and Richard Silberglitt, *Identification and Analysis of Technology Emergence Using Patent Classification*, RR-629-OSD, Santa Monica, Calif.: RAND Corporation, 2014. As of November 21, 2016: http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR629.html

Foreign Ministry of Finance of the People's Republic of China, "Notice on Printing and Distributing the Measures for the Administration of Special Funds for Patent Assistance to Foreign Countries," April 14, 2012. As of November 1, 2016: http://www.gov.cn/zwgk/2012-05/31/content_2149501.htm

Petrick, I. J., and T. W. Simpson, "3D Printing Disrupts Manufacturing: How Economies of One Create New Rules of Competition," *Research Technology Management*, Vol. 56, No. 6, 2013, pp. 12–16.

Petrovic, V., J. V. H. Gonzalez, O. J. Ferrando, J. D. Gordillo, J. R. B. Puchades, and L. P. Grinan, "Additive Layered Manufacturing: Sectors of Industrial Application Shown Through Case Studies," *International Journal of Production Research*, Vol. 49, No. 4, 2011, pp. 1061–1079.

Rosen, David W., "Design for Additive Manufacturing: A Method to Explore Unexplored Regions of the Design Space," Eighteenth Annual Solid Freeform Fabrication Symposium, 2007.

Rubin, Herbert J. and Irene S. Rubin, *Qualitative Interviewing: The Art of Hearing Data*, 2nd ed., Thousand Oaks, Calif.: Sage Publications, 2005.

Stebbins, Robert A., *Exploratory Research in the Social Sciences*, Los Angeles, Calif.: Sage Publications, 2001.

Um, D., *Solid Modeling and Applications: Rapid Prototyping, CAD and CAE Theory*, New York: Springer, 2015.

UPS, "Store Locations with 3D Printing," web page, undated. As of June 8, 2017: https://www.theupsstore.com/print/3d-printing/locations

U.S. Department of Energy, "Chapter 6: Innovating Clean Energy Technologies in Advanced Manufacturing: Technology Assessments," *Quadrennial Technology Review 2015*, Washington, D.C., 2015.

U.S. Government Accountability Office, *3D Printing: Opportunities, Challenges, and Policy Implications of Additive Manufacturing*, GAO-15-505SP, June 2015. As of November 21, 2016: http://www.gao.gov/assets/680/670960.pdf

Vaezi, Mohammad, Srisit Chianrabutra, Brian Mellor, and Shoufeng Yang, "Multiple Material Additive Manufacturing—Part 1: A Review," *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 8, No. 1, 2013, pp. 19–50.

Weber, C. L., V. Peña, M. K. Micali, E. Yglesias, S. A. Rood, J. A. Scott, and B. Lal, *The Role of the National Science Foundation in the Origin and Evolution of Additive Manufacturing in the United States*, Alexandria, Va.: IDA Science and Technology Policy Institute, November 2013. As of November 21, 2016: https://www.ida.org/-/media/Corporate/Files/Publications/STPIPubs/ida-p-5091.ashx

Gibson, Ian, David Rosen, and Brent Stucker, "Binder Jetting," in Gibson, Rosen, and Stucker, eds., *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd ed., New York: Springer, 2015, pp. 205–218.

Grady, Joseph E., William J. Haller, Philip E. Poinsatte, Michael C. Halbig, Sydney L. Schnulo, Mrityunjay Singh, Don Weir, Natalie Wali, Michael Vinup, Michael G. Jones, Clark Patterson, Tom Santelle, and Jeremy Mehl, *A Fully Nonmetallic Gas Turbine Engine Enabled by Additive Manufacturing* Part I: *System Analysis, Component Identification, Additive Manufacturing, and Testing of Polymer Composites*, National Aeronautics and Space Administration, NASA/TM—2015-218748, May 2015.

Grant, M. J., and A. Booth, "A Typology of Reviews: An Analysis of 14 Review Types and Associated Methodologies," *Health Information and Libraries Journal*, Vol. 26, No. 2, 2009, pp. 91–108.

Inchaurregui, Julian, "Computer Aided Design/CAD: A Brief History," 2007.

International Organization for Standardization and ASTM International, "Additive Manufacturing—General Principles—Terminology," ISO/ASTM 52900:2015, 2015. As of August 10, 2016: https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en

ISO—*See* International Organization for Standardization.

Katila, Riitta, "Measuring Innovation Performance," *International Journal of Business Performance Measurement*, Vol. 2, 2000, pp. 180–193. As of June 8, 2017: http://web.stanford.edu/~rkatila/new/pdf/KatilaUsingpatentdata.pdf

Khangura, S., K. Konnyu, R. Cushman, J. Grimshaw, and D. Moher, "Evidence Summaries: The Evolution of a Rapid Review Approach," *Systematic Reviews*, Vol. 1, No. 10, 2012.

Kvale, Steinar, *Doing Interviews*, Los Angeles, Calif.: Sage Publications, 2008.

McCue, T. J., "Wohlers Report 2016: 3D Printing Industry Surpassed $5.1 Billion," *Forbes*, April 25, 2016. As of April 26, 2017: https://www.forbes.com/sites/tjmccue/2016/04/25/wohlers-report-2016-3d-printer-industry-surpassed-5-1-billion/#2bf4963f19a0

Peña, V., B. Lal, and M. Micali, "U.S. Federal Investment in the Origin and Evolution of Additive Manufacturing: A Case Study of the National Science Foundation," *3D Printing and Additive Manufacturing*, Vol. 1, No. 4, 2014, pp. 185–193.

Zhai, Y. W., D. A. Lados, and J. L. Lagoy, "Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation," *Journal of Operations Management*, Vol. 66, No. 5, 2014, pp. 808–816.

Zheng, Xiaoyu, Howon Lee, Todd H. Weisgraber, Maxim Shusteff, Joshua DeOtte, Eric B. Duoss, Joshua D. Kuntz, Monika M. Biener, Qi Ge, Julie A. Jackson, Sergei O. Kucheyev, Nicholas X. Fang, and Christopher M. Spadaccini, "Ultralight, Ultrastiff Mechanical Metamaterials," *Science*, Vol. 344, No. 6190, June 20, 2014, pp. 1373–1377.

صورة الغلاف الأمامي هي من تصميم كزومتري (Xometry)

عن هذا المنظور التحليلي

يصف هذا المنظور التحليليّ الاستخدامات المحتملة ومنافع الطباعة الثلاثية الأبعاد في سياقٍ عسكريٍّ من أجل مساعدة وزارة الدفاع الأمريكية (DoD) على فهم التطبيقات الممكنة والتغييرات الهيكلية والتغييرات في السياسات التي قد تكون لازمةً لدعم هذه الجهود. يناقش هذا المنظور التحليليّ أنواعاً مختلفةً من تكنولوجيات الطباعة الثلاثية الأبعاد، فيتَتَبَّعُها من مصدرها وصولاً إلى القدرة التي تستبطنها على تحويل سلاسل الإمداد بالنسبة لوزارة الدفاع. بتطبيقه تعريفاً للطباعة الثلاثية الأبعاد يستند إلى القدرة، يوفر هذا المنظور التحليليّ إطار عملٍ لمساعدة وزارة الدفاع على التفكير في التأثيرات المستقبلية على سلسلة الإمداد الخاصة بها.

تمت رعاية هذا البحث من قبل مكتب وكيل وزارة الدفاع لشؤون الحيازة، والتكنولوجيا، واللوجستيات، وموارد الحيازة، والتحليل (Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics, Acquisition Resources and Analysis)، وأُجريَ في مركز سياسات الحيازة والتكنولوجيا (Acquisition and Technology Policy Center) التابع لمعهد أبحاث RAND للدفاع الوطنيّ (RAND National Defense Research Institute)، وهو مركز بحوثٍ وتطويرٍ يعمل بتمويلٍ فيدراليّ، وبرعاية مكتب وزير الدفاع، وهيئة الأركان المشتركة (Joint Staff)، وقيادة المقاتلين الموحَّدة (Unified Combatant Commands)، وقوات البحرية (Navy)، وقوات مشاة البحرية (Marine Corps)، ووكالات الدفاع (Defense Agencies)، ومجموعة استخبارات الدفاع (Defense Intelligence Community).

للمزيد من المعلومات حول مركز سياسات الحيازة والتكنولوجيا (Acquisition and Technology Policy Center) التابع لمؤسسة RAND، الرجاء زيارة الموقع الإلكتروني www.rand.org/nsrd/ndri/centers/atp أو الاتصال بالمدير (معلومات الاتصال متوفرة على الصفحة الإلكترونية).

عن المؤلفين

سيمون فيرونو (Simon Véronneau) هو عالمٌ في الإدارة في مؤسسة RAND. تركّز أبحاثه على التكنولوجيا في سلاسل الإمداد، والاستراتيجيات العالمية لسلاسل الإمداد، والقضايا البحرية، وإدارة المواصلات، وسلاسل إمداد الخدمات، وإدارة العمليات المهمة في الوقت الآنيّ. هو يحمل شهادة الدكتوراه في إدارة العمليات من كلية الدراسات العليا التجارية في مونتريال (HEC Montreal).

جيفري تورينغتون (Geoffrey Torrington) هو عضوٌ في هيئة التدريس في كلية Pardee RAND للدراسات العليا (Pardee RAND Graduate School) والمدير التقنيّ في شركة باي سيستمز، (BAE Systems, Inc.). لقد عَمِلَ في أثناء مساره المهنيّ على مجموعةٍ متنوعةٍ من المشاريع، شَمَلَت تحليل القدرة الردعية في الحرب الفضائية، والأنظمة الجديدة في الاستشعار عن بُعد، والكشف بواسطة الليزر، والإنذار من التهديدات بواسطة الليزر. إنه يحمل شهادة الماجستير في العلوم البصرية من جامعة أريزونا (University of Arizona).

جاكوب ب. هلافكا (Jakub P. Hlávka) هو مرشحٌ للدكتوراه في كلية Pardee RAND للدراسات العليا (Pardee RAND Graduate School)، وباحثٌ مساعدٌ في السياسات في مؤسسة RAND. تعالج أبحاثه مسألَة الاستثمار في الأبحاث والتطوير (R&D investment) من قِبَل القطاعَين العام والخاص؛ تأثيرات الابتكار على الرعاية الصحية والتربية والمواصلات؛ ونظرية وتطبيق الأمن القوميّ. تلقّى شهادته في الماجستير في الشؤون الدولية من كلية السلك الديبلوماسيّ التابعة لجامعة جورجتاون (Georgetown University's School of Foreign Service) وشهادته في الماجستير في تحليل السياسات من كلية Pardee RAND للدراسات العليا.

حقوق الطبع والنشر الإلكتروني محدودة

هذه الوثيقة والعلامة (العلامات) التجارية الواردة فيها محميةٌ بموجب القانون. يتوفّر هذا التمثيل للملكية الفكرية الخاصة بمؤسسة RAND للاستخدام لأغراض غير تجارية حصرياً. يحظر النشر غير المصرَّح به لهذا المنشور عبر الإنترنت. يُصرّح بنسخ هذه الوثيقة للاستخدام الشخصيّ فقط، شريطة أن تظل مكتملةً دون إجراء أي تعديلٍ عليها. يلزم الحصول على تصريح من مؤسسة RAND، لإعادة إنتاج أو إعادة استخدام أي من الوثائق البحثية الخاصة بنا، بأي شكلٍ كان، لأغراضٍ تجارية. للمزيد من المعلومات حول تصاريح إعادة الطباعة والربط على المواقع الإلكترونية، الرجاء زيارة صفحة التصاريح في موقعنا الإلكتروني www.rand.org/pubs/permissions.html

مؤسسة RAND هي منظمةٌ بحثية تعمل على تطوير حلولٍ لتحدّيات السياسات العامة وللمساعدة في جعل المجتمعات في أنحاء العالم أكثر أمناً وأماناً، وأكثر صحّةً وازدهاراً. مؤسسة RAND هي مؤسسةٌ غير ربحية، حيادية، وملتزمةٌ بالصالح العامّ.

لا تعكس منشورات مؤسسة RAND بالضرورة آراء عملاء ورعاة الأبحاث الذين يتعاملون معها. **RAND**® علامةٌ تجاريةٌ مسجلة.

للحصول على مزيدٍ من المعلومات حول هذا المنشور، الرجاء زيارة الموقع الإلكتروني: www.rand.org/t/PE229

© حقوق الطبع والنشر لعام 2017 محفوظة لمؤسسة **RAND**

RAND CORPORATION

www.rand.org

Arabic Translation
"3D Printing"
PE-229/1-OSD