

الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة التصميم الميكانيكي

ماجستير أتمتة الإنتاج



مقارنة بين تقنيتي الطباعة الثلاثية والرابعة الأبعاد وتطبيقاتهما
(دراسة الحالة: من حيث زمن التصنيع واستهلاك المواد)

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في أتمتة الإنتاج

إعداد

م. رفاة محمد جمعه

المشرف العلمي

أ. د. م. محمود بهاء الدين بني المرجة

2025-2024

قرار لجنة الحكم

على أطروحة الماجستير في قسم هندسة التصميم الميكانيكي - اختصاص أتمتة الإنتاج

التي أعدتها الطالبة رفاة محمد جمعه وهي بعنوان:

"مقارنة بين تقنيتي الطباعة الثلاثية والرابعة الأبعاد وتطبيقاتهما

(دراسة الحالة: من حيث زمن التصنيع واستهلاك المواد)"

تم إجراء التعديلات المطلوبة، وأصبحت الأطروحة صالحة لمنح درجة الماجستير باختصاص

أتمتة الإنتاج

أعضاء لجنة الحكم

اللقب العلمي	الاسم	الصفة في اللجنة	التوقيع

كلمة شكر وتقدير

أتوجه بخالص الشكر والتقدير إلى الدكتور المشرف محمود بهاء الدين بني المرجة، الذي كان داعماً لي منذ بداية مسيرتي الجامعية، وكان لخبرته وتوجيهاته العلمية الدقيقة دور محوري في إنجاز هذا البحث، فكل الامتنان له على جهوده ومتابعته المستمرة.

كما أعرب عن بالغ امتناني للدكتور مهلب الداوود، عميد كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، لما قدّمه من دعم وتشجيع معنوي كان له بالغ الأثر في مواصلة العمل بثقة وثبات.

وأنتقدم بالشكر أيضاً إلى الدكتور عبد الوهاب وتار، الذي لم يتردد في تخصيص جزء من وقته لتقديم المساعدة في الجانب التصميمي من البحث، فكانت مساهمته محل تقدير كبير.

ولا أنسى أن أشكر كل من قدم لي العون أو المشورة في أي مرحلة من مراحل هذا العمل، ولكل من آمن بقدرتي، وكان سبباً في دفع هذا العمل نحو الاكتمال، كل الشكر والامتنان.

الإهداء

إلى من كانت دائماً بجانبني، دعواتها سر توفيقني، صديقتي رفيقة دربي في كل خطوة... إلى أُمي الحبيبة

إلى سندي الأول، مصدر عزيمتي، قدوتي ومعلمي...

إلى شريكي، رفيق دربي، درعي وحصني وملجأ... إلى زوجي

إلى قرة عيني، بهجة روحي، من أرى فيه المستقبل والأمل...

إلى أختي، صديقتي، ملهمتي...

إلى من بهم تكتمل فرحتي، ومنهم أستمد القوة والعزيمة، إلى من تقاسموا معي تفاصيل الرحلة بجلوها ومرها.

إلى عمر، وفاء، رفيدة، رنيم، محمد، ياسر.

إلى من رحل عنا وهو باقٍ في قلوبنا...

إلى عائلتي الثانية، من احتضنوني وقدموا لي الدعم والمحبة...

إلى والدة زوجي، نور، سيرين، آية، ساجدة.

إلى رفيقات الدرب، وصديقات اللحظات الجميلة، من شاركني هذا المسير...

سارة، نهي، فاطمة، براء، ومرح.

إلى صديقات العمر، ورفيقات الذكريات الخالدة، من بقين في القلب رغم بعد المسافات...

ظلال، آيات، رنين، رهف، وتقى.

كل خطوة في هذا الطريق حملت بصمة من أحب.... شكرا من القلب.

المحتويات

3	 كلمة شكر وتقدير
4	 الإهداء
5	 المحتويات
12	 قائمة الجداول
13	 قائمة الأشكال
17	 الفصل الأول: تمهيد للبحث
17	1- المقدمة.....,
17	2- مشكلة البحث
18	3- تساؤلات البحث
18	4- الهدف من البحث.....
18	5- أهمية البحث
19	6- منهجية البحث
20	 الفصل الثاني: تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد 3D Printing
20	1- تاريخ التقنية
21	2- الفرق بين تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد وطرق التصنيع الأخرى.....
22	3- مراحل عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد
24	4- أنواع تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد

24	1-4	دمج طبقات المساحيق (PBF Powder Bed Fusion)
25	2-4	البلمرة الضوئية (Vat Photopolymerization)
25	1-2-4	معالجة الضوء الرقمية (Digital Light Processing DLP)
26	2-2-4	الطباعة الحجرية المجسمة (Stereolithography SLA)
29	3-2-4	الطباعة باستخدام شاشة الكريستال السائل (Liquid Crestal Display LCD)
30	3-4	تصنيع النماذج الرقائقية (Laminated Object Manufacturing LOM)
32	4-4	التلبيد الانتقائي بالليزر (SLS Selective Laser Sintering)
35	5-4	التلبيد بالليزر المباشر للمعادن (DMLS)
37	6-4	بثق المواد (FDM Fused Deposition Modelling)
39	5	المواد الأولية في تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد (تحديدا تقنية بثق المواد FDM)
39	1-5	المعادن
40	2-5	البوليميرات
40	1-2-5	Acrylonitrile Butadiene Styrene Polymer(ABS)
41	1-1-1-5	الخواص الكيميائية والفيزيائية
42	2-1-1-5	الخواص الميكانيكية
44	2-1-5	Polylactic Acid Polymer (PLA)
45	1-2-1-5	الخواص الكيميائية والفيزيائية
46	2-2-1-5	الخواص الميكانيكية
47	3-1-5	Polyamide/Nylon Polymer
47	4-1-5	Polyetheretherketone Polymer (PEEK)
47	6	تطبيقات الطباعة ثلاثية الأبعاد
47	1-6	في الفضاء الخارجي
48	2-6	في مجال الطيران
48	3-6	في الهندسة المعمارية
49	4-6	صناعة السيارات
51	5-6	الرعاية الصحية والصناعة الطبية

53	القطع الإلكتروني	6-6-
53	المنتجات الرياضية	6-7-
53	الألعاب	6-8-
54	صناعة الأسنان	6-9-
54	صناعة الطعام	6-10-
55	موجز الفصل	7-
56	الفصل الثالث: تقنية الطباعة رباعية الأبعاد 4D Printing	
56	1- تاريخ التقنية	
56	2- تعريف تقنية الطباعة رباعية الأبعاد	
57	3- قوانين الطباعة رباعية الأبعاد	
57	1-3- القانون الأول	
57	2-3- القانون الثاني	
57	1-2-3- الانتشار الكتلي	
58	2-2-3- التمدد الحراري	
59	3-2-3- التحول الجزيئي	
61	4-2-3- النمو العضوي	
62	3-3- القانون الثالث	
64	4- المواد الذكية (SMART MATERIALS)	
64	1-4- المواد الذكية النانوية المحسنة (Enhanced smart nanocomposites)	
65	2-4- سبائك الذاكرة الشكلية (Shape memory alloys SMA)	
66	3-4- المواد الذكية ذات ذاكرة الشكل (Shape Memory Materials SME)	
67	1-3-4- المواد الذكية الحساسة للضوء (Light Responsive Materials)	
67	2-3-4- المواد الذكية الحساسة للحرارة (Thermo-Responsive SMMs)	
68	3-3-4- المواد الحساسة للمغطة (Magnetostriuctive Materials)	
68	4-3-4- المواد الذكية الحساسة للكهربة (Electroactive Polymer – EAP)	
69	5- مبدأ عمل تقنية الطباعة رباعية الأبعاد	

70	1-5- الطباعة رباعية الأبعاد بمادة واحدة
70	2-5- الطباعة رباعية الأبعاد بمواد متعددة
71	1-1-5- مشغلات الروبوتات اللينة
72	2-1-5- الهياكل ذاتية التطور
75	3-1-5- الأوريجامي النشط والطبي التسلسلي المُتَحَكَّم
82	6- تطبيقات تقنية الطباعة رباعية الأبعاد
82	1-6- الروبوتات الدقيقة
82	1-1-6- الروبوتات الدقيقة المستخدمة في توصيل الأدوية
82	1-1-1-6- الروبوت الدقيق المعتمد على الهلام المائي
83	2-1-1-6- الميكروسويمر الهلامي
83	3-1-1-6- الروبوت الحلزوني المغناطيسي
84	2-1-6- المشغلات المتغيرة الشكل
86	2-6- الهياكل ذاتية البناء
86	1-2-6- الحاويات
88	2-2-6- انحناء الأسطح
88	3-2-6- خزائن وصناديق الأمان
89	3-6- الأجهزة الطبية
89	1-3-6- توصيل الدواء المُستهدف
90	2-3-6- الدعامات
91	3-3-6- الجبائر
92	7- موجز الفصل
93	الفصل الرابع: دراسة وتحليل معطيات البحث
93	1-7- المقدمة
93	2-7- الدراسات المرجعية
93	1-2- دراسة (Kantaros 2023)

95	دراسة (Ahmed 2021) 2-2
97	دراسة (Honghui 2020) 3-2
98	(Cabrer, 2024) 4-2
100	3- تحليل البيانات المتوفرة
100	3-1- تحليل الدراسات المرجعية
100	3-2- بديهيات متعلقة بالإجراء التجريبي
101	3-1-2- بديهيات
102	3-1-1-2- حجم النموذج
102	3-2-1-2- تعبئة النموذج
102	3-3-1-2- سماكة الجدران
103	3-4-1-2- سماكة السطحين العلوي والسفلي
103	3-5-1-2- شكل التصميم
103	3-6-1-2- طريقة توضع النموذج
103	3-7-1-2- الدعامات
104	3-8-1-2- سرعة الطباعة
104	3-9-1-2- الدقة على المحور العمودي
104	3-10-1-2- الدقة في المستوى الأفقي
104	3-11-1-2- نوع المادة
105	3-12-1-2- قطر الفوهة
105	3-3- التطبيقات الرائدة لتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد
106	4- مجريات البحث
106	4-1- نطاق البحث التجريبي
106	4-2- مجريات البحث
108	الفصل الخامس: الإجراء التجريبي للبحث
108	1- منهجية التجربة وضبط البارامترات
108	1-1- البارامترات الثابتة

108	حجم النموذج	-1-1-1
108	سماكة الجدران، وسماكة طبقات السطح السفلي والعلوي	-2-1-1
108	سرعة الطباعة	-3-1-1
109	قطر الفوهة	-4-1-1
109	درجة حرارة الطباعة	-5-1-1
109	البارامترات المتغيرة	-2-1
109	تعبئة الجسم	-1-2-1
109	توضع النموذج	-2-2-1
109	الدعامات	-3-2-1
110	الدقة على المحور العمودي	-4-2-1
110	نوع المادة	-5-2-1
110	تقنية تبديل المواد يدويا	-3-1
112	اختبار النموذج (A)	-2
112	طباعة النموذج (3DA) المكعب باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد	-1-2
112	إنشاء التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DA)	-1-1-2
112	تحضير التصميم الافتراضي (3DA) للطباعة	-2-1-2
113	طباعة النموذج (3DA)	-3-1-2
114	طباعة النموذج (4DA1, 4DA2) باستخدام تقنية الطباعة رباعية الأبعاد	-2-2
114	إنشاء التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (4DA1, 4DA2)	-1-2-2
114	تحضير التصميم الافتراضي (4DA1, 4DA2) للطباعة	-2-2-2
115	طباعة النموذج (4DA1)	-3-2-2
117	طباعة النموذج (4DA2)	-4-2-2
118	اختبار النموذج (B)	-3
118	طباعة النموذج (3DB) باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد	-1-3
118	إنشاء التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DB)	-1-1-3
118	تحضير التصميم الافتراضي (3DB) للطباعة	-2-1-3

119	3-1-3 طباعة النموذج (3DB)
120	2-3 طباعة النموذج (4DB1, 4DB2) باستخدام تقنية الطباعة رباعية الأبعاد
120	1-2-3 إنشاء التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (4DB1, 4DB2)
121	2-2-3 تحضير التصميم الافتراضي (4DB1, 4DB2) للطباعة
121	3-2-3 طباعة النموذج (4DB1)
123	4-2-3 طباعة النموذج (4DB2)
124	الفصل السادس: النتائج والتوصيات
124	1- عرض النتائج
124	1-1 نتائج استهلاك المواد
125	2-1 نتائج زمن التصنيع
126	3-1 تحليل النماذج غير الناجحة
126	1-3-1 تشوه كامل للقطعة عند المفصل
127	2-3-1 إغلاق غير كامل للنموذج A
128	2- تحليل ومناقشة النتائج
128	1-2 تحليل تأثير نوع التقنية على استهلاك المواد
128	2-2 تحليل تأثير نوع التقنية على زمن التصنيع
129	3-2 الاستنتاجات
129	4-2 التوصيات والملاحظات
131	المراجع

قائمة الجداول:

الجدول (1) مواصفات مطبوعات تقنية SLA	28
الجدول (2) مواصفات مطبوعات تقنية LOM	32
الجدول (3) مواصفات مطبوعات تقنية SLS	34
الجدول (4) مواصفات مطبوعات تقنية DMLS	37
الجدول (5) مواصفات مطبوعات تقنية FDM	39
الجدول (6) الخواص الكيميائية والفيزيائية لمادة ABS	41
الجدول (7) الخواص الميكانيكية لمادة ABS	42
الجدول (8) الخواص الكيميائية والفيزيائية لمادة PLA	45
الجدول (9) مقارنة بين التقنيتين من حيث تقنيات الطباعة والمواد المستخدمة	94
الجدول (10) المواد المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد ورباعية الأبعاد	99
الجدول (11) ملخص أوجه التشابه والاختلاف بين التقنيتين	101
الجدول (12) علاقة البارامترات الأساسية لعملية الطباعة بكل من استهلاك المواد وزمن التصنيع.....	111
الجدول (13) نتائج استهلاك المواد	124
الجدول (14) نتائج زمن التصنيع	125

قائمة الأشكال:

- الشكل (1) الفرق بين عمليات التشغيل والتشكيل 21
- الشكل (2) مراحل عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد 22
- الشكل (3) مخطط مراحل عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد 23
- الشكل (4) آلية عمل تقنية التليد الليزري الانتقائي 25
- الشكل (5) آلية عمل تقنية البلمرة الضوئية DLP 26
- الشكل (6) آلية عمل تقنية البلمرة الضوئية بالليزر الانتقائي 27
- الشكل (7) نماذج مطبوعة بتقنية SLA 28
- الشكل (8) آلية عمل تقنية LCD 29
- الشكل (9) نماذج مطبوعة بتقنية LCD 30
- الشكل (10) آلية عمل تقنية LOM 31
- الشكل (11) نماذج مطبوعة بتقنية LOM 31
- الشكل (12) آلية عمل تقنية SLS 33
- الشكل (13) نماذج مطبوعة بتقنية SLS 33
- الشكل (16) آلية عمل تقنية بثق المواد 38
- الشكل (17) الرسوم البيانية بين الإجهاد الهندسي والانفعال لمادة ABS 43
- الشكل (18) الرسوم البيانية لمقاومة الصدم والشد والتأثير على ABS 43
- الشكل (19) دورة تصنيع مادة PLA 44

- الشكل (20) بثق مادة PLA من رأس الطباعة 45
- الشكل (21) منحني الإجهاد والانفعال لـ PLA عند درجات حرارة مختلفة 46
- الشكل (22) طائرة مصنعة باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد 48
- الشكل (23) طباعة الجدران باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد 49
- الشكل (24) هيكل لسيارة مصنع باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد 50
- الشكل (25) تطبيقات طبية لتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد 52
- الشكل (26) مجموعة من الألعاب مصنعة باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد 53
- الشكل (27) تحول هيكل خطي بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد 56
- الشكل (28) هيكل مطبوع رباعي الأبعاد متعدد المواد 63
- الشكل (29) أمثلة عن نماذج تحوي عينات من المواد النانوية الكهروضغطية ثنائية البعد على شكل مصفوفات ... 64
- الشكل (30) مثالاً على بنية SMP باستخدام طباعة ثلاثية الأبعاد 67
- الشكل (31) المخطط الزمني لأنبوب مطبوع بالمواد ذات الذاكرة 68
- الشكل (32) المحفزات المتعددة للمواد الذكية 69
- الشكل (33) هيكل ذاتي التطور 73
- الشكل (34) نموذج لمكونات متعددة المواد 74
- الشكل (35) تصميم الأوريجامي باستخدام البوليمرات الدقيقة 76
- الشكل (36) نماذج أوريجامي صندوقاً مكوناً من ستة جوانب وهرماً خماسي الجوانب 77
- الشكل (37) عملية الطي التلقائي والمتسلسل لمكون حلزوني 78
- الشكل (38) عملية طي متسلسلة مُتحكم بها 80

- الشكل (39) تطبيق الطي المتعدد في جسم ثلاثي الأبعاد مُمثل بطائرة شراعية قابلة لإعادة التشكيل 80
- الشكل (40) مبدأ عمل تقنية الطباعة رباعية الأبعاد بمادة واحدة وبمواد متعددة 81
- الشكل (41) الروبوت الدقيق المعتمد على الهلام المائي 82
- الشكل (42) الميكروسويمر الهلامي 83
- الشكل (43) الروبوت الحلزوني المغناطيسي 84
- الشكل (44) المشغلات المتغيرة الشكل 85
- الشكل (45) الحاويات 87
- الشكل (46) الأجهزة الطبية 91
- الشكل (47) التقنيات المستخدمة في الطباعة رباعية الأبعاد، محفزاتها، موادها وتطبيقاتها 96
- الشكل (48) التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DA) باستخدام برنامج (SOLIDWORKS) .. 112
- الشكل (49) تحضير التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DA) باستخدام برنامج (CURA) 113
- الشكل (50) النموذج (3DA) باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد 113
- الشكل (51) التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (4DA1, 4DA2) باستخدام برنامج (SOLIDWORKS) 114
- الشكل (52) تحضير التصميم الافتراضي (4DA1) للطباعة 115
- الشكل (53) النموذج (4DA1) قبل التحريض 116
- الشكل (54) النموذج (4DA1) بعد التحريض والتشكيل 116
- الشكل (55) النموذج (4DA1) قبل التحريض 117
- الشكل (56) النموذج (4DA2) بعد التحريض والتشكيل 117

- الشكل (57) التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DB) باستخدام برنامج (SOLIDWORKS) ... 118
- الشكل (58) تحضير التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DB) باستخدام برنامج (CURA) 119
- الشكل (59) النموذج (3DB) باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد 120
- الشكل (60) التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (4DB1, 4DB2) باستخدام برنامج (SOLIDWORKS) 120
- الشكل (61) تحضير التصميم الافتراضي (4DB1) للطباعة 121
- الشكل (62) النموذج (4DB1) قبل التحريض 122
- الشكل (63) النموذج (4DB1) بعد التحريض والتشكيل 122
- الشكل (64) النموذج (4DB2) قبل التحريض 123
- الشكل (65) النموذج (4DB2) بعد التحريض والتشكيل 123
- الشكل (66) الرسم البياني المعبر عن نتائج استهلاك المواد 124
- الشكل (67) الرسم البياني المعبر عن نتائج زمن التصنيع 125
- الشكل (68) نموذج غير ناجح بسبب تشوه المفصل 127
- الشكل (68) نموذج غير ناجح بسبب زوايا الإطباق 127

الفصل الأول: تمهيد للبحث

1- المقدمة:

يشهد العالم تطورا تقنيا متسارعا على كافة الأصعدة، مما يؤثر بشكل مباشر على تطور تقنيات التصنيع، وهذا يدفعنا لمواكبة التطورات العالمية في هذا المجال لكي نكون قادرين على مواكبة واستثمار كل ما ينتج عن هذا التطور من تقنيات حديثة تساعدنا في تطوير إمكانياتنا الإنتاجية. من أهم التطبيقات الصناعية التي أحدثتها الثورة التقنية في المجال الصناعي هي تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D Printing).

تقوم الطابعات ثلاثية الأبعاد ببناء أي شكل أو قطعة هندسية عن طريق مبدأ التشكيل بالإضافة، حيث تقوم ببناء الجسم طبقة تلو الأخرى بما يتناسب مع التصميم الهندسي المطلوب وذلك بمساعدة الحاسب. لقد لاقت هذه التقنية انتشارا كبيرا على مستوى العالم وفي تطبيقات عدة مثل الطب، المجوهرات صناعة السيارات والطائرات وغيرها من الصناعات.

لم يتوقف الأمر على الطباعة ثلاثية الأبعاد، بل أن هناك استمرار في تطوير هذه التقنية مما نتج عنه تقنيات أخرى مثل تقنية الطباعة رباعية الأبعاد (4D Printing)، والتي سنتعرف عليها بشكل موسع من خلال هذا البحث.

2- مشكلة البحث:

1-2- من خلال الاطلاع على الدراسات السابقة، تبين أنه لم يتم التطرق لتقنية الطباعة رباعية الأبعاد في محيط البحث، بالرغم من انتشار التقنية عالميا ووجود دراسات خارج محيط البحث تبين أنها قادرة على إضافة بعض الميزات المثيرة للاهتمام في عمليات التصنيع.

2-2- من خلال عمل الباحث في مجال الطباعة ثلاثية الأبعاد، تبين أن هناك مشكلة فيما يخص الإنتاجية واستهلاك المواد. حيث أن هناك بعض القطع قد تستغرق أكثر من 24 ساعة متواصلة من الطباعة. كذلك الأمر فإن بعض المنتجات وخاصة المفرغة من الداخل تستهلك موادا أولية بكميات كبيرة نسبيا، ويضطر المستخدم إلى إزالة هذه المواد الموجودة داخل القطعة بعد انتهاء عملية الطباعة، للحصول على القطعة المفرغة.

3- تساؤلات البحث:

إن مشكلة البحث قد أثارت بعض التساؤلات لدى الباحث وبعد البحث والدراسة الأولية، تلخصت هذه التساؤلات فيما يلي:

- 3-1- ما هي تقنية الطباعة رباعية الأبعاد؟
- 3-2- بماذا تتميز تقنية الطباعة رباعية الأبعاد عن الطباعة ثلاثية الأبعاد؟
- 3-3- هل نستطيع باستخدام الطباعة رباعية الأبعاد أن نحصل على منتجات مماثلة للتي نحصل عليها باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد، باستهلاك أقل للمواد الأولية؟
- 3-4- هل نستطيع باستخدام الطباعة رباعية الأبعاد أن نحصل على منتجات مماثلة للتي نحصل عليها باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد، خلال زمن تصنيع أقل؟
- 3-5- هل يمكن من خلال الطباعة رباعية الأبعاد الحصول على نماذج معقدة لم نكن لنتمكن من الحصول عليها باستخدام تقنيات التصنيع الأخرى.
- 3-6- ما هي التطبيقات التي يمكن لنا أن نستخدم فيها الطباعة رباعية الأبعاد بشكل مجد؟
- 3-7- هل نستطيع استبدال الطباعة ثلاثية الأبعاد برباعية الأبعاد في جميع المنتجات، أم أنه يجب تحديد التقنية الواجب استخدامها تبعاً لشكل النموذج المطلوب؟

4- الهدف من البحث:

- 4-1- التعريف بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد.
- 4-2- التعريف بالمواد الذكية (Smart Materials) وأنواعها.
- 4-3- استغلال ميزات الطباعة رباعية الأبعاد في التطبيقات المناسبة.

5- أهمية البحث:

- 5-1- فتح أفق الباحثين في محيط البحث لمواكبة التطور التقني الحديث.
- 5-2- الاستفادة من تقنية حديثة في تحسين استثمار الوقت والمواد الأولية في الصناعات المحلية.

6- منهجية البحث:

لتحقيق أهداف هذه الدراسة والإجابة على أسئلتها البحثية المتعلقة بالمقارنة بين الطباعة ثلاثية الأبعاد والطباعة رباعية الأبعاد من حيث استهلاك المواد وزمن التصنيع، تم الاعتماد على منهج بحثي يجمع بين المنهج الوصفي التحليلي والمنهج التجريبي المبسط.

- تم استخدام المنهج الوصفي في الفصلين الثاني والثالث لاستعراض وشرح المبادئ الأساسية والتقنيات والمواد المستخدمة في كل من الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد، وذلك بالاعتماد على مراجعة للأدبيات العلمية والمصادر الموثوقة.
- أما المنهج التحليلي، فقد تم توظيفه بشكل أساسي في الفصل الرابع لإجراء مقارنة نظرية بين التقنيتين بناءً على معايير استهلاك المواد وزمن التصنيع المستخلصة من الأدبيات، وفي الفصل السادس لمناقشة النتائج التجريبية وربطها بالإطار النظري.
- ويشكل المنهج التجريبي جزءاً هاماً من هذه الدراسة، حيث تم تطبيقه في الفصل الخامس من خلال تصميم وتنفيذ تجارب عملية تهدف إلى المقارنة الكمية المباشرة بين تقنيات مختارة للطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد. وشمل ذلك تصنيع عينات هندسية محددة باستخدام كلا النوعين من التقنيات.
- تم جمع البيانات اللازمة من خلال مراجعة الأدبيات، البحث في المصادر العلمية للحصول على المعلومات النظرية حول التقنيات ومعايير المقارنة.
- القياسات التجريبية: تم التركيز حصراً على تسجيل البيانات الكمية التالية:
استهلاك المواد: قياس وزن المواد المستهلكة (بما في ذلك مواد الدعم إن وجدت) باستخدام ميزان. زمن التصنيع: تسجيل زمن الطباعة الفعلي لكل عينة باستخدام ساعة توقيت.
- تم تحليل البيانات التي تم جمعها باستخدام:
- التحليل الوصفي: عرض ومقارنة البيانات الكمية المسجلة (الوزن والزمن) لكل تقنية باستخدام الجداول والرسوم البيانية البسيطة. هذا المنهج يركز على المقارنة المباشرة بين التقنيتين بناءً على القياسات العملية لاستهلاك المواد وزمن التصنيع، مدعوماً بالخلفية النظرية المستمدة من الأدبيات.

الفصل الثاني: تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد 3D Printing

1- تاريخ التقنية:

يعود تاريخ هذه التقنية إلى عام 1984، مع تطور الطباعة الحجرية المجسمة (stereolithography) هذا المصطلح الذي صاغه تشارلز هال في عام 1984 عندما قام بتقديم طلب للحصول على براءة اختراع للطباعة الحجرية المجسمة، حيث أسس تشارلز بعدها شركة (3D Systems)، التي كانت أول شركة طباعة ثلاثية الأبعاد في العالم.

في عام 1988، اكتشف سكوت كرومب نمذجة الترسيب المنصهر (Fused Deposition Modeling) (FDM).

في عام 1991 هيليسيس تقوم بتسويق أول شركة لتصنيع الأجسام الرقائقية (Laminated Objects Manufacturing LOM).

بعد عام واحد فقط في 1992، تم تطوير عملية التلييد (Selective Laser Sintering SLS)، وتم تسويقها بواسطة شركة DTM وهي شركة ناشئة استحوذت عليها 3D Systems.

في عام 2005، في جامعة باث تبلور مشروع النسخ الأولي السريع، المشهور باختصار RepRap. وقد أطلقت مبادرة بموجب تراخيص مفتوحة المصدر للسماح للطابعات بتصنيع معظم مكوناتها الخاصة بنفسها. في عام 2010 تم الإعلان عن أول نموذج أولي لسيارة مطبوعة ثلاثية الأبعاد.

في غضون ذلك، ومن خلال اجتماع الجمعية الدولية لهندسة الأنسجة والطب التجديدي، تم الإعلان عن إطلاق الإصدار الأول من الأوعية الدموية المطبوعة بالكامل^[1].

ولا زالت هذه التقنية مستمرة بالتطور حتى يومنا هذا.

تسمى الطباعة ثلاثية الأبعاد بمسميات أخرى مثل (تقنية التصنيع بالإضافة وتقنية التصنيع متعدد الطبقات). حيث يتم في هذه التقنية إضافة المواد الأولية طبقة تلو الأخرى، تلتصق هذه الطبقات فوق بعضها لتشكل الجسم لمطلوب^[2].

[1] Ignazio, (2020) P1.

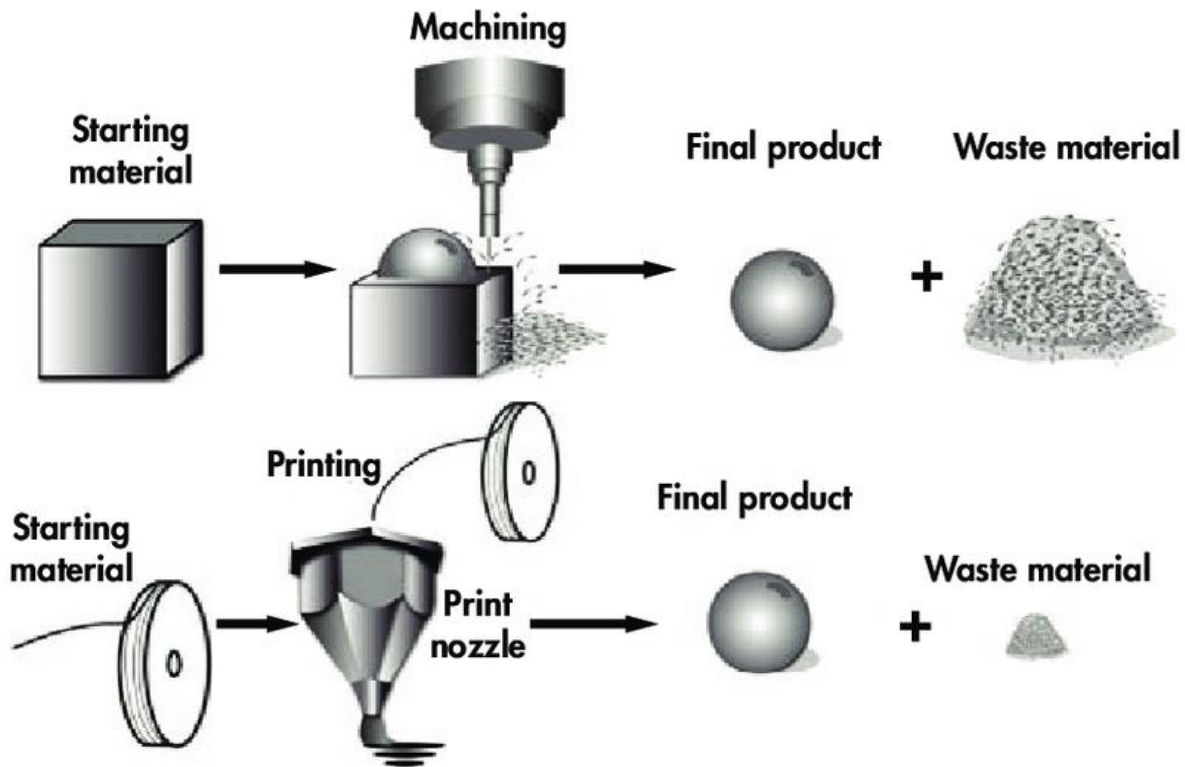
[2] Bozkurt, and others (2021), P1431.

2- الفرق بين تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد وطرق التصنيع الأخرى:

هناك عدة طرق للحصول على المنتج المطلوب سنستعرض منها اثنتين.

الطريقة الأولى: التصنيع بالتشغيل، يتم من خلال هذه الطريقة الحصول على المواد الأولية بحجم أكبر من القطعة المطلوبة وتتم إزالة أجزاء من المادة بحيث يتبقى من القطعة كمية من المادة بالشكل المطلوب.

الطريقة الثانية: التصنيع بالتشكيل، يتم من خلال هذه الطريقة إضافة كمية من المادة بشكل مناسب بحيث يتم عن طريق تراكم هذه المواد تشكيل القطعة المطلوبة، وهذه الطريقة التي تعتمد على الطابعات ثلاثية الأبعاد. الشكل (1) يبين هذا الفرق بشكل مبسط.



الشكل (1) الفرق بين عمليات التشغيل والتشكيل

المصدر: (U.S. Government Accountability Office 2015.)

3- مراحل عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد:

هناك عدة مراحل لعملية الطباعة، نقوم بها بشكل متسلسل حتى نصل للمنتج النهائي، وتتلخص فيما يلي:

- 3-1- نبدأ أولاً برسم نموذج افتراضي ثلاثي الأبعاد، باستخدام برامج تصميمية على الحاسب. وتختلف هذه البرامج باختلاف القطعة المطلوبة، حيث أنه هناك برامج تخصصية في معظم المجالات، يمكن الاستغناء عن هذه الخطوة باستخدام ماسح ضوئي ثلاثي الأبعاد.
 - 3-2- يقوم برنامج التصميم بتحويل الملف المنجز إلى صيغة معينة غالباً ما تكون (OBJ, STL).
 - 3-3- يتم إرسال الملف إلى البرنامج التشغيلي للطباعة، ليقوم بدوره بإصدار ملف آخر على شكل تعليمات (G Code).
 - 3-4- تستقبل الطابعة ملف التعليمات، وترجمه إلى أوامر محددة، ترسلها لأجزائها العاملة لتقوم بتنفيذ العمليات المطلوبة منها.
 - 3-5- بعد أن تتم عملية الطباعة، قد تحتاج بعض المنتجات للقليل من العمليات الإنهاءية، وبعد ذلك يتم الحصول على المنتج النهائي.
- يوضح الشكل (2) هذه المراحل بشكل بسيط.



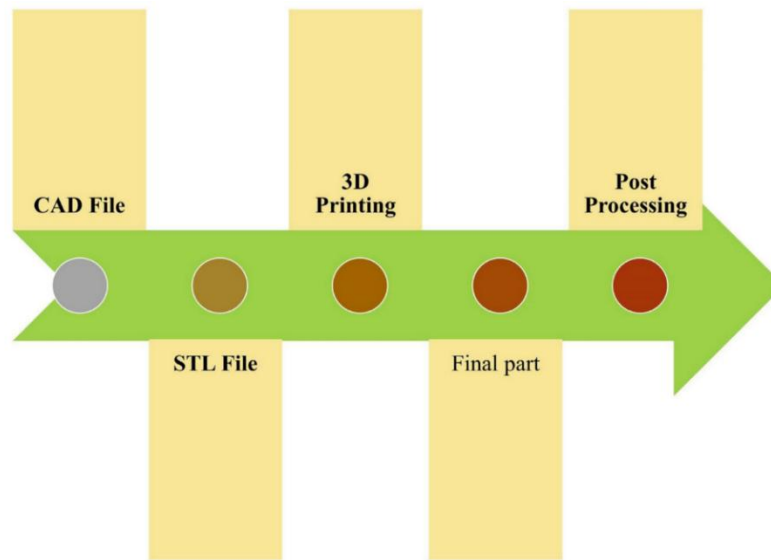
الشكل (2) مراحل عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد

المصدر (liveroomlk.medium.com)

في الطباعة ثلاثية الأبعاد، والتي هي في الأساس عملية تصنيع بالإضافة، نبدأ بالتصميم الأساسي للجزء الذي نريد نمذجته. يتم إنشاء التصميم المذكور على برنامج كمبيوتر يمكن توصيله بالطابعات ثلاثية الأبعاد. ثم يقوم هذا البرنامج بإنشاء نوع خاص من الملفات لإرساله إلى الطابعة^[1].

تقرأ الطابعة ثلاثية الأبعاد هذا الملف وتنشئ المنتج من خلال ربط طبقة واحدة فوق الأخرى. تستخدم كل عملية تقريباً في الطباعة ثلاثية الأبعاد طبقات لتشكيل جزء. تقرأ الطابعات ثلاثية الأبعاد الأجزاء كطبقة ثنائية الأبعاد واحدة في كل مرة بدلاً من جزء واحد كامل. يعتمد عمل الطابعات ثلاثية الأبعاد كما هو موضح في الشكل (3) على حقيقة أنها مصممة لقراءة نوع ملف لغة التبليط القياسية (STL)^[2].

إن الجوانب المستدامة للطباعة ثلاثية الأبعاد مثل هدر المواد الأقل، ومعالجة ما بعد التصنيع الأقل والتكلفة الأقل جداً حتى لتصنيع الأجزاء المعقدة تجعل الطباعة ثلاثية الأبعاد تقنية المستقبل. وتشمل الجوانب المستدامة الأخرى إمكانية الطباعة ثلاثية الأبعاد لإعادة استخدام البلاستيك وإعادة التدوير والحد من الانبعاثات. كما تتمتع هذه التكنولوجيا بالقدرة على إنتاج تصميمات ذات أشكال هندسية معقدة ومُحسَّنة، مما يساعد في تطوير أجزاء ذات وزن خفيف ونسب قوة إلى وزن أفضل. لذلك، يساعد استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد في إنتاج تصميمات مستدامة^[3].



الشكل (3) مخطط مراحل عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد

المصدر (Jandyal, and others(2022),P34)

[1] Jandyal, and others (2022), P33,34.

[2] the same of the last one.

[3] the same of the last one.

4- أنواع تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد:

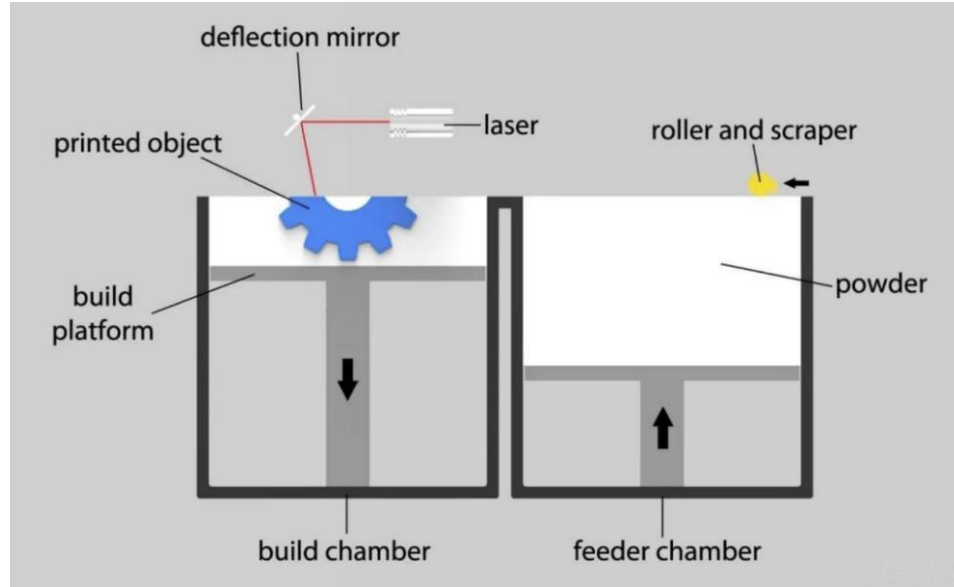
تم تطوير مجموعة متنوعة من تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد بوظائف مختلفة. حسب (ASTM Standard terminology for additive manufacturing technologies) هيئة المصطلحات القياسية لتقنيات التصنيع بالإضافة، استنادا للمواصفة (F2792)، فقد قامت هيئة ASTM بتصنيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد إلى سبع مجموعات، وليس هناك تقنية تعمل بشكل أفضل من نظيراتها، لأن كل منها لها تطبيقاتها المستهدفة^[1]. سيتم فيما يلي التعريف بأكثر هذه الأنواع انتشارا:

4-1- دمج طبقات المساحيق (PBF Powder Bed Fusion):

تعتمد هذه الطريقة على استخدام طبقة رقيقة من المسحوق وشعاع ليزر أو شعاع إلكتروني عالي الطاقة لصهر المسحوق، وتكون عملية الصهر انتقائية تعتمد على التصميم الهندسي للقطعة المطلوبة. حيث يتم تصليب الطبقة الأولى بطريقة انتقائية كما ذكرنا، وبعد ذلك يقوم جزء مخصص من الآلة يدعى الأسطوانة بوضع طبقة من المسحوق فوق الطبقة السابقة لتتم إعادة العملية مجددا، وتستمر العملية طبقة تلو الأخرى حتى نحصل على الشكل النهائي للقطعة المطلوبة. تندرج تحت هذه التقنية تقنيات أخرى تتشابه مع بعضها من حيث المبدأ، ومن هذه التقنيات تليد الليزر الانتقائي (SLS)، الصهر بشعاع إلكتروني (EBM)، الصهر بالليزر الانتقائي (SLM) والتليد المباشر للمعادن بالليزر (DMLS)^[2]، يوضح الشكل (4) إحدى هذه التقنيات SLS التليد الليزري الانتقائي.

[1] Shahrubudin, and others, (2019), P1287.

[2] Jandyal, and others (2022), P34,35.



الشكل (4) آلية عمل تقنية التلبيد الليزري الانتقائي

المصدر (pcbway.com)

4-2- البلمرة الضوئية (Vat Photopolymerization):

تعتمد هذه الطريقة على تصليب البوليميرات السائلة الحساسة للضوء، ويكون ذلك باستخدام الليزر أو الضوء أو الأشعة فوق البنفسجية. يندرج تحت هذه التقنية عدة تقنيات تتشابه مع بعضها من حيث المبدأ^[1]، فيما يلي أهم هذه التقنيات:

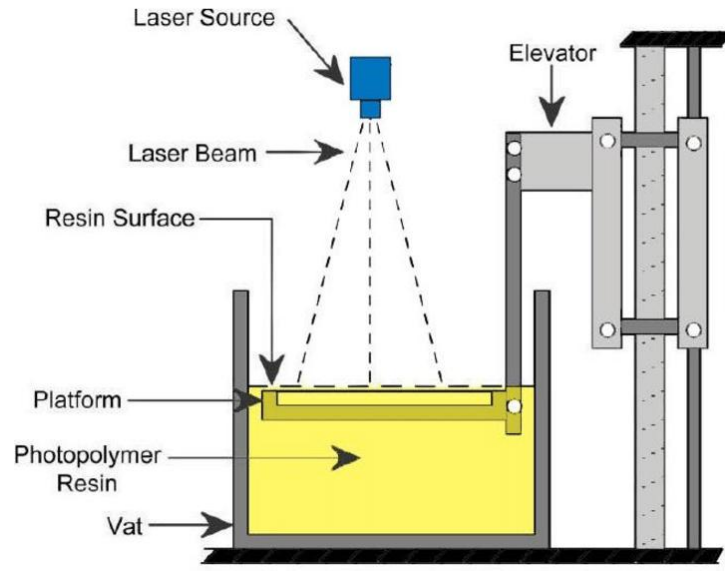
4-2-1 معالجة الضوء الرقمية (Digital Light Processing DLP):

تختلف تقنية DLP عن تقنية SLA فقط في طريقة المعالجة، فبدلاً من استخدام مرآة تعكس مصدر الليزر، يُستخدم جهاز إسقاط ضوئي رقمي. بالمقارنة مع تقنية SLA تتميز عملية DLP بسرعة أكبر، حيث تتعرض كل طبقة بالكامل لضوء المعالجة المُسقط من الشاشة الرقمية. ولأن تقنية DLP تستخدم جهاز إسقاط ضوئي رقمي، تظهر كل طبقة مكسرة، وتعتمد دقة الجزء المطبوع بشكل كبير على دقة جهاز الإسقاط^[2].

يوضح الشكل (5) جهاز DLP نموذجي ومكوناته.

[1] Pagac, and others (2021), P4.

[2] the same of the last one.



الشكل (5) آلية عمل تقنية البلمرة الضوئية DLP

المصدر (Rajan_Kumaresan researchgate.net)

4-2-2- الطباعة الحجرية المجسمة (Stereolithography SLA):

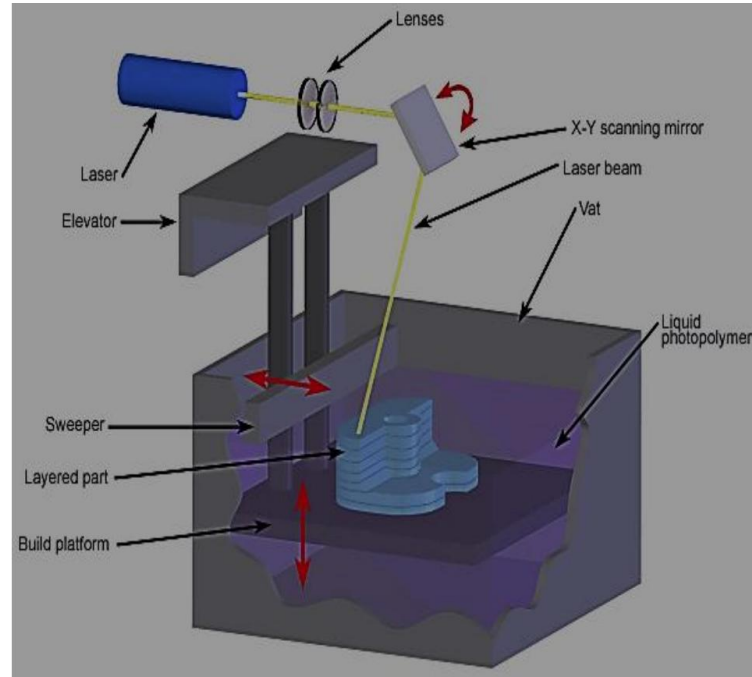
تعتمد هذه التقنية في تصليب البوليميرات على شعاع من الليزر، حيث تستخدم تقنية البلمرة الضوئية في تصليب البوليميرات السائلة طبقة تلو الأخرى حتى نحصل على القطعة المطلوبة. إنها من أكثر تقنيات النمذجة السريعة استخدامًا. ويمكنها إنتاج أجزاء بوليميرية دقيقة ومفصلة للغاية. وكانت أول عملية للنمذجة السريعة، وقد قدمتها شركة D Systems, Inc3. في عام 1988، استنادًا إلى عمل المخترع تشارلز هال^[1].

إن الطباعة المجسمة هي أكثر تقنيات النمذجة السريعة استخدامًا. تبني الطباعة المجسمة الأجزاء أو الأشياء البلاستيكية طبقة تلو الأخرى عن طريق تتبع شعاع الليزر على سطح حوض من البوليمر الضوئي السائل، والذي يوجد بداخله مرحلة متحركة لدعم الجزء الذي يتم بناؤه. يتصلب البوليمر الضوئي بسرعة في مكان تعريض شعاع الليزر على سطح السائل كما هو موضح بالشكل (6).

[1] Jandyal, and others (2022), P34.

يتم في كل مرحلة خفض المنصة بمسافة تساوي سمك الطبقة (عادة 0.030-0.050 ملم)، ويتم تشكيل طبقة لاحقة فوقاً لطبقات المكملة مسبقاً^[1].

تتسبب خاصية الالتصاق الذاتي للمادة في التصاق كل طبقة لاحقة بالطبقة السابقة وبالتالي تكوين جسم ثلاثي الأبعاد كامل من طبقات عديدة. يجب دعم الأشياء التي بها نتوءات أثناء عملية التصنيع بواسطة دعائم. يتم تصميمها إما يدوياً أو تلقائياً باستخدام برنامج كمبيوتر تم تطويره خصيصاً للنماذج الأولية السريعة. بمجرد اكتمالها، يتم رفع الجزء المطبوع فوق الحوض ونزعه. يتم مسح البوليمر الزائد أو شطفه بعيداً عن الأسطح. في كثير من الحالات، يتم إعطاء المعالجة النهائية بوضع الجسم في فرن الأشعة فوق البنفسجية. بعد المعالجة النهائية، يتم قطع الدعائم من الجسم وتلميع الأسطح أو صقلها أو تشطبيها بطريقة أخرى^[2]. يبين الشكل (7) بعض النماذج المطبوعة باستخدام هذه التقنية.



الشكل (6) آلية عمل تقنية البلمرة الضوئية بالليزر الانتقائي

المصدر (Ramya and others, (2016),P399)

^[1]Ramya and others, (2016), P398.

^[2] the same of the last one.



الشكل (7) نماذج مطبوعة بتقنية SLA

المصدر (Ramya and others, (2016),P399)

المواد الأولية	بوليميرات سائلة متصلبة ضوئيا تشابه البولي بروبيلين والمطاط
الحجم الأعظمي للطباعة	23.3*11.5*7.8 سم ³
سمائة الطبقة الأصغرية	0.0004 سم
التسامح	0.002 سم
نعومة السطح	ناعم
سرعة الطباعة	متوسطة نسبيا
التطبيقات	أنماط التشكيل السريع، الأجزاء الدقيقة للغاية، نماذج العرض، التطبيقات ذات الحرارة العالية

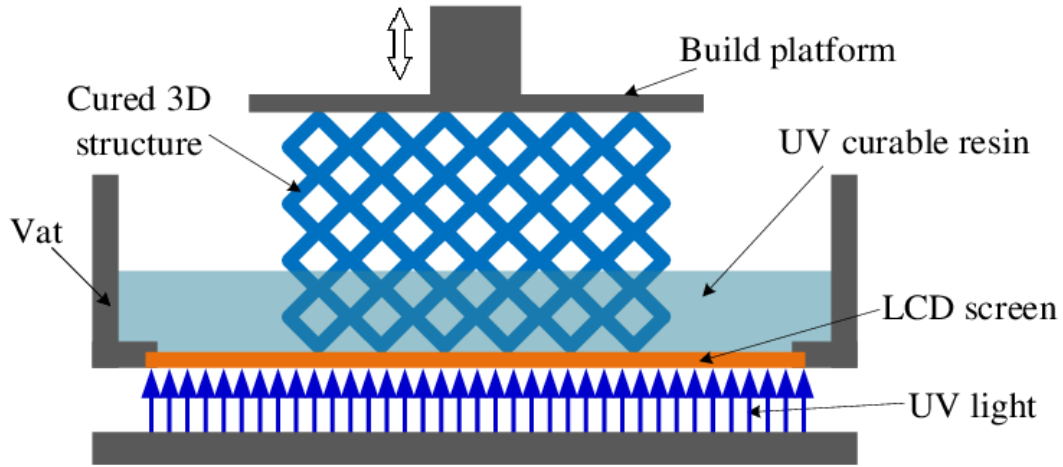
الجدول (1) مواصفات مطبوعات تقنية SLA

المصدر (A). Ramya and others, (2016). P399

4-2-3- الطباعة باستخدام شاشة الكريستال السائل (Liquid Crestal Display LCD)

على الرغم من مزايا تقنية DLP، إلا أنها لا تزال تواجه تحديات مثل قيود الحجم، وتكلفة أجهزة الإسقاط، والتشويه البصري لمساحات العرض الكبيرة. في المقابل، فإن التطوير المستمر لشاشات LCD عالية الدقة وواسعة المساحة بتكلفة أقل جعل من LCD حلاً مثاليًا. إن قدرتها على الجمع بين السرعة والدقة وقابلية التوسع تجعل LCD طريقة رئيسية لعمليات التصنيع المتقدمة التي تلبي الطلب المتزايد على المنتجات الوظيفية والنماذج الأولية السريعة في مختلف الصناعات مثل طب الأسنان، والهندسة الطبية الحيوية، والأحذية، والمجوهرات. عادةً ما تستخدم تقنية LCD نهجًا تصاعديًا، مما يتطلب قوة فصل لفصل الجزء المُعالَج عن الواجهة لطباعة الطبقات اللاحقة. وقد تم استكشاف استراتيجيات مختلفة للتخفيف من قوة الفصل هذه في تقنية DLP التصاعدية. يتضمن أحد الأساليب تعديل مواد الواجهة أو خصائصها لإنشاء منطقة ميتة - سمك ثابت من راتنج البوليمر الضوئي غير المعالج الذي يقلل من التدفق المباشر للمواد^[1].

يوضح الشكل (8) آلية عمل تقنية LCD، كما يوضح الشكل (9) نماذج مطبوعة باستخدام هذه التقنية.



الشكل (8) آلية عمل تقنية LCD

المصدر (researchgate.net/figure/Schematic)

[1] Paral, and others, (2025), P2.



الشكل (9) نماذج مطبوعة بتقنية LCD

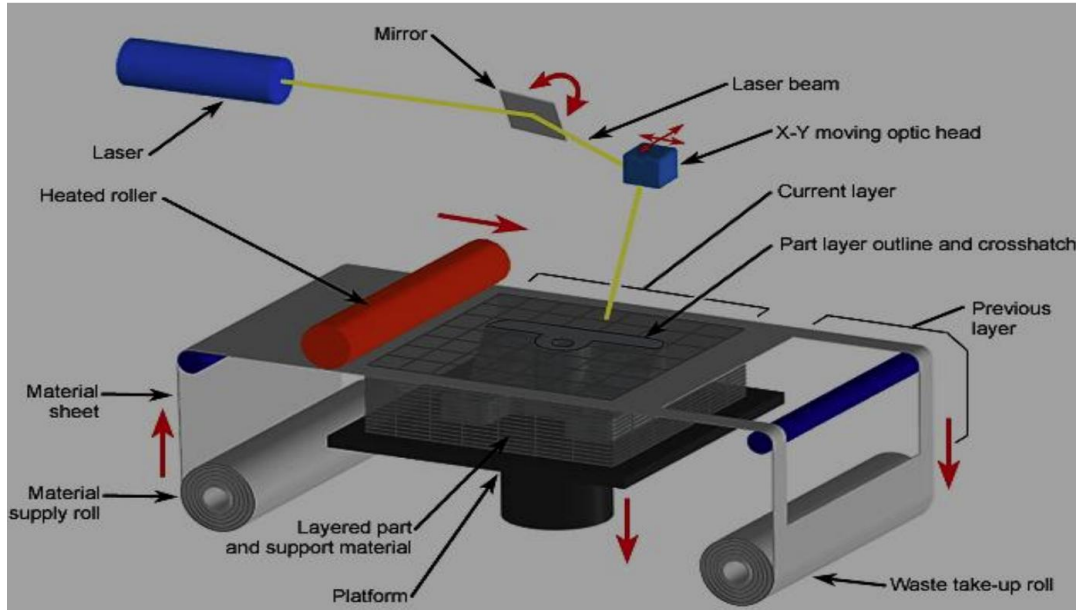
المصدر (/dreambot3d.com/me-215-lcd-3d-printer)

4-3- تصنيع النماذج الرقائقية (Laminated Object Manufacturing LOM):

تم ظهور أول نظام تصنيع النماذج الرقائقية (LOM) تجارياً في عام 1991. تم تطوير LOM بواسطة هيلسيس في تورانس، كاليفورنيا. المكونات الرئيسية للنظام هي آلية تغذية تدفع ورقة فوق منصة البناء، وبكرة ساخنة لتطبيق الضغط لربط الورقة بالطبقة الموجودة أسفلها، وليزر لقطع خطوط النموذج في كل طبقة من الورق. يتم إنتاج الأجزاء عن طريق تكديس وربط وقطع طبقات من مادة ورقية مطلية بمادة لاصقة فوق الطبقة السابقة. يقطع الليزر خطوط النموذج في كل طبقة. بعد اكتمال كل عملية قطع، تنخفض المنصة بعمق يساوي سمك الورقة (عادة 0.0007-0.007 بوصة)، ويتم دفع ورقة أخرى فوق الطبقات المترسبة مسبقاً. ثم ترتفع المنصة قليلاً وتطبق الأسطوانة الساخنة ضغطاً لربط الطبقة الجديدة. يقطع الليزر الخطوط وتتكرر العملية حتى اكتمال القطعة. بعد قطع الطبقة، تبقى المادة الإضافية في مكانها لدعم القطعة أثناء البناء^[1].

يبين الشكل (10) آلية عمل التقنية، كما يبين الشكل (10) بعض النماذج المطبوعة باستخدامها.

[1] Ramya and others, (2016), P401.



الشكل (10) آلية عمل تقنية LOM

المصدر (Ramya and others, (2016),P401)



الشكل (11) نماذج مطبوعة بتقنية LOM

المصدر (Ramya and others, (2016),P401)

المواد الأولية	ورق وبلاستيك صفائح
الحجم الأعظمي للطباعة	8*8.5*13 سم ³
سمكة الطبقة الأصغرية	0.0008 سم
التسامح	0.002 سم
نعومة السطح	خشن
سرعة الطباعة	مرتفعة
التطبيقات	نماذج أقل تفصيلاً، أنماط تشكيل سريعة

الجدول (2) مواصفات مطبوعات تقنية LOM

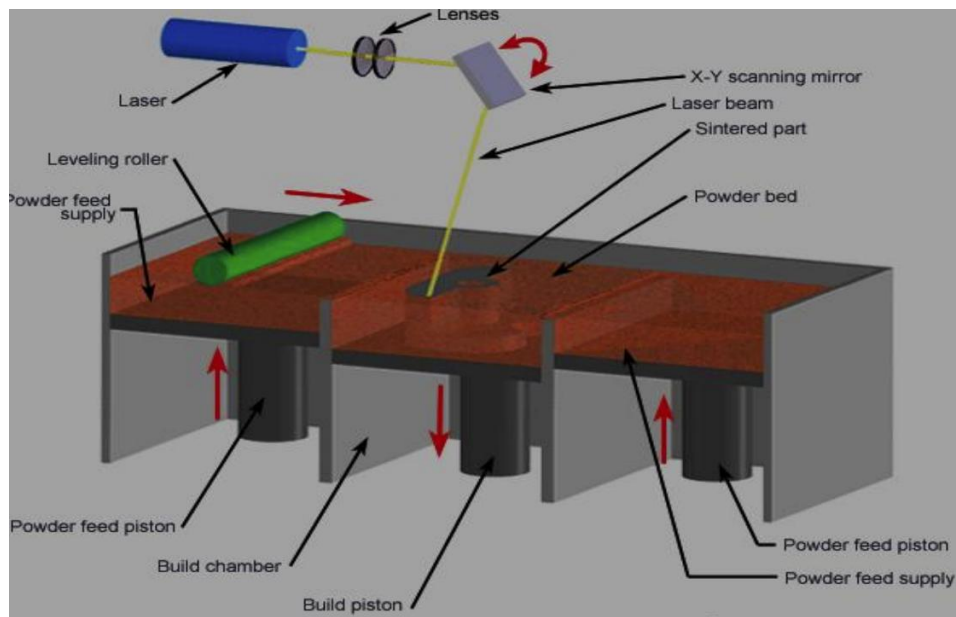
المصدر (Ramya and others, (2016),P401)

4-4- التلييد الانتقائي بالليزر (SLS Selective Laser Sintering)

تم تطويره في جامعة تكساس في أوستن، بواسطة كارل ديكراد وزملائه. تم تسجيل براءة اختراع التكنولوجيا في عام 1989 وتم بيعها في الأصل بواسطة شركة DTM Corporation. حيث تم الاستحواذ على DTM بواسطة D Systems3 في عام 2001. يتم نشر مسحوق البلاستيك الحراري بواسطة بكرة على سطح أسطوانة البناء. يتحرك المكبس في الأسطوانة إلى الأسفل سمك طبقة واحدة من الجسم لاستيعاب الطبقة الجديدة من المسحوق. يتحرك المكبس إلى الأعلى بشكل تدريجي لتوفير كمية محددة من المسحوق لكل طبقة. يتم تداول شعاع الليزر على سطح هذا المسحوق المضغوط بإحكام لصهر الحبيبات بشكل انتقائي وضمها معاً لتكوين طبقة من الجسم^[1].

[1] Ramya and others, (2016), P402.

يتم الحفاظ على حجرة التصنيع عند درجة حرارة أقل بقليل من نقطة انصهار المسحوق بحيث يرفع الليزر درجة الحرارة قليلاً للتسبب في التلييد ولا يتم ذوبان الحبيبات بالكامل، فقط أسطحها الخارجية مما يسرع العملية بشكل كبير. تتكرر العملية طبقة تلو الأخرى حتى يتم تشكيل الجسم بالكامل. بعد تشكيل الجسم بالكامل، يتم رفع المكبس. يتم ببساطة إزالة المسحوق الزائد بالفرشاة ويمكن إجراء التشطيب اليدوي النهائي. يوضح الشكل (12) آلية العمل لهذه التقنية كما يوضح الشكل (13) بعض النماذج المطبوعة باستخدامها، لا توجد حاجة إلى أي دعائم مع هذه الطريقة حيث يتم دعم الأجزاء البارزة والقطع السفلية بواسطة المسحوق الصلب. يستغرق الأمر وقت تبريد كبير قبل أن يمكن إزالة الجزء من الماكينة. وقد تتطلب الأجزاء الكبيرة ذات المقاطع الرقيقة ما يصل إلى يومين من التبريد^[1].



الشكل (12) آلية عمل تقنية SLS

المصدر (Ramya and others, (2016),P402)

[1]Ramya and others, (2016), P402.



الشكل (13) نماذج مطبوعة بتقنية SLS

المصدر (Ramya and others, (2016),P402)

المواد الأولية	مسحوق بوليمير، نايلون، بولي أميد، بوليستر
الحجم الأعظمي للطباعة	12*9*9 سم ³
سمائة الطبقة الأصغر	0.002 سم
التسامح	0.004 سم
نعومة السطح	متوسط
سرعة الطباعة	مرتفعة
التطبيقات	أنماط التشكيل السريع، الأجزاء الأقل تفصيلاً، الأجزاء ذات التركيبات المعقدة، التطبيقات ذات الحرارة العالية

الجدول (3) مواصفات مطبوعات تقنية SLS

المصدر (Ramya and others, (2016),P402)

4-5- التلييد بالليزر المباشر للمعادن (DMLS)

تم تطويره بشكل مشترك من قبل EOS GmbH و Rapid Product Innovations (RPI)، بدءًا من عام 1994، كأول طريقة تجارية للنمذجة السريعة لإنتاج أجزاء معدنية في عملية واحدة. باستخدام DMLS، يتم إذابة مسحوق المعدن (قطره 20 ميكرون)، الخالي من المادة الرابطة أو عامل الصهر، تمامًا عن طريق مسح شعاع ليزر عالي الطاقة لبناء النموذج بخصائص المادة الأصلية. يؤدي التخلص من المادة الرابطة للبوليمر إلى تجنب خطوات الحرق والتسرب، وينتج جزءًا فولاذيًا بكثافة 95% مقارنة بنحو 70% باستخدام التلييد بالليزر الانتقائي (SLS). تتمثل إحدى الفوائد الإضافية لعملية DMLS مقارنة بـ SLS في دقة التفاصيل الأعلى بسبب استخدام طبقات أرق، بفضل قطر مسحوق أصغر. تسمح هذه القدرة بتصنيع أشكال نماذج أكثر تعقيدًا^[1].

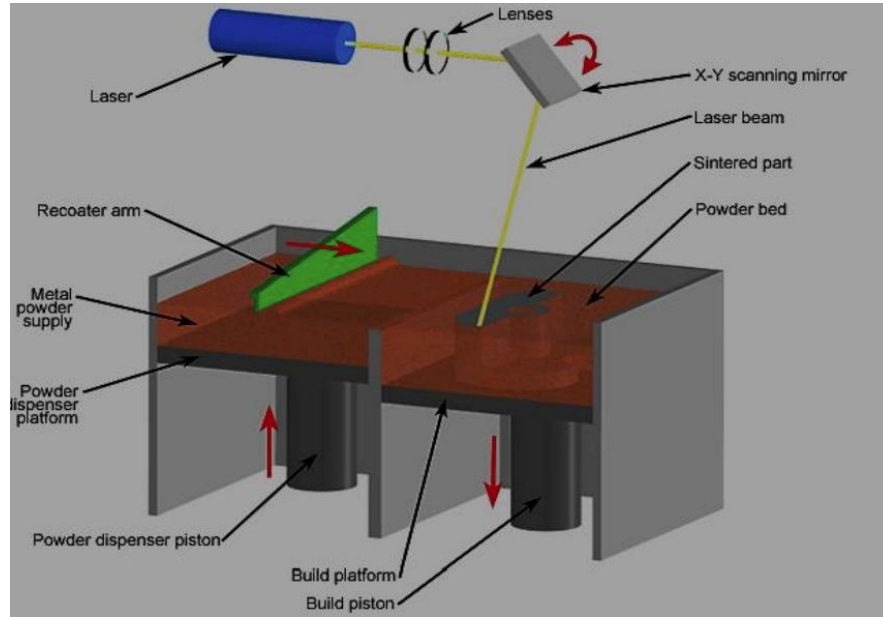
تتضمن خيارات المواد المعروضة حاليًا سبائك الفولاذ والفولاذ المقاوم للصدأ وفولاذ الأدوات والألمنيوم والبرونز والكوبالت والكروم والتيتانيوم. بالإضافة إلى النماذج الأولية الوظيفية، غالبًا ما يتم استخدام DMLS لإنتاج أدوات سريعة وغرسات طبية وأجزاء طيران لتطبيقات الحرارة العالية. يمكن إجراء عملية DMLS بطريقتين مختلفتين، ترسيب المسحوق وسرير المسحوق، والتي تختلف في طريقة تطبيق كل طبقة من المسحوق. في طريقة ترسيب المسحوق، يتم احتواء مسحوق المعدن في قمع يذيب المسحوق ويرسب طبقة رقيقة على منصة البناء^[2].

في طريقة سرير المسحوق كما هو موضح في الشكل (14)، يرفع مكبس موزع المسحوق إمداد المسحوق ثم يقوم ذراع إعادة الطلاء بتوزيع طبقة من المسحوق على السرير. ثم يقوم الليزر بتلييد طبقة مسحوق المعدن. يبين الشكل (15) نماذج مطبوعة باستخدام هذه الطريقة. في كلتا الطريقتين، بعد بناء طبقة، يخفض مكبس البناء منصة البناء

^[1]Ramya and others, (2016), P403.

^[2]the same of the last one.

ويتم تطبيق الطبقة التالية من المسحوق. توفر طريقة ترسيب المسحوق ميزة استخدام أكثر من مادة، كل منها في قادوس خاص بها. تقتصر طريقة سرير المسحوق على مادة واحدة فقط ولكنها توفر سرعات بناء أسرع^[1].



الشكل (14) آلية عمل تقنية DMLS

المصدر (Ramya and others, (2016), P403.)



الشكل (15) نماذج مطبوعة بتقنية DMLS

المصدر (Ramya and others, (2016), P403.)

^[1]Ramya and others, (2016), P403.

المواد الأولية	المعادن الحديدية مثل سبائك الصلب والفولاذ المقاوم للصدأ والفولاذ المستخدم في الأدوات؛ المعادن غير الحديدية مثل الألومنيوم والبرونز والكوبالت والكروم والتيتانيوم؛ السيراميك
الحجم الأعظمي للطباعة	4*4*3.5 سم ³
سمائة الطبقة الأصغرية	0.0004 سم
التسامح	0.004 سم
نعومة السطح	متوسطة
سرعة الطباعة	مرتفعة
التطبيقات	الأدوات السريعة، تطبيقات الحرارة العالية، الغرسات الطبية، أجزاء الطيران

الجدول (4) مواصفات مطبوعات تقنية DMLS

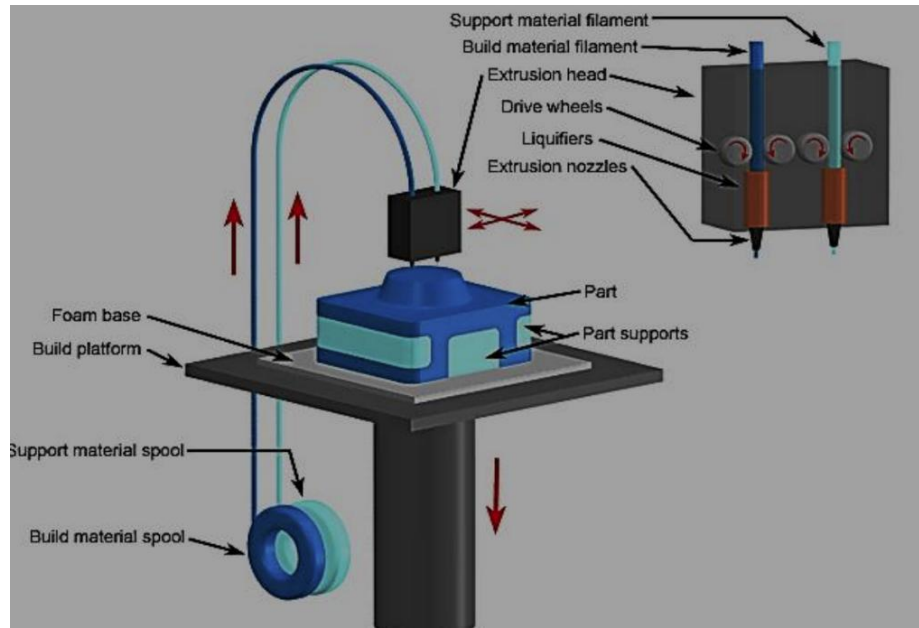
المصدر (Ramya and others, (2016), P404.A)

4-6- بثق المواد (FDM Fused Deposition Modelling):

تعد هذه الطريقة من أكثر طرق الطباعة ثلاثية الأبعاد انتشاراً، كما أنها سريعة التطور مقارنة بغيرها، وذلك يعود للتكاليف المنخفضة المترتبة عليها وعلى المواد الأولية المستخدمة، وكذلك انخفاض تكاليف الصيانة والاستثمار الأولي، إلا أنها تعتبر تقنية بطيئة نسبياً وتقتصر على المواد الأولية ذات درجات الانصهار المنخفضة، وكذلك فإن أبعاد الطباعة تعتبر محدودة فيها والسطوح التي تنتجها تعتبر خشنة نسبياً بالمقارنة مع باقي تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، يبين الشكل (16) آلية عمل تقنية بثق المواد. تستخدم هذه الطريقة خيوط بلاستيكية تتلدن بالحرارة، تتعرض لهذه الحرارة فقط في نهاية السلك عند رأس الطباعة، ثم يتم بثق طبقة تلو الأخرى حتى نحصل على القطعة المطلوبة^[1].

[1] Wickramasinghe, and others (2020), P4 .

يكون رأس الطباعة مثبتاً على ميكانيزم له تصميم خاص قادر على الحركة بالاتجاه العمودي نسبة لمنصة الطباعة، ويحتوي على الطارد الذي يقوم ببثق المواد من خلال فوهة الطباعة، وذلك بعد أن تمر هذه المواد الأولية بمنطقة التسخين (حيث يحدث التلدين)، كما أن منصة الطباعة تستطيع الحركة على المحورين الأفقي والعرضاني، لتصبح بالنتيجة الطابعة ككل تتمتع بثلاث درجات حرية تمكنها من بناء جسم ثلاثي الأبعاد، وذلك عن طريق بثق طبقة تلو الأخرى حتى يتم الحصول على المنتج النهائي^[1].



الشكل (16) آلية عمل تقنية بثق المواد

المصدر (A. Ramya and others, (2016),P400)

[1] Wickramasinghe, and others (2020), P5.

المواد الأولية	اللدائن الحرارية مثل ABS و PLA والبولي كربونات والبولي فينيل
الحجم الأعظمي للطباعة	50*50*50 سم ³
سماكة الطبقة الأصغر	0.001 سم
التسامح	0.001 سم
نعومة السطح	خشن نسبياً
سرعة الطباعة	منخفضة
التطبيقات	أنماط التشكيل السريع، الأجزاء الصغيرة، نماذج العرض، تطبيقات الطعام، تطبيقات الحرارة المتوسطة

الجدول (5) مواصفات مطبوعات تقنية FDM

المصدر (Ramya and others, (2016),P400

5- المواد الأولية في تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد:

نقوم هنا بتصنيف مواد الطباعة ثلاثية الأبعاد وتفاصيل المواد المستخدمة في طريقة FDM. لقد قطعت المواد المتاحة للطباعة ثلاثية الأبعاد شوطاً طويلاً منذ بدء العمل بهذه التكنولوجيا. يوجد الآن مجموعة كبيرة ومتنوعة من أنواع المواد المختلفة، والتي يتم توفيرها في حالات مختلفة (مسحوق، خيوط، حبيبات، راتنج، إلخ). كما يتم الآن تطوير مواد محددة لمنصات محددة تؤدي تطبيقات مخصصة، على سبيل المثال قطاع طب الأسنان، بخصائص مادية تناسب التطبيق بشكل أكثر دقة. ومع ذلك، هناك الكثير من المواد الخاصة من الطابعات ثلاثية الأبعاد المختلفة لتغطيتها، سنطلع على أكثر أنواع المواد شيوعاً بشكل عام^[1].

5-1- المعادن:

اكتسبت تقنية الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد الكثير من الاهتمام في صناعة الطيران والسيارات والتطبيقات الطبية والتصنيع بسبب المزايا الموجودة بهذه العملية. تتمتع مواد المعدن بخصائص فيزيائية ممتازة ويمكن استخدام هذه

[1]Shahrubudin, and others, (2019),P1289

المادة في تصنيع معقد من طباعة الأعضاء البشرية إلى أجزاء الطيران. ومن أمثلة هذه المواد سبائك الألومنيوم وسبائك الكوبالت وسبائك النيكل والفولاذ المقاوم للصدأ وسبائك التيتانيوم. وتعد السبائك القائمة على الكوبالت مناسبة للاستخدام في تطبيقات طب الأسنان المطبوعة ثلاثية الأبعاد. وذلك لأنها تتمتع بصلابة نوعية عالية ومرونة وقدرة عالية على التمدد والتقلص وظروف معالجة حرارية. علاوة على ذلك، تتمتع تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد بالقدرة على إنتاج أجزاء الطائرات باستخدام سبائك النيكل. يمكن استخدام النماذج المطبوعة ثلاثية الأبعاد باستخدام سبائك النيكل في بيئات خطيرة. يرجع ذلك إلى أنها تتمتع بمقاومة عالية للتآكل ويمكن أن تتحمل درجات الحرارة حتى 1200 درجة مئوية. وأخيراً، يمكن لتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد أيضاً طباعة النماذج باستخدام سبائك التيتانيوم. تتمتع سبائك التيتانيوم بخصائص حصريّة للغاية، مثل اللدونة والتآكل الجيد ومقاومة الأكسدة والكثافة المنخفضة. يتم استخدامها في الضغوط العالية ودرجات حرارة التشغيل العالية والضغط العالية، على سبيل المثال في مكونات الطيران والصناعة الطبية الحيوية^[1].

5-2- البوليميرات:

5-2-1- Acrylonitrile Butadiene Styrene Polymer (ABS)

يستخدم ABS على نطاق واسع في صناعة الألعاب والأدوات المنزلية، وذلك يعود لكون التأثيرات الضارة لهذه المادة قليلة مقارنة بالبوليميرات الأخرى، إلا أنه لا ينصح باستخدامه في المجال الطبي وذلك بسبب وجود الستايرين في تركيبه الكيميائي. قد تتأثر متانة المادة ومقاومتها بالكثير من العوامل أثناء الطباعة مثل سماكة الطبقة، قطر فوهة الطباعة، التعبئة وغيرها من بارامترات الطباعة والظروف المحيطة، بالنظر إلى أن هذه المادة تظهر مقاومة عالية للحرارة والرطوبة، فإنها تستخدم على نطاق واسع في عينات الاختبار^[2].

يبين الشكل (17) الصيغة الكيميائية لمادة ABS.

[1]Shahrubudin, and others, (2019), P1289

[2] Wickramasinghe, and others (2020), P6.

ABS هو بوليمر ثلاثي مصنوع من بلمرة الستيرين والأكريلونيتريل في وجود بولي بوتادين. يمكن أن تتراوح النسب من 15 إلى 35% أكريلونيتريل، و 5 إلى 30% بوتادين و 40 إلى 60% ستيرين. والنتيجة هي سلسلة طويلة من البولي بوتادين متقاطعة مع سلاسل أقصر من بولي (ستيرين-كو أكريلونيتريل). إن مجموعات النتريل من السلاسل المجاورة، كونها قطبية، تجذب بعضها البعض وتربط السلاسل معًا، مما يجعل ABS أقوى من البوليسترين النقي. يمنح الستيرين البلاستيك سطحًا لامعًا وغير منفذ. يوفر البولي بوتادين، وهو مادة مطاطية، صلابة حتى في درجات الحرارة المنخفضة. بالنسبة لغالبية التطبيقات، يمكن استخدام ABS بين -20 إلى 80 درجة مئوية (-4 إلى 176 درجة فهرنهايت) حيث تختلف خصائصه الميكانيكية مع درجة الحرارة^[1].

5-2-1-1- الخواص الكيميائية والفيزيائية:

قابلية الاشتعال	1.00
المقاومة الكيميائية	
الأحماض المركزة	جيد
الأحماض المخففة	ممتاز
الكحولات	سيئ
القلويات	ممتاز
الهيدروكربونات المهلجنة	سيئ
معامل الانكماش	0.37 - 0.41% (0.0037 - 0.0041 in/in)

الجدول (6) الخواص الكيميائية والفيزيائية لمادة ABS

المصدر: (Swetham, and others(2017),p359).

[1]Swetham, and others (2017), p358.

5-2-1-2- الخواص الميكانيكية:

أهم الخصائص الميكانيكية لـ ABS هي مقاومة الصدمات والصلابة. يمكن إجراء مجموعة متنوعة من التعديلات لتحسين مقاومة الصدمات والصلابة ومقاومة الحرارة. يمكن تضخيم مقاومة الصدمات عن طريق زيادة نسب البولي بوتادين فيما يتعلق بالسستيرين وأيضًا الأكريلونيتريل، على الرغم من أن هذا يسبب تغييرات في خصائص أخرى. لا تقل مقاومة الصدمات بسرعة عند درجات حرارة منخفضة، الاستقرار تحت الحمل ممتاز مع أحمال محدودة. وبالتالي، من خلال تغيير نسب مكوناته، يمكن تحضير ABS في درجات مختلفة، ويمكن أن يكون هناك نوعان رئيسيان هما ABS للبتق و ABS للقولبة بالحقن، ثم مقاومة الصدمات العالية والمتوسطة.

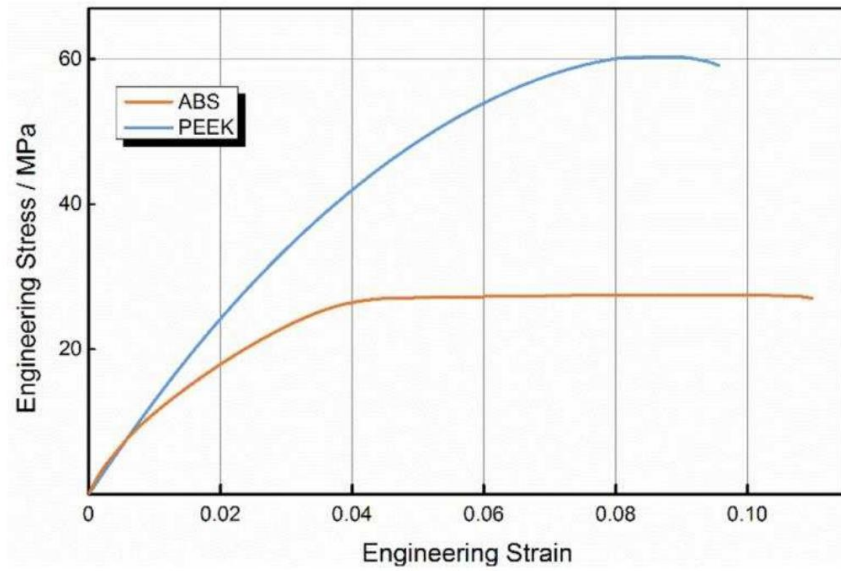
بشكل عام، سيكون لـ ABS خصائص مفيدة ضمن نطاق درجة حرارة من -20 إلى 80 درجة مئوية (-4 إلى 176 درجة فهرنهايت). لكن ستتأثر الخصائص النهائية إلى حد ما بالظروف التي تتم فيها معالجة المادة حتى المنتج النهائي. يبين الشكل (17) الرسوم البيانية بين الإجهاد الهندسي والانفعال لمادة ABS، كما يبين الشكل (18) الرسوم البيانية لقوة الشد والتأثير على ABS، على سبيل المثال، تعمل عملية القولبة عند درجة حرارة عالية على تحسين لمعان المنتج ومقاومته للحرارة، في حين يتم الحصول على أعلى مقاومة للصدمات والقوة عن طريق القولبة عند درجة حرارة منخفضة^[1].

اسم المادة	أكريلونيتريل بوتادين ستايرين ABS
الكثافة	1.04 g/cc
قساوة روكويل	103 - 112
إجهاد الشد	42.5 - 44.8 MPa
معامل الانحناء	2.25 - 2.28 GPa
إجهاد الانحناء	60.6 - 73.1/ MPa

الجدول (7) الخواص الميكانيكية لمادة ABS

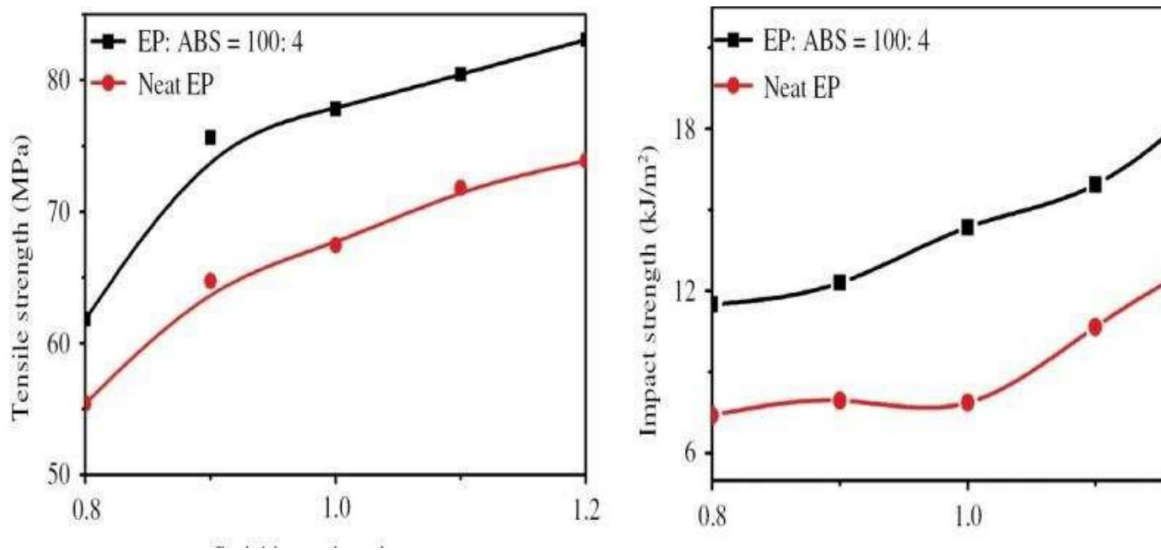
المصدر (Swetham, and others(2017),p358.)

[¹]Swetham, and others (2017), p359.



الشكل (17) الرسوم البيانية بين الإجهاد والانفعال لمادة ABS

المصدر (Swetham, and others(2017),p359.)

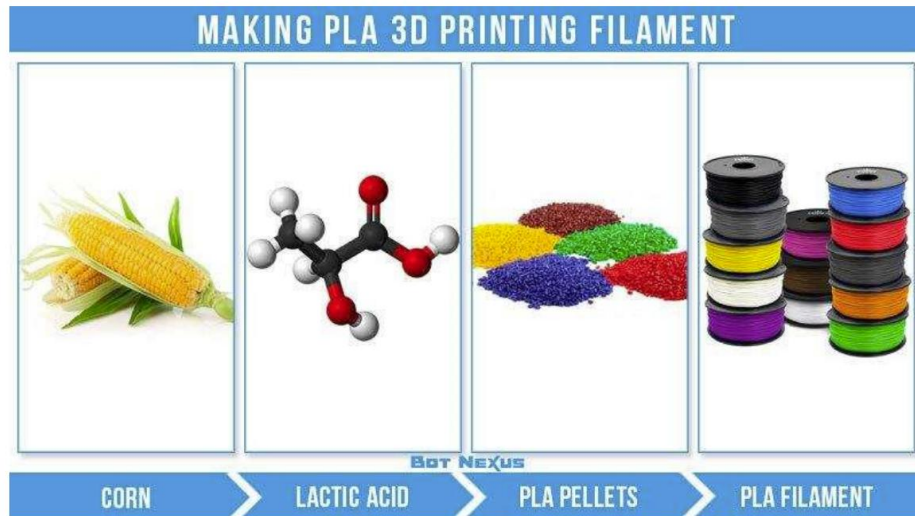


الشكل (18) الرسوم البيانية لمقاومة الصدم والشد والتأثير على ABS

المصدر (Swetham, and others(2017),p359.)

5-2-2: Polylactic Acid Polymer (PLA)

بولي (حمض اللاكتيك) هو بوليستر أليفاتي حراري قابل للتحلل الحيوي ونشط حيويًا مشتق من موارد متجددة مثل نشا الذرة، أو جذور التابيوكا، أو قصب السكر، الشكل (19) دورة تصنيع مادة PLA. في عام 2010، احتل بولي لاكتيك المرتبة الثانية من حيث الاستهلاك في العالم من بين جميع أنواع البلاستيك الحيوي الأخرى في العالم. لا يتوافق اسم "بولي لاكتيك حمض" مع تسمية الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية، لأن بولي لاكتيك ليس مادة صلبة (بولي إلكتروليت)، بل هو بوليستر^[1].



الشكل (19) دورة تصنيع مادة PLA

المصدر (Swetham, and others(2017),p355.)

عند المقارنة بين PLA و ABS، يمكن الاعتقاد أن ABS يظهر متانة ومقاومة أعلى لقوى الشد، لكن في الحقيقة فإن PLA مقاوم للشد أكثر من ABS. وذلك يعود لأن لدونة ومتانة الأجسام المصنوعة من PLA تحافظ على نفسها لفترة أطول من الزمن، لكن لنحصل على قوة الشد المثلى من الأجسام المصنوعة من PLA فإنه يجب الحفاظ على ظروف وبارامترات مثلى للجسم أثناء طباعته وهذا ما أثبتته الدراسات. حيث أن الخواص الميكانيكية لهذه المادة تتأثر بالكثير من العوامل مثل زاوية توضع المواد، ومن خلال تجارب عديدة تبين أن الخواص الميكانيكية وعلى وجه

[1] Swetham, and others(2017),p354.

التحديد مقاومة الشد للأجسام المطبوعة بمادة PLA تتأثر بتغير بارامترات الطباعة^[1]. يبين الشكل (20) بثق مادة PLA من رأس الطباعة.



الشكل (20) بثق مادة PLA من رأس الطباعة

المصدر (Swetham, and others(2017),p354.)

5-2-2-1- الخواص الكيميائية والفيزيائية:

اسم المادة	حمض البولي لكتيك PLA
الصيغة الكيميائية	$(C_3H_4O_2)_n$
درجة حرارة الانصهار	157 – 170 °C (315 – 338 °F)
درجة حرارة الحقن النموذجية	178 – 240 °C (353 – 464 °F)
درجة حرارة التشوه تحت الحمل	49 – 52 °C (121 – 126 °F) at 0.46 MPa (66 PSI)
إجهاد الشد	61 – 66 MPa (8840 – 9500 PSI)
إجهاد الانحناء	48 – 110 MPa (6,950 – 16,000 PSI)
الكثافة	1.24
معامل الانكماش	0.37 – 0.41% (0.0037 – 0.0041 in/in)

الجدول (8) الخواص الكيميائية والفيزيائية لمادة PLA

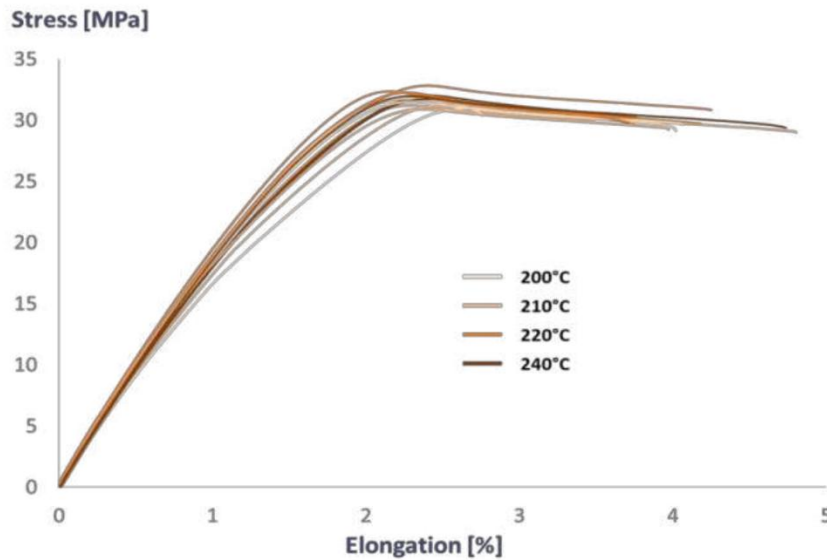
المصدر (Swetham, and others(2017),p355.)

[1] Wickramasinghe, and others(2020),P6 .

5-2-2-2- الخواص الميكانيكية:

وصفت الخواص الميكانيكية سلوك المادة تحت تأثير أوضاع التحميل المختلفة، مثل الشد والصدم والقص والضغط. يتمتع PLA بخواص ميكانيكية جيدة وخاصة معامل يونغ للشد وقوة الشد وقوة الانحناء مقارنة بالبوليمرات التقليدية، مثل البولي بروبيلين (pp) والبوليسترين (PS) والبولي إيثيلين (PE). ومع ذلك، كانت الاستطالة عند الكسر وقوة التأثير لـ PLA أقل من تلك الموجودة في PP وPE وPET وPA. على الرغم من أن قوة الشد ومعامل يونغ (صلابة جيدة) لـ PLA كانت قابلة للمقارنة مع PET، إلا أن الصلابة الضعيفة حدت من استخدامها في التطبيقات التي تتطلب تشوهاً بلاستيكيًا عند مستويات إجهاد أعلى، مما حفز الاهتمام الكبير بتقوية PLA^[1].

PLA هو شبه بلوري أو غير متبلور بدرجة حرارة انتقال زجاجية ودرجة حرارة انصهار تبلغ حوالي 55 درجة مئوية و180 درجة مئوية، على التوالي. يبين الشكل (22) منحنى الإجهاد والانفعال لـ PLA عند درجات حرارة مختلفة. يمكن أن تتأثر الخصائص الحرارية لـ PLA بمعلمات هيكلية مختلفة، مثل الوزن الجزيئي والتركيب، درجة حرارة الانتقال مرتبطة بالوزن الجزيئي للبوليمر، والعلاقة بين درجة حرارة الانتقال والوزن الجزيئي^[2].



الشكل (21) منحنى الإجهاد والانفعال لـ PLA عند درجات حرارة مختلفة

المصدر (T. Swetham, and others(2017),p357.)

[1] Wickramasinghe, and others(2020),P7 .

[2] the same of the last one .

5-2-3: Polyamide/Nylon Polymer

بمقارنة هذه المادة مع PLA و ABS، تظهر مادة NYLON مقاومة كيميائية ومقاومة شد أعلى، كما أن القطع المطبوعة باستخدام هذه المادة تحافظ على خواصها الميكانيكية العالية عند ارتفاع درجة الحرارة المحيطة بها، بل أن هذه الخواص تزداد مع ازدياد الحرارة وذلك لأن الروابط بين الطبقات تصبح أقوى بكثير.

بالمقابل إن القطع المطبوعة بواسطة مادة NYLON تظهر مقاومة وخواص ميكانيكية أقل في حال تعرضت للرطوبة وذلك بسبب أن مادة النايلون محبة للماء، وبالتالي تمتص الرطوبة بسهولة^[1].

5-2-4: Polyetheretherketone Polymer (PEEK)

بخلاف المواد المذكورة أعلاه فإن هذا البوليمير ينضم لمجموعة أخرى من البوليميرات التي تدعى البوليميرات عالية الأداء أو البوليميرات الهندسية.

عبارة عن بوليمير عضوي لدن شبه بلوري، يستخدم في الصناعات الهندسية لبناء الطائرات، الصواريخ، سيارات السباق وأجزاء الطائرات بدون طيار، التي تتطلب خصائص ممتازة.

كما أنه يستخدم في الصناعات الطبية كالتعويضات العظمية وزراعة العظام والمفاصل وغيرها^[2].

6- تطبيقات الطباعة ثلاثية الأبعاد:

6-1- في الفضاء الخارجي:

استخدم مهندسي ناسا تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، حيث تم بناء مركبة جوالة مكونة من 70 قطعة منفذة رقمياً، وذلك مباشرة بواسطة الطابعات ثلاثية الأبعاد حيث تم إرسال التصميم الافتراضية إلى حجرة الطباعة. وعلى وجه التحديد تم استخدام تقنية بثق المواد (FDM)، حيث تم استخدام مواد أولية قادرة على مقاومة الظروف المحيطة بالمركبة في الفضاء، تعتبر هذه المواد خفيفة الوزن نسبياً ولكنها متينة بما يكفي عند الاستخدام النهائي^[3].

[1] Wickramasinghe, and others (2020), P7.

[2] the same as the last one.

[3] Ramya and others, (2016), P407.

2-6- في مجال الطيران:

توفر تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد حرية تصميم لا مثيل لها في الإنتاج. في صناعة الطيران، تتمتع تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد بإمكانية صنع أجزاء خفيفة الوزن وهندسة محسنة ومعقدة، مما يمكن أن يقلل من متطلبات الطاقة والموارد. في الوقت نفسه، من خلال استخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، يمكن أن تؤدي إلى توفير الوقود لأنها يمكن أن تقلل من المواد المستخدمة لإنتاج أجزاء الطيران. علاوة على ذلك، تم تطبيق تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد على نطاق واسع لإنتاج قطع غيار لبعض مكونات الطيران مثل المحركات. تتلف أجزاء المحرك بسهولة، مما يتطلب استبدالاً منتظماً. لذلك، تعد تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد حلاً جيداً لشراء قطع الغيار المماثلة. في صناعة الطيران، تفضل السبائك القائمة على النيكل بسبب خصائص الشد ومقاومة الأكسدة والتآكل وتحمل الضرر^[1]. يوضح الشكل (22) طائرة مصنوعة باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد.



الشكل (22) طائرة مصنوعة باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد

المصدر ((<https://www.materialise.com>))

3-6- في الهندسة المعمارية:

إن تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد وتحديدًا تقنية البلمرة الضوئية DLP، تنتج تصاميمًا معمارية بشكل سلس مفصل ومذهل.

[1] Shahrubudin, and others, (2019), P1291.

كما أن تقنية بثق المواد FDM تعطي نماذج معمارية قوية ومتينة، يتم استخدام هذه التقنية في بناء المجسمات المعمارية المخصصة للعرض (maquette)، وكذلك تم ابتكار طابعات ثلاثية الأبعاد بأبعاد كبيرة قادرة على طباعة الأبنية والجدران^[1]. كما يوضح الشكل (23).



الشكل (23) طباعة الجدران باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد

(<https://cobod.com/the-us-largest-3d-printed-building-project>)

4-6 - صناعة السيارات:

إن أحد أكبر التحديات التي تواجهها صناعة السيارات هو تقليل زمن دورة الإنتاج، لكي يتم طرح المنتجات الجديدة في السوق في الوقت المناسب. لذلك يتم تصميم وطباعة النماذج الأولية للقطع بواسطة الطباعة ثلاثية الأبعاد FDM تحديداً، للتأكد من فاعلية وصحة هذه النماذج قبل طباعتها مما يوفر في زمن التصنيع ويقلل من الأخطاء^[2].

كما أن تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد غيرت صناعتنا بسرعة لتصميم وتطوير وتصنيع أشياء جديدة. في صناعة السيارات، أحدثت تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد ظواهر جلبت بريقاً جديداً، مما يسمح بهياكل أخف وزناً وأكثر تعقيداً

[1] Ramya and others, (2016), P407.

[2] Ramya and others, (2016), P408.

في وقت سريع. على سبيل المثال، قامت شركة Local Motor بطباعة أول سيارة كهربائية مطبوعة ثلاثية الأبعاد في عام 2014. لم تقتصر شركة Local Motors على السيارات فحسب، بل وسعت أيضًا نطاق تطبيق تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد على نطاق واسع من خلال تصنيع حافلة مطبوعة ثلاثية الأبعاد تسمى OLLI هي حافلة كهربائية بدون سائق وقابلة لإعادة التدوير وذكية للغاية مطبوعة ثلاثية الأبعاد. علاوة على ذلك، تعد شركة Ford رائدة في استخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد وتطبق أيضًا تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد لإنتاج النماذج الأولية وأجزاء المحركات. بالإضافة إلى ذلك، تستخدم BMW تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد لإنتاج أدوات يدوية لاختبار وتجميع السيارات. وفي الوقت نفسه، في عام 2017، تعاونت AUDI مع SLM Solution Group AG لإنتاج قطع الغيار والنماذج الأولية. وبالتالي، فإن استخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد في صناعة السيارات يمكن الشركة من تجربة بدائل مختلفة والتركيز على مراحل التحسين، مما يؤدي إلى تصميم مثالي وفعال للسيارات. وفي الوقت نفسه، يمكن لتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد تقليل هدر واستهلاك المواد. وعلاوة على ذلك، يمكن لتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد تقليل التكاليف والوقت، وبالتالي، فهي تسمح باختبار التصميمات الجديدة في وقت سريع جدًا^[1].

يوضح الشكل (24) هيكل لسيارة مصنع باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد.



الشكل (24) هيكل لسيارة مصنع باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد

(<https://formlabs.com>)

[1]N. Shahrubudin, and others, (2019),P1291.

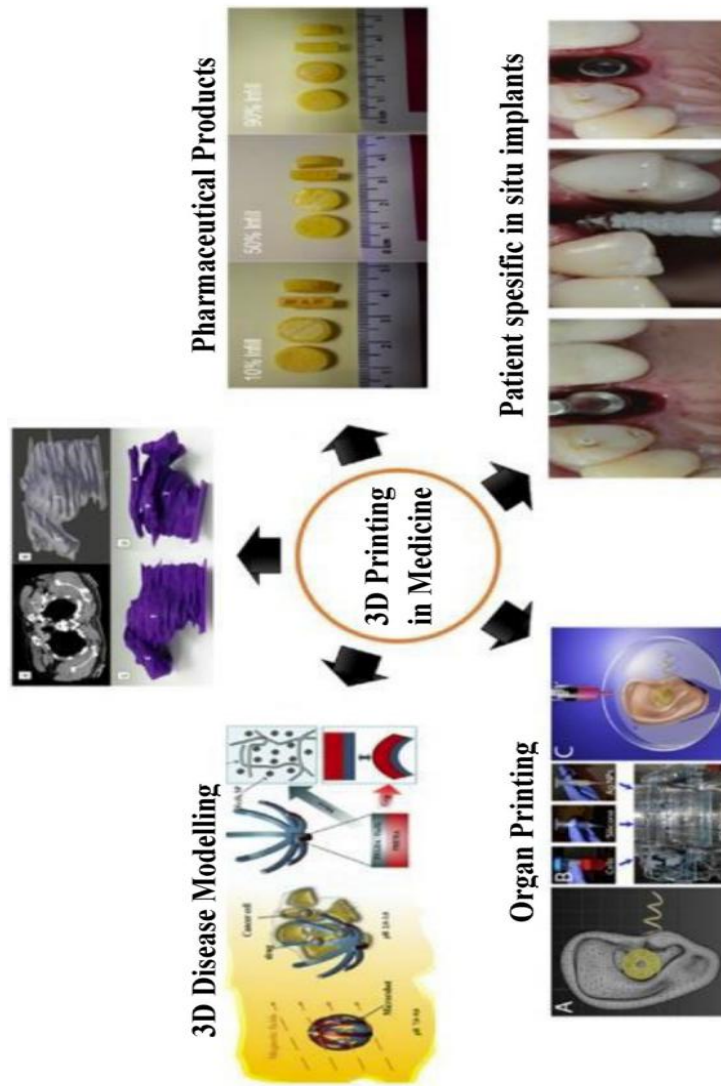
6-5- الرعاية الصحية والصناعة الطبية:

يمكن استخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد لطباعة الجلد ثلاثي الأبعاد، وأبحاث الأدوية والعقاقير، والعظام والغضاريف، والأنسجة البديلة، والأعضاء، والطباعة لأبحاث السرطان وأخيرًا نماذج للتصور والتعليم والتواصل^[1]. كما يبين الشكل (25) تطبيقات طبية لتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد هناك العديد من مزايا تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد للمنتجات الطبية الحيوية وهي:

- يمكن لتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد تكرار البنية الطبيعية للجلد بتكلفة أقل. يمكن استخدام الجلد المطبوع ثلاثي الأبعاد لاختبار الأدوية ومستحضرات التجميل والمنتجات الكيميائية. لذلك، ليس من الضروري استخدام جلد الحيوان لاختبار المنتجات. وبالتالي، سيساعد الباحث على الحصول على نتيجة دقيقة باستخدام تكرار الجلد.
- من خلال استخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد لطباعة الدواء، يمكن زيادة الكفاءة والتحكم الدقيق في حجم الجرعة والقطرات وإمكانية إعادة الإنتاج العالية والقدرة على إنتاج شكل جرعة بملفات تعريف إطلاق الدواء المعقدة.
- تستطيع تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد طباعة الغضاريف والعظام لاستبدال الفراغات العظمية في الغضاريف أو العظام الناتجة عن الصدمات أو الأمراض. هذا العلاج يختلف عن استخدام الطعوم الذاتية والطعوم. لأن هذا العلاج يركز على توليد العظام والحفاظ عليها أو تحسين وظيفتها باستخدامها في الجسم الحي.
- يمكن أيضًا استخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد لاستبدال أو استعادة أو الحفاظ على أو تحسين وظيفة الأنسجة.
- تتمتع الأنسجة البديلة التي تنتجها تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد بشبكة مسام مترابطة ومتوافقة حيويًا وكيميائيًا سطح مناسبة ولها خصائص ميكانيكية جيدة.
- يمكن أيضًا استخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد لطباعة فشل عضوي مماثل ناتج عن مشاكل حرجة مثل المرض والحوادث والعيوب الخلقية.
- تتمكن تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد من تكوين نموذج لأنسجة السرطان يمكن التحكم فيه بدرجة كبيرة وتُظهر إمكانات كبيرة لتسريع أبحاث السرطان. باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، يمكن للمرضى الحصول على بيانات أكثر موثوقية ودقة.

[1] N. Shahrubudin, and others, (2019), P1292.

- يمكن استخدام نماذج الطباعة ثلاثية الأبعاد في عملية التعلم لمساعدة جراحي الأعصاب الذين يمارسون التقنيات الجراحية.
- من خلال استخدام النموذج ثلاثي الأبعاد، يمكن تحسين الدقة، ويمكن أن يستغرق وقتًا قصيرًا للمدرب عند إجراء الإجراءات السريرية، ويوفر فرصًا لتدريب الجراحين عمليًا، حيث أن النموذج ثلاثي الأبعاد عبارة عن محاكاة لحالة مرضية حقيقية للمريض^[1].



الشكل (25) تطبيقات طبية لتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد

المصدر (Bozkurt, and others (2021), P1437)

^[1] Shahrubudin, and others, (2019), P1292.

6-6- القطع الإلكترونية:

يمكن باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد إنتاج نماذج بسماكة جدران رقيقة حوالي 0.6mm أو أقل، وهذه الأبعاد تعد مثالية للأجهزة الإلكترونية الصغيرة^[1].

6-7- المنتجات الرياضية:

غالبا ما تتطلب النماذج الأولية للمنتجات الرياضية مزيجا من المواد الصلبة والمرنة، وهذا ما تستطيع تقنية بثق المواد FDM تأمينه. حيث أنها تقنية الطباعة الوحيدة القادرة على إنتاج نماذج أولية تحتوي على مواد وألوان متعددة في تصميم واحد^[2].

6-8- الألعاب:

كما ذكرنا سابقا للحصول على ألوان ومواد متنوعة في جسم واحد لا بد لنا من استخدام تقنية بثق المواد FDM، كما تمكننا هذه التقنية من الحصول على ملمس ومظهر جيد^[3]. وقد بدأت بالفعل بعض شركات صناعة الألعاب باستخدام هذه التقنية في عمليات التصنيع مثل شركة Lego وغيرها، ويوضح الشكل (26) مجموعة من الألعاب مصنعة باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد.



الشكل (26) مجموعة من الألعاب مصنعة باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد

المصدر (<https://www.reddit.com/>)

[1] Ramya and others, (2016), P408.

[2] the same as the last one.

[3] the same as the last one.

6-9- صناعة الأسنان:

اعتادت مراكز التعويضات السنية على استخدام الطرق اليدوية في التشغيل والنحت للحصول على القطع المطلوبة، وقد كان ذلك يستهلك وقتاً وجهداً كبيراً وكنا نحصل على منتجات نسبة الخطأ فيها كبيرة. بعد ظهور الطباعة ثلاثية الأبعاد تحولت بعض المراكز وأولها مركز APEX إلى استثمارها في عملهم فكانت النتيجة توفير كبير في الوقت والجهد كما أنه تم الحصول على المنتجات بعامل خطأ أقل وذلك بسبب أن النماذج يتم طباعتها مباشرة من التصميم الرقمي المأخوذ من المريض مباشرة^[1].

6-10- صناعة الطعام:

تفتح تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد الأبواب ليس فقط لصناعة الطيران، بل وأيضاً لصناعة الأغذية. في الوقت الحاضر، هناك طلب متزايد على تطوير أغذية مخصصة للاحتياجات الغذائية المتخصصة، مثل الرياضيين، والأطفال، والنساء الحوامل، والمرضى وما إلى ذلك والتي تتطلب كمية مختلفة من العناصر الغذائية عن طريق تقليل كمية المكونات غير الضرورية وتعزيز وجود المكونات الصحية.

ومع ذلك، يجب إجراء تطوير الأطعمة المخصصة بطريقة مفصلة ومبتكرة للغاية، وهنا يظهر اعتماد الطباعة ثلاثية الأبعاد للأغذية. تصنيع طبقات الطعام المعروف أيضاً باسم الطباعة ثلاثية الأبعاد للأغذية المصنعة من خلال ترسيب طبقات متتالية بطبقة مشتقة مباشرة من بيانات التصميم بمساعدة الكمبيوتر.

باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، يمكن خلط مواد معينة ومعالجتها في هياكل وأشكال معقدة مختلفة. يمكن استخدام السكر والشوكولاتة والأطعمة المهروسة والأطعمة المسطحة مثل المعكرونة والبيتزا والمقرمشات لإنشاء أصناف غذائية جديدة بتصميمات وأشكال معقدة ومثيرة للاهتمام.

تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد هي تقنية عالية الكفاءة في استخدام الطاقة لإنتاج الأغذية مع الحفاظ على البيئة ومراقبة الجودة الجيدة والتكلفة المنخفضة. يمكن أن تكون طباعة الأطعمة ثلاثية الأبعاد صحية ومفيدة للإنسان لأنها تخلق عملية جديدة لتخصيص الطعام ويمكنها التكيف مع التفضيلات والاحتياجات الفردية. من خلال السماح بتعديل إعداد

[1] Ramya and others, (2016), P408.

الطعام ومكوناته تلقائيًا وفقًا لمعلومات المستهلك، سيكون من الممكن الحصول على أنظمة غذائية تفرض نفسها دون الحاجة إلى ممارسة الرياضة^[1].

كما أن هذه التقنية تستخدم في مجال الطب والفن والمجال التعليمي والكثير من التطبيقات في مختلف المجالات.

7- موجز الفصل:

إن تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد تقنية واعدة، توفر إنتاج قطع معقدة من الصعب الحصول عليها باستخدام أساليب التصنيع المتاحة، وإن وجود عدة أنواع لهذه التقنية يوفر مجالاً واسعاً من التطبيقات وذلك بسبب تعدد المواد المستخدمة في عمليات الإنتاج. بالحديث تحديداً عن تقنية بثق المواد FDM كونها الأهم من وجهة نظر البحث، تبين أنها تقنية متوفرة عالمياً بسبب انخفاض تكاليف استثمارها بما فيها الطابعات، المواد وقطع التبديل، كما أنها قادرة على توفير نماذج متعددة المواد الأولية في طبعة واحدة، والأهم أن المنتجات في هذه الطريقة تعتبر منتجات نهائية جاهزة للاستخدام باستثناء بعض العمليات الإنهاءية.

[1] Shahrubudin, and others, (2019),P1292.

الفصل الثالث: تقنية الطباعة رباعية الأبعاد 4D Printing

1- تاريخ التقنية:

في محادثة تيد لعام 2013، في معهد ماساتشوستس قدمت سكايلر تيببتس لأول مرة مصطلح الطباعة رباعية الأبعاد، على أنها طباعة نماذج ثلاثية الأبعاد قادرة على تغيير شكلها بمرور الزمن. وبعد فترة وجيزة تم نشر أول مقال علمي بحثي عن الطباعة رباعية الأبعاد وقد تم نشره عام 2013 باستخدام مفهوم المركبات النشطة المطبوعة (Printed Active Composites PAC)، حيث يمكن للصفحة المطبوعة أن تتحول إلى شكل معقد باستخدام تأثير ذاكرة الشكل (Shape Memory Effect (SME)، ومنذ ذلك الحين أثارت الطباعة رباعية الأبعاد اهتماما كبيرا في وسائل الإعلام العامة، ومجتمعات البحث عن المواد الذكية والطباعة ثلاثية الأبعاد^[1].

2- تعريف تقنية الطباعة رباعية الأبعاد:

تم تعريف الطباعة رباعية الأبعاد على أنها طباعة ثلاثية الأبعاد مضافا إليها بعد رابع وهو الزمن. إن ما يميز هذه التقنية أن المنتجات المطبوعة بواسطتها يمكنها أن تغير شكلها بعد انتهاء عملية الطباعة وذلك عند تعرضها لمؤثر خارجي مثل الضوء، الحرارة، الرطوبة أو تغير درجة الحموضة وذلك يتبع نوع المادة المستخدمة حيث أن كل مادة مصممة لتتأثر بنوع محدد من هذه المؤثرات^[2]. يبين الشكل (27) تحول هيكل خطي بسيط ثلاثي الأبعاد إلى بنية أكثر تعقيدا.



الشكل (27) تحول هيكل خطي بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد

المصدر (Ahmed, and others (2021), P2.)

^[1] Li, and others (2017), P2.

^[2] Ahmed, and others (2021), P2.

3- قوانين الطباعة رباعية الأبعاد:

قام الباحث مومني وآخرون عام (2021) بصياغة ثلاث قوانين تحكم سلوك التغير الشكلي لجميع البنى المطبوعة بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد. تتيح هذه القوانين فهماً أعمق للفيزياء الكامنة وراء قدرة هذه البنى على تغيير شكلها^[1]. وتنص هذه القوانين على ما يلي:

3-1- القانون الأول:

ينص القانون الأول على أن "جميع سلوكيات التغير الشكلي، مثل الالتفاف، والانحناء، واللف، والالتواء، وغيرها من التغيرات في بنى الطباعة رباعية الأبعاد متعددة المواد، تنجم عن التمدد النسبي بين المواد النشطة وغير النشطة"^[2].

3-2- القانون الثاني:

ينص القانون الثاني على أن "هناك أربعة عوامل فيزيائية تقف وراء قدرة البنى متعددة المواد في الطباعة رباعية الأبعاد على تغيير شكلها، وهي: الانتشار الكتلي، والتمدد الحراري، والتحول الجزيئي، والنمو العضوي". تؤدي هذه العوامل مجتمعة إلى التمدد النسبي بين المواد النشطة وغير النشطة، مما ينتج عنه تشكّل أو تغيير في الشكل عند التعرض لمحفّز خارجي^[3].

3-2-1- الانتشار الكتلي:

عند امتصاص المحفّزات (مثل الماء أو الأيونات)، يحدث تغير في كتلة البنية، ويؤدي هذا النقل للمادة إلى تمدد نسبي في المادة، مما يؤدي في النهاية إلى تشوّه في الشكل. كما يمكن أن يحدث تغير في الكتلة نتيجة لمحفّزات كهربائية أو حرارية أو كيميائية أو ضوئية^[4].

يمكن نمذجة هذا التغير كما يلي:

$$\frac{\Delta m}{m}(t) = q \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_t}\right) \right]$$

[1]Momeni, and others (2020), P1038.

[2]the same as the last one.

[3]Momeni, and others (2020), P1039.

[4]the same as the last one.

حيث أن: t هو الزمن، m هي الكتلة،

q, τ_t هما مقداران يعتمدان على سلوكيات الانتفاخ (استرخاء المادة المضيفة وانتشار المادة الضيف) وهما ثابتان

يظهر النموذج الأساسي الموضح في المعادلة (1) السلوك الصحيح لانتشار الكتلة للعمليات قصيرة وطويلة الأمد.

بينما فيما يخص الانفعال الحجمي فلدينا العلاقة^[1]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_2 - V_1}{V} = \frac{(L_X + \Delta L_X)(L_Y + \Delta L_Y)(L_Z + \Delta L_Z) - L_X L_Y L_Z}{L_X L_Y L_Z}$$

$$\approx \varepsilon_X + \varepsilon_Y + \varepsilon_Z$$

حيث V هو الحجم، L هو الطول، و ε هو الانفعال، و X و Y و Z هي الإحداثيات الديكارتية.

بالإضافة إلى ذلك، تُهمل الكميات التفاضلية من الرتبتين الثانية والثالثة بالنسبة للمواد المتجانسة، وبالتالي^[2]:

$$\varepsilon_X = \varepsilon_Y = \varepsilon_Z = \varepsilon \Rightarrow \varepsilon = \frac{1}{3} \frac{\Delta V}{V}$$

بالإضافة إلى ذلك، فإن العلاقة بين الكتلة والحجم خطية، لذلك^[3]:

$$\varepsilon_{mass\ diffusion}(t) = c1 \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \right]$$

حيث $C1$ و τ_1 ثوابت تعتمد على المعلومات السابقة^[4].

3-2-2 التمدد الحراري:

أما التمدد الحراري فينتج عن تغيرات في درجات الحرارة، حيث يزداد أو ينقص متوسط المسافة بين الذرات والجزيئات، مما يؤدي إلى تمدد نسبي. ويمكن أن يحدث التمدد الحراري أيضاً نتيجة لمحفزات مثل الكهرباء أو الضوء أو الأشعة فوق البنفسجية، كونها تؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة البنية^[5].

[1]Momeni, and others (2020), P1039.

[2]the same as the last one.

[3]the same as the last one.

[4]the same as the last one.

[5]the same as the last one.

يمكن نمذجة الانفعال الحراري باستخدام النموذج التالي:

$$\varepsilon_{thermal} = \alpha \Delta T$$

حيث α هو معامل التمدد الحراري (CTE) و T هي درجة الحرارة. ولأنه يجب علينا التنبؤ بسلوك الهياكل المطبوعة رباعية الأبعاد بمرور الوقت، فإننا نحول هذه المعادلة القائمة على درجة الحرارة إلى صيغة قائمة على الزمن. بتطبيق مُحفّز حراري بدرجة حرارة T_2 على هيكل بدرجة حرارة T_1 ، وبافتراض درجة حرارة موحدة فيه، تتغير درجة حرارة الهيكل بمرور الوقت كما يلي^[1]:

$$T_1(t) = T_2 + [T_1(t=0) - T_2] \exp\left(-\frac{t}{\tau_T}\right) + R_{1-2}(S_1 - Q_1) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_T}\right)\right]$$

حيث $T_1(t=0)$ هي درجة الحرارة الابتدائية للهيكل، و S_1 هو تحويل الطاقة في الهيكل، و Q_1 هي الحرارة المنقولة بين الهيكل والبيئة (باستثناء المحفز)، و R_{1-2} هي المقاومة الحرارية (الفعالة) بين المحفز الحراري بدرجة حرارة T_2 والهيكل بدرجة حرارة T_1 . بالإضافة إلى ذلك، τ_T هو ثابت زمني يعتمد على الكثافة ρ ، والسعة الحرارية (c_p)، والحجم (V)، والمقاومة الحرارية (والتلامس الحراري) R_{1-2} ، ويمكن نمذجته في تطبيق محدد. ويأخذ بشكل أساسي الشكل العام $\tau_T = (\rho c_p V)_1 R_{1-2}$ بالمقارنة بين المعادلات السابقة نصل إلى النموذج التالي:

$$\varepsilon_{thermal\ expansion}(t) = c_2 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)\right]$$

حيث c_2 و τ_2 ثابتان يعتمدان على المعاملات السابقة.

3-2-3- التحول الجزيئي:

وعندما تكون الكتلة ودرجة الحرارة ثابتتين، يمكن أن يحدث التمدد النسبي نتيجة لتحويلات جزيئية. إذ يمكن للمجالات الكهربائية أو المغناطيسية أو القوى الميكانيكية أو الضوء أن تسبب تحولات جزيئية. فعلى سبيل المثال، عند تطبيق مجال كهربائي أو مغناطيسي، ستصطف ثنائيات الأقطاب في المادة وفقاً لاتجاه المجال، مما يغيّر من بنية الجزيئات. وبالمثل، فإن تطبيق شد ميكانيكي على البوليمرات يؤدي إلى اصطفاف سلاسلها، كما أن تعريض مادة حساسة للضوء إلى الأشعة فوق البنفسجية يؤدي إلى تحولها من شكل إلى آخر^[2].

^[1]Momeni, and others (2020), P1040.

^[2]the same as the last one.

يمكن نمذجة قيمة هذا التحول من خلال العلاقات التالية، انطلاقاً من العلاقات الأساسية^[1]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta T}$$

عند $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta T}$ يكون تابعاً لـ $\Delta \varepsilon$ أي أن

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta T} = f(\Delta \varepsilon)$$

$\varepsilon = \Delta L/L$ عادة ما يكون الانفعال ε وبالتالي $\Delta \varepsilon$ مقداراً صغيراً (وهذا افتراض منطقي وإلا تصبح علاقة الإجهاد بالانفعال غير خطية)

إذا قرب التابع $\Delta \varepsilon = 0$ وباستخدام متسلسلة تايلور

$$f(\Delta \varepsilon) = f(0) + \left. \frac{df(\Delta \varepsilon)}{d(\Delta \varepsilon)} \right|_0 \Delta \varepsilon + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 f(\Delta \varepsilon)}{d(\Delta \varepsilon)^2} \right|_0 (\Delta \varepsilon)^2 + \dots$$

بالنتيجة فإن

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_M}\right) \right]$$

يُلاحظ هذا السلوك، على سبيل المثال، عندما:

1. يُحرك المجال الكهربائي المناطق المشحونة في المواد ذات الصلة، مما يؤدي إلى إجهاد.
2. يُحرك المجال المغناطيسي المناطق الممغنطة في المواد ذات الصلة، مما يؤدي إلى إجهاد.
3. يُسبب مصدر ضوء تحولات كيميائية ضوئية (تختلف عن آلية الحرارة الضوئية) في المواد المناسبة، مما يؤدي إلى إجهاد.
4. يُحرك الضغط الخارجي سلاسل البوليمر، مما يُنتج إجهاداً.

[1]Momeni, and others (2020), P1040.

في جميع هذه الآليات، يؤدي التحول الجزيئي مع ثبات الكتلة ودرجة الحرارة إلى سلوك تغيير الشكل. لذلك يمكننا القول:

$$\varepsilon_{molecular\ transformation} = c_3 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) \right]$$

حيث C_3 و τ_3 هما ثابتان يجب نمذجتهما في تطبيق محدد بناءً على نوع وخصائص الحافز بالإضافة إلى خصائص المادة^[1].

3-2-4- النمو العضوي:

يشير إلى الزيادة في الطول والوزن للكائنات الحية على مدار الزمن، مما يسبب تمددًا نسبيًا بين المواد النشطة وغير النشطة ويؤدي إلى تغير شكلي. ويمكن تحفيز النمو العضوي غالباً باستخدام محفزات كهربائية، بالإضافة إلى الحرارة والماء ودرجة الحموضة والقوة الميكانيكية. ويُستخدم هذا المفهوم لوصف سلوك تغير الشكل في الخلايا والأنسجة، والهياكل الداعمة، والدعامات، والأعضاء في تقنيات الطباعة الحيوية رباعية الأبعاد^[2].

يمكن نمذجة قيمة هذا النمو من خلال تحديد الانتقال عبر العلاقات التالية:

$$L(t) = L_{\infty} - (L_{\infty} - L_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right)$$

حيث أن $L(t)$ هو طول النظام العضوي، L_{∞} هو الطول النهائي، L_0 الطول الابتدائي، τ_0 هو ثابت زمني يعتمد على استجابة المادة والظروف المحيطة.

واستناداً على تعريف الانفعال يكون:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{L_t - L_0}{L_0} = \frac{(L_{\infty} - L_0) - (L_{\infty} - L_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right)}{L_0} \\ &= \frac{L_{\infty} - L_0}{L_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_4}\right) \right] \end{aligned}$$

[¹]Momeni, and others (2020), P1041.

[²]the same as the last one.

$$\Rightarrow \varepsilon_{organic\ growth}(t) = C_4 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_4}\right) \right]$$

حيث C_4 و τ_4 ثابتان يعتمدان على المعلمات السابقة.

في هذه الفئة، تُعدّ الإشارة الكهربائية (الآلية الكهروكيميائية) من أهمّ المحفزات التي تُحفّز الكائن الحي. بالإضافة إلى ذلك، يُمكن استخدام مُحفّزات مُختلفة، مثل الرقم الهيدروجيني (pH)، والضوء، والحرارة، والإنزيمات، لضبط مُعدّل النمو^[1].

النموذج الموحد للقانون الثاني:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{mass\ diffusion}(t) = C_1 \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_1}} \right) \\ \varepsilon_{thermal\ expansion/contraction}(t) = C_2 \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_2}} \right) \\ \varepsilon_{molecular\ transformation}(t) = C_3 \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_3}} \right) \\ \varepsilon_{organic\ growth}(t) = C_4 \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_4}} \right) \end{array} \right.$$

حيث أن $(j=1,2,3,4)$ C_j, τ_j كلها ثوابت تعتمد على عوامل مختلفة كما هو موضح سابقا.

3-3- القانون الثالث:

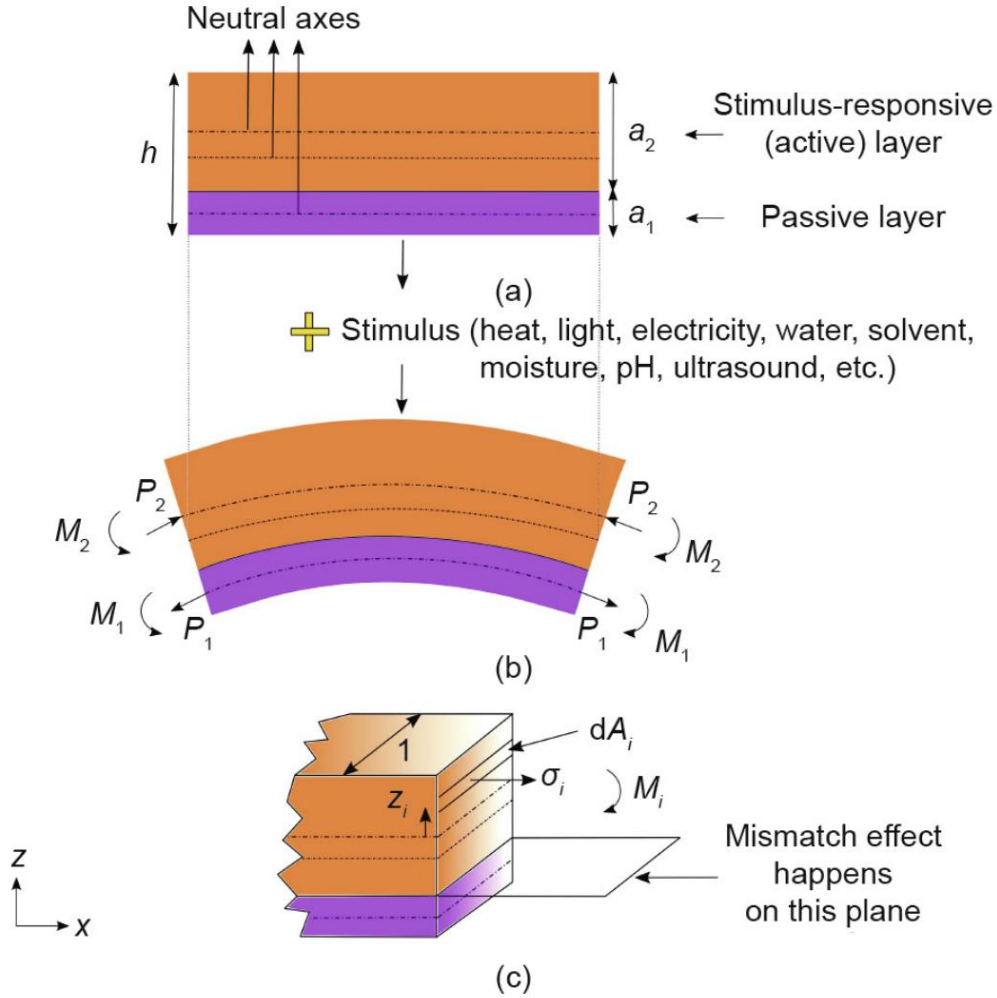
ينص القانون الثالث على أن "سلوك تغير الشكل المعتمد على الزمن في جميع البنى المطبوعة بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد متعددة المواد، تحكمه نوعان من الثوابت الزمنية." يمكن أن تكون هذه الثوابت الزمنية متساوية أو كبيرة أو منعقدة حسب نوع المحفز والمادة المستخدمة. وقد تم اشتقاق صيغة رياضية أُسية مزدوجة تمثل البعد الرابع، يمكن استخدامها مستقبلاً في نمذجة البنى رباعية الأبعاد ودمجها في البرمجيات والأجهزة^[2].

في الحالة الأساسية لهيكل مطبوع رباعي الأبعاد متعدد المواد، يتكون من طبقة نشطة وطبقة خاملة كما يوضح (الشكل 28)، حيث (a) الهيكل قبل تطبيق المحفز، (b) الهيكل بعد تطبيق المحفز، (c) منظر مقطعي لعنصر من الطبقة الثنائية بعد تطبيق المنبه. يشار إلى الطبقتين الخاملة والنشطة بالرقمين 1 و 2 على التوالي. P1: القوة في الطبقة الخاملة، P2: القوة في الطبقة النشطة، M1: العزم في الطبقة الخاملة، M2: العزم في الطبقة النشطة،

[1]Momeni, and others (2020), P1041.

[2]the same as the last one.

A_i : مساحة المقطع العرضي للطبقة النشطة أو الخاملة، Z_i : المسافة من المحور المحايد للطبقة النشطة أو الخاملة، r_i : الإجهاد في الطبقة النشطة أو الخاملة.



الشكل (28) هيكل مطبوع رباعي الأبعاد متعدد المواد

المصدر (Farhang, and others (2020),P1041)

يكون السلوك المعتمد على الزمن من حيث "الانحناء"، وهو مفهوم أساسي لسلوك تحويل الشكل ويخضع للعلاقة:

$$k(t) = \frac{1}{r}(t) = \frac{H_I \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_I}}\right) + H_{II} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{II}}}\right)}{\frac{h}{2} + \frac{2(E_1 I_1 + E_2 I_2)}{h} \left(\frac{1}{E_1 a_1} + \frac{1}{E_2 a_2}\right)}$$

$$k_I \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_I}}\right) + K_{II} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{II}}}\right)$$

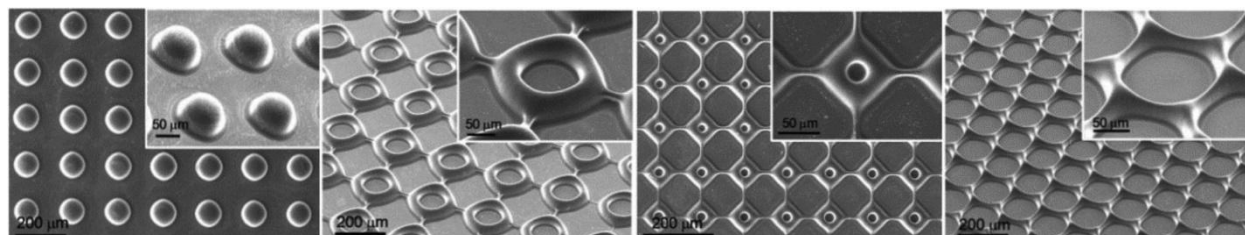
حيث $k(t)$ هو الانحناء المُستحث تحت تأثير المُحفز؛ r هو نصف قطر الانحناء؛ h و a_1 و a_2 هي السماكات المُحددة في الشكل (28)؛ E_1 و E_2 هما معامل يونغ؛ و I_1 و I_2 هما العزوم الثنائية للمساحة^[1].

4- المواد الذكية (SMART MATERIALS):

يمكن تعريف المواد الذكية على أنها تلك المواد التي توفر وسيلة لتحقيق استجابة ذكية نشطة في منتج كان من الممكن أن يكون غير قادر على القيام بها، مما قد يعطيه خصائص ووظائف أفضل^[2]. وفيما يلي سنتحدث عن أنواع هذه المواد الذكية:

4-1- المواد الذكية النانوية المحسنة (Enhanced smart nanocomposites):

أحد أهم المواد الذكية التي تم استخدامها على نطاق واسع وتسمى أيضا بالمواد الكهرضغطية، حيث أنها تستطيع أن تنتج شحنة كهربائية أو جهد كهربائي عند تطبيق جهد خارجي عليها، أو العكس. تقدم فئات مختلفة من المواد الكهرضغطية قدرات مختلفة، ومع ذلك لا تزال مهمة تصنيع المواد البوليميرية الكهرضغطية وتحويلها إلى هياكل ثلاثية الأبعاد، مهمة صعبة ومعقدة^[3].



الشكل (29) أمثلة عن نماذج تحوي عينات من المواد النانوية الكهرضغطية ثنائية البعد على شكل مصفوفات

المصدر (ACS Nano, vol. 8 (10), pp. 9799–9806. Copyright (2014) American Chemical Society.)

باستخدام البلمرة الضوئية للمركب النانوي الكهرضغطي تم الحصول على بعض العينات ثنائية وثلاثية البعد، كما هو مبين في الشكل (29).

تتضمن العينات مصفوفة نقطية ومصفوفات مربعة بأحجام مختلفة، مجموعة الشكل السداسي هي إحدى العينات ثلاثية البعد التي تم تصنيعها كانت عبارة عن هيكل أنبوبي دقيق، حيث تم تصليب العينة عن طريق تعريض مركب

[1]Momeni, and others (2020), P1041.

[2]Khoo, and others (2015), P105.

[3]the same as the last one.

النانو لضوء على شكل سداسي، عند بلمرة المحلول يتم إزالة المصفوفة ذات الشكل السداسي ولفها بشكل أنبوبي تلقائياً، حيث يمكن التحكم بقطر الأنبوب بحسب بارامترات الطباعة وأهمها معاملات التمدد الحراري أو الكثافات وغيرها^[1].

4-2- سبائك الذاكرة الشكلية (Shape memory alloys SMA):

تُعد سبائك الذاكرة الشكلية (SMA) نوعاً من المواد الذكية التي يمكنها تحويل الطاقة الحرارية مباشرةً إلى طاقة ميكانيكية، وهي خاصية تُعرف بتأثير الذاكرة الشكلية (SME). ينشأ تأثير الذاكرة الشكلية نتيجة لتحول طور بلوري بين مرحلتين مختلفتين في البنية البلورية للسبائك، وهما: الطور منخفض الحرارة (المارتنزيت) والطور مرتفع الحرارة (الأوستنيت). عند تشويه سبيكة SMA وهي في طور المارتنزيت، ثم تسخينها إلى درجة حرارة حرجة، يحدث تحول عكسي في الطور البلوري يعيد البنية إلى شكلها الأصلي، حيث تعود البنية من المارتنزيت إلى الأوستنيت. تمتاز سبائك SMA أيضاً بخاصية أخرى تُعرف بالمرونة الفائقة (Super elasticity)، والتي تظهر فيها السبيكة قدرة عالية على التحمل والتعافي من التشوه عند التحميل وإزالة الحمل. وعلى عكس تأثير الذاكرة الشكلية الذي يعتمد على تغير درجة الحرارة، فإن التحول الطوري في المرونة الفائقة ينتج عن التأثيرات الميكانيكية^[2].

من الأمثلة الشائعة على سبائك SMA التي تُظهر كلاً من تأثير الذاكرة الحرارية (SME) والذاكرة الميكانيكية (المرونة الفائقة) هي سبيكة النيكل-تيتانيوم (NiTi). تتحدد خصائص SME والمرونة الفائقة في NiTi بدرجات حرارة التحول الطوري، والتي تُعد حساسة للغاية لتغير نسبة النيكل إلى التيتانيوم؛ حيث إن انخفاضاً بسيطاً في نسبة النيكل يمكن أن يؤدي إلى ارتفاع كبير في درجات حرارة التحول. تُستخدم سبائك NiTi بشكل واسع في التطبيقات الهندسية نظراً لخصائصها الوظيفية الفائقة. وتشمل أمثلة هذه التطبيقات: الزراعات الطبية الحيوية، المواد المركبة الذكية، المشغلات، الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة (MEMS)، والأجهزة الكهربائية^[3].

[1]Khoo, and others (2015), P105.

[2]Khoo, and others (2015), P106.

[3]the same as the last one.

4-3- المواد الذكية ذات ذاكرة الشكل (Shape Memory Materials SME):

تُعد البوليمرات الذاكرة للشكل (SMPs) موادًا تستجيب للمؤثرات الخارجية، حيث تمتلك خصائص مصممة لتتيح لها العودة من شكل مؤقت مشوه إلى شكلها الدائم الأصلي عند تعرّضها لمحفّزات خارجية مثل درجة الحرارة أو المجالات المغناطيسية أو الضوء أو الرطوبة. تتمتع SMPs ببعض المزايا والعيوب مقارنةً بسبائك الذاكرة للشكل (SMAs) والسيراميك. تشمل هذه المزايا: قدرة عالية على استرجاع الشكل، كثافة منخفضة، تكلفة منخفضة، سهولة في برمجة الأشكال، وتحكم جيد في درجة حرارة الاسترجاع. إضافة إلى ذلك، يمكن تعديل SMPs كيميائيًا لتصبح متوافقة حيويًا وقابلة للتحلل الحيوي، مما جعلها موضع اهتمام بحثي واسع في تطبيقات متعددة. ومع ذلك، فإن أبرز عيوبها تتمثل في انخفاض القوة الميكانيكية، انخفاض معامل المرونة، وانخفاض درجات حرارة التشغيل^[1].

هذه المواد قادرة على استعادة شكلها الأصلي بعد تعرضها للتشوه وذلك تحت تأثير التحفيز الصحيح، المحفزات النموذجية لمواد الذاكرة ممكن أن تكون، التسخين أو التبريد (مواد حساسة للحرارة) (بطريقة مباشرة أو غير مباشرة)، الضوء (مواد حساسة للضوء) (دون تعريضها لتغيرات بدرجة الحرارة)، مواد كيميائية (مواد حساسة للتراكيب الكيميائية) (مثل الرطوبة، الإيثانول أو تغيير حموضة الوسط)، حمل ميكانيكي (مواد حساسة للأحمال الميكانيكية)، وغيرها. في التصنيع بالإضافة (AM)، يمكن ضبط الشكل الدائم لمكونات SMP من خلال الطباعة ثلاثية الأبعاد، بينما يمكن ضبط الشكل المؤقت عن طريق التشويه عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الانتقال الزجاجي (T_g)، يتبعها التبريد. يُحافظ على الشكل المؤقت عمومًا إلى حين تنشيطه بواسطة محفّز خارجي^[2].

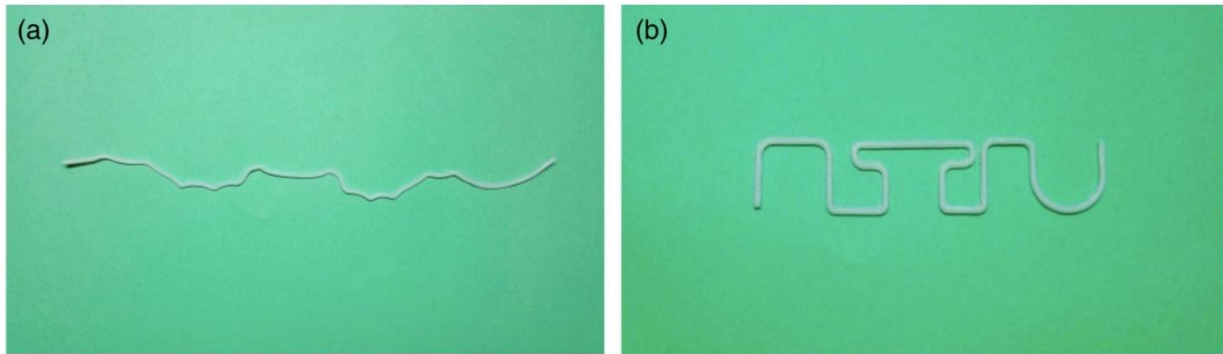
يظهر الشكل (30) مثالًا على بنية SMP مطبوعة ثلاثيًا باستخدام طابعة من نوع PolyJet، وهي تتكون من ثلاثة أحرف متصلة "NTU" في شكلها المطبوع. بعد الطباعة، تم تسخين العينة إلى درجة حرارة أعلى من درجة T_g ، ثم تم شدّها عند هذه الدرجة العالية، وتبريدها إلى درجة حرارة الغرفة مع الحفاظ على قوة الشد. وبمجرد وصول العينة إلى درجة حرارة الغرفة، أُزيلت قوة الشد واتخذت العينة الشكل الموضح في الشكل (a). وعند تسخينها مجددًا إلى درجة حرارة أعلى من T_g ، عادت العينة إلى شكلها المطبوع الأصلي كما هو موضح في الشكل (b)، مما يدل على استرجاع كامل للشكل^[3].

[1] Li, and others (2017), P171.

[2] the same as the last one.

[3] Khoo, and others (2015), P109.

تختلف هذه المواد عن بعضها بطريقة التحفيز التي تستجيب لها المادة وعليه فإنها تصنف إلى:



الشكل (30) مثال على بنية SMP باستخدام طباعة ثلاثية الأبعاد

المصدر ((P109.,Khoo, and others (2015))

4-3-1- المواد الذكية الحساسة للضوء (Light Responsive Materials):

يعد استخدام هذا النوع من المواد الذكية فعال ومناسب، لأن الضوء متاح بسهولة للعمل، غير سهولة التحكم بالضوء والطاقة الضوئية تمكننا من الحصول على استجابة سريعة من قبل المواد. ومن الجدير بالذكر أن التحكم ببارامترات عملية الطباعة يؤثر بشكل كبير على استجابة المادة^[1].

4-3-2- المواد الذكية الحساسة للحرارة (Thermo-Responsive SMMs):

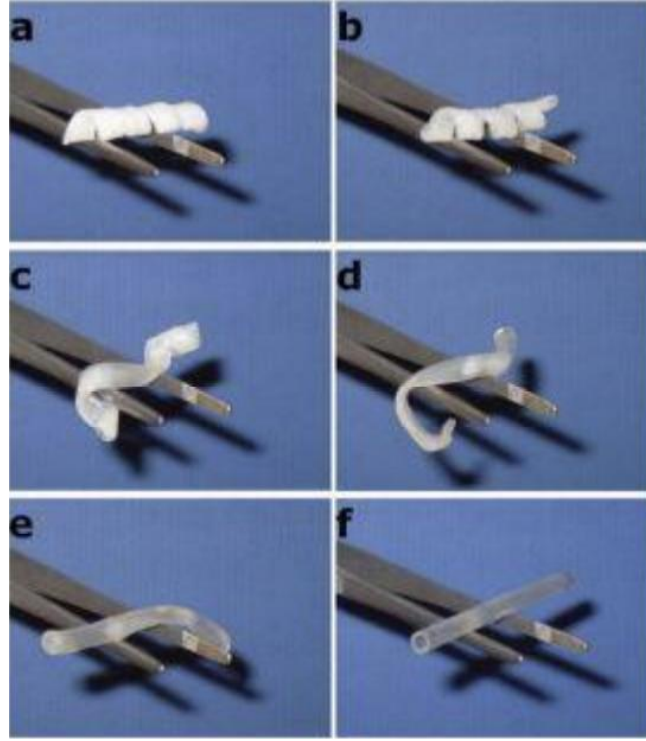
تعد المواد الذكية الحساسة للحرارة SMMs من أكثر المواد الذكية استخداماً في الطباعة رباعية الأبعاد، ويوجد منها نوعان، SMEs باتجاه واحد و SMEs باتجاهين. SMEs ذات الاتجاه الواحد، يتم ثني القطعة وهي في درجة الحرارة الطبيعية بشكل معين تحت تأثير قوة خارجية لتأخذ القطعة شكل معين، تحافظ القطعة على شكلها بعد التعرض للقوة خلال رفع درجة الحرارة حتى نصل لدرجة الحرارة المحددة، وعند إعادة تبريد الجسم فإنه يحافظ على الشكل الذي اتخذته ولا يعود للشكل الأساسي إلا في حال تعرض لقوة خارجية قادرة على تشكيله من جديد^[2]، كما يبين الشكل (31).

أما SMEs ذات الاتجاهين فإن هذه المواد تخلق للقطعة المطبوعة ذاكرة، حيث تحتفظ ذاكرة القطعة بصورتين

^[1]Gurung (2017), P40.

^[2]Ahmed, and others (2021), P2.

إحداهما عند درجة الحرارة المرتفعة والأخرى عند التبريد إذا هذه المواد قابلة للتعلم حيث نستطيع تدريبها على السلوك المطلوب منها اتباعه في ظرف معين^[1]، أي أنه يمكن القول أن هذه المواد ذات الاتجاهين عكوسة.



الشكل (31) المخطط الزمني لأنبوب مطبوع بالمواد ذات الذاكرة

المصدر (. Marc Behl, Arcada)

4-3-3- المواد الذكية الحساسة للمغطة (Magnetostriuctive Materials):

على غرار المواد الكهروضغطية والكهربائية، تستخدم المواد المغناطيسية الطاقة المغناطيسية. تقوم هذه المواد بتحويل الطاقة المغناطيسية إلى طاقة ميكانيكية^[2].

4-3-4- المواد الذكية الحساسة للكهربة (Electroactive Polymer – EAP)

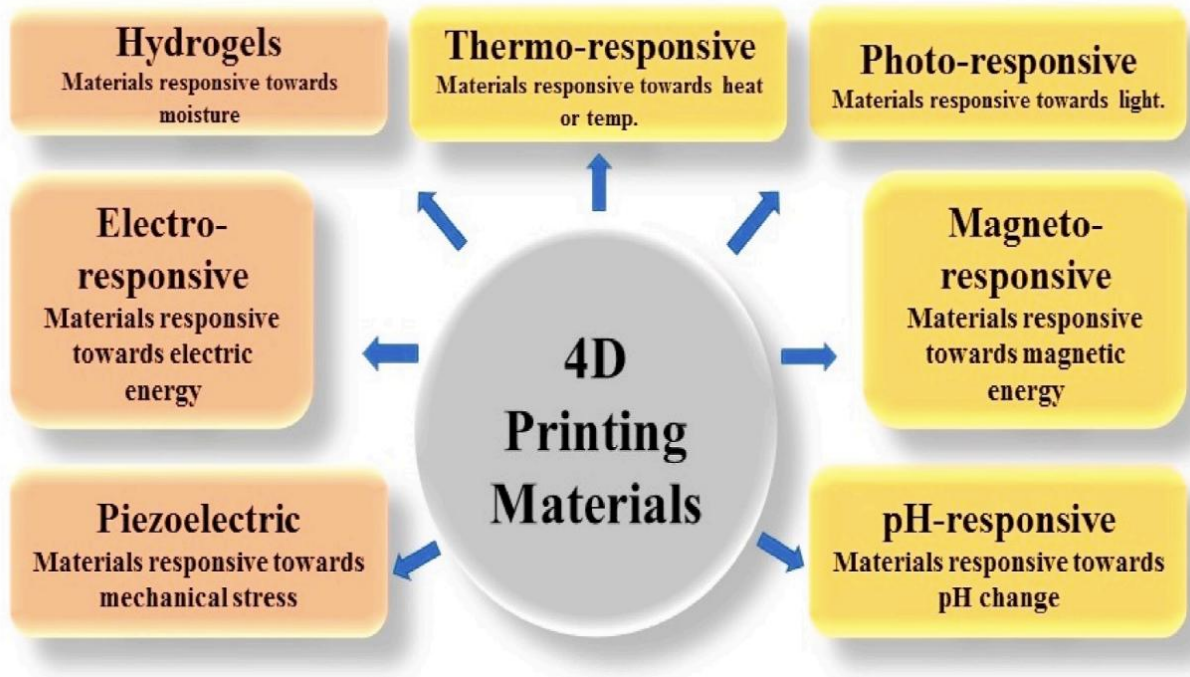
تعد البوليمرات الحساسة للكهربة (EAP) نوعاً من المواد الوظيفية المرنة الجديدة التي يمكن أن تُحدث تغيّرات كبيرة في الحجم أو الشكل عند تعرضها لتحفيز بواسطة مجال كهربائي.

^[1]Ahmed, and others (2021), P2.

^[2]Gurung (2017), P42.

تشمل أنواع الـ EAP مركبات البوليمر-المعدن الأيونية (IPMC)، وهلام بوكي (Bucky Gel)، والمطاطات العازلة (Dielectric Elastomers – DEs)، يعد تصنيع البنى المعقدة ثلاثية الأبعاد من البوليمرات الحساسة للكهربة موضوعًا بحثيًا مهمًا قيد الدراسة^[1].

يبين الشكل (32) المحفزات المتعددة للمواد الذكية.



الشكل (32) المحفزات المتعددة للمواد الذكية

المصدر (Marc Behl, Arcada .)

5- مبدأ عمل تقنية الطباعة رباعية الأبعاد:

بعد انتشار تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، استمرت الأبحاث والدراسات حتى تم التوصل للتقنية الأحدث الطباعة رباعية الأبعاد التي تسمح بإنتاج مطبوعات ثلاثية الأبعاد أكثر مرونة وفائدة، ويعود ذلك للمواد المستخدمة وكذلك للتصاميم والهياكل، بحيث أن القطعة تتحول بطريقة مبرمجة مسبقا استجابة لمحفز خارجي معين^[2].

^[1]LI, and others (2017), P174.

^[2]Gurung, (2017),P37.

من أهم التحديات التي تواجه الطباعة رباعية الأبعاد هي بنية التصميم، أي التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد الذي ستم طباعته بواسطة طابعة ثلاثية الأبعاد باستخدام مواد أولية ذكية^[1].

5-1- الطباعة رباعية الأبعاد بمادة واحدة:

بالنسبة للمكونات المطبوعة التي تتكون من مادة ذكية واحدة أو مزيج من مواد ذكية وتقليدية، يلعب ذكاء المواد دورًا أكثر أهمية في تحقيق الاستجابة المرجوة مقارنةً بالمكون متعدد المواد. يصف ذكاء المواد أو الخلطات الذكية القدرة على التكيف الذاتي، والاستشعار الذاتي، وذاكرة الشكل، واتخاذ القرارات، والوظائف المتعددة للمواد أو الخلطات. هذه الخصائص هي التي تحدد كيفية تغيير المكونات المطبوعة لخصائصها استجابةً للمحفز الخارجي، وتوفر تطبيقات وإعادة متنوعة لهذه المواد^[2].

وتندرج طباعة أي نوع من أنواع المواد الذكية التي تم ذكرها سابقًا ضمن هذا النوع في حال تمت طباعتها بشكل منفرد.

5-2- الطباعة رباعية الأبعاد لمواد متعددة:

من العوامل المهمة التي يجب مراعاتها عند تصميم مكون متعدد المواد توفر تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد. في الوقت الحالي، تُعد تقنية PolyJet التقنية الأكثر رسوخًا في طباعة المواد المتعددة. ولذلك، فإن معظم التطورات في الطباعة رباعية الأبعاد تستخدم طابعات PolyJet في أبحاثها لتصنيع مكونات متعددة المواد، تتكون من مواد ذكية ومواد تقليدية.

علاوة على ذلك، يلعب تصميم المكونات دورًا حاسمًا في تطورات الطباعة رباعية الأبعاد للمواد المتعددة، حيث لا تتفاعل المواد التقليدية مع المحفزات الخارجية. وبالتالي، عادةً ما يتم تحديد درجة التغيير في المكونات المطبوعة عند التنشيط من خلال تصميم المكونات.

لتوضيح هذه النقطة، نناقش بعض الأمثلة على تطورات الطباعة رباعية الأبعاد للمواد المتعددة. تشمل هذه الأمثلة محركات مطبوعة للروبوتات اللينة، وهياكل ذاتية التطور، ونظام مكافحة التزيف، والأوريغامي النشط، والطبي المتسلسل المُتحكم فيه، بالإضافة إلى بعض نتائج الأبحاث الجارية.

^[1]Gurung (2017), P40.

^[2]Khoo, and others (2015), P109.

5-2-1- مُشغلات الروبوتات اللينة:

شمل تطوير وتطبيقات الروبوتات التقليدية روبوتات مصنوعة من مواد صلبة مثل المعادن والسيراميك والبلاستيك الصلب. على الرغم من أن هذه الروبوتات مصممة لتطبيقات محددة، إلا أنها غير مناسبة لجميع التطبيقات والبيئات. على سبيل المثال، لا يمكن لروبوت تقليدي مصمم باستخدام مواد صلبة أن يحدث تشوهاً هيكلياً كبيراً وأن يُحاكي حيواناً رخوًا مثل الأخطبوط. ونتيجة لذلك، تؤدي الفجوة في هذا المجال إلى ظهور الروبوتات اللينة.

الروبوتات اللينة مجالٌ شائعٌ وناشئٌ يسعى إلى استخلاص بعض سمات الكائنات الحية الطبيعية باستخدام مواد لينة بشكل رئيسي، وخاصةً المواد اللينة الذكية. هذه المواد اللينة الذكية، مثل البوليمرات النشطة كهربائياً (EAPs)، قادرةٌ على استشعار صلابتها وتفعيلها وتغييرها. في عام 2009، قُدمت طريقةٌ جديدةٌ لتصنيع مشغلات الإيلاستومر العازل (DEAs) للروبوتات اللينة من خلال عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد. تُساعد طريقة التصنيع الجديدة هذه على معالجة المشكلات التي تُواجه تصنيع مشغلات الإيلاستومر العازل بالطرق التقليدية، نظرًا لصعوبتها وكثرة استخدامها للعمالة^[1].

المطاط العازل هو في الأساس مادة ناعمة ذكية تنتمي إلى مجموعة مواد EAP، ويمكن التحكم فيها كهربائياً. عند إمداد جهاز DEA بالكهرباء، يتشوه هيكل المُشغل، ويمكن أن يُؤَلَدَ إجهاداً كبيراً يتجاوز 100%. ونتيجةً لذلك، تُحوّل الطاقة الكهربائية المُدخلة إلى جهاز DEA إلى عمل ميكانيكي. علاوةً على ذلك، قام الباحثون في بحثهم بتصنيع نموذج أولي مُعقد لمُشغل مُعكس. طُبعت مكونات المُشغل، وُضع الغشاءان المُصنَّعان في حالة إجهاد مسبق أثناء عملية التجميع، مع توصيل الأقطاب الكهربائية على جانبي كل غشاء. عند تطبيق الجهد على الغشاء العلوي، سيتحرك المُشغَل لأعلى، وسيتحرك لأسفل عند تطبيق الجهد على الغشاء السفلي.

على الرغم من إثبات قابلية تشغيل غشاء DEA المطبوع ثلاثي الأبعاد، إلا أن إحدى القيود التي واجهت هذا البحث هي استحالة طباعة غشاء DEA مُجمَّع بالكامل وعامل دفعةً واحدة. ويرجع ذلك إلى عدم وجود حلٍّ حتى الآن لتصنيع غشاء مُجهَّز مسبقاً باستخدام طابعة ثلاثية الأبعاد. بالإضافة إلى ذلك، سينصبّ العمل المستقبلي إما على تصنيع أغشية متعددة الطبقات، أو إنتاج هياكل ناعمة لا تتطلب إجهاداً مسبقاً، أو تصنيع مُشغلات أحادية الشكل وثنائية الشكل.

[1]Khoo, and others (2015), P110.

بشكل عام، تم إثبات نجاح فكرة تصنيع غشاء DEA باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد. وقد وفرت طريقة جديدة لإنتاج جزيئات DEA بطريقة أسهل وأقل كثافة في العمل، ويمكن أن تكون هذه التكنولوجيا الجديدة مفيدة لتطوير الروبوتات الناعمة^[1].

5-2-2- الهياكل ذاتية التطور:

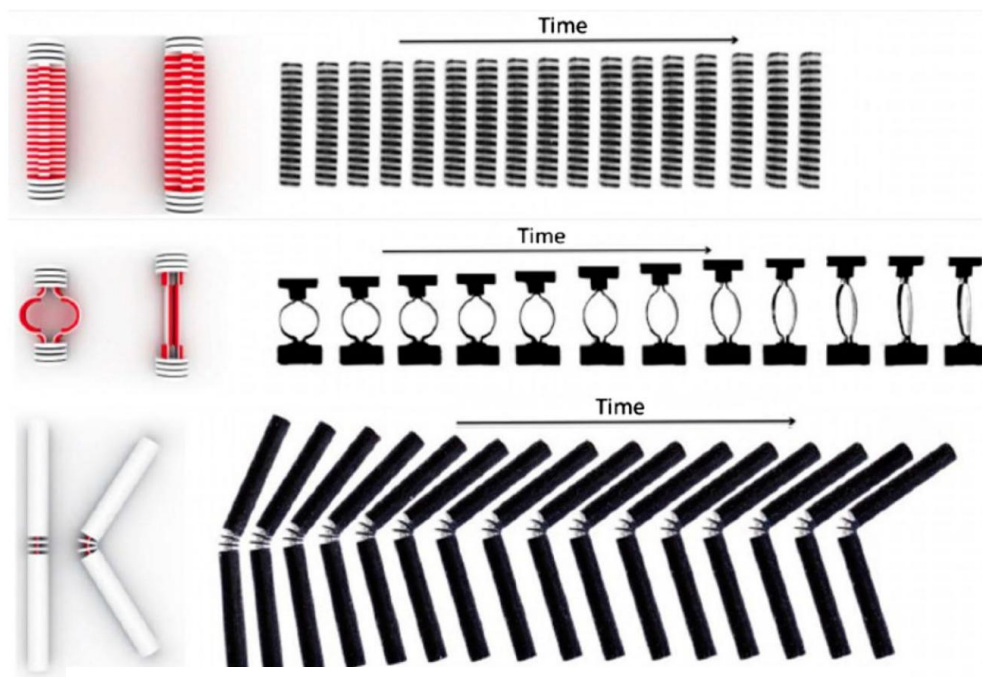
في أحد التطورات في الطباعة رباعية الأبعاد، قام الباحث رفيف وآخرون (2014) بطباعة مكونات متعددة المواد تتحول إلى أشكالها المصممة عند تعرضها للماء. أُطلق على هذا المفهوم اسم "الهيكلي ذاتي التطور". تتكون هذه الهياكل ذاتية التطور أساسًا من مادة بوليمرية شديدة المحبة للماء ومادة بلاستيكية صلبة. عند تعرض هذه المادة المحبة للماء، تمتص الماء، مما يؤدي إلى زيادة حجمها بما يصل إلى الضعف^[2].

خلال المراحل الأولى، تم تصنيع ثلاث مكونات مختلفة أظهرت أنواعًا مختلفة من التشوهات عند تعرضها للماء. يوضح الشكل (33) هذه الأنواع الثلاثة من التشوهات، حيث تُظهر المكونات العلوية والوسطى تشوهات التمدد، بينما تُظهر المكونات السفلية تشوهات الطي. يُظهر المكون العلوي في الشكل تمددًا خطيًا. عند تعرضه للماء، يتغير طوله مع مرور الوقت، ويتغير نسبة المادة المحبة للماء إلى المادة الصلبة، يمكن تحقيق نسب مختلفة من التمدد الخطي. أما المكون الأوسط الموضح في الشكل، فيُظهر تمددًا حلقيًا. يتكون المكون من أشكال متعددة تشبه الحلقات، وطُبعت كل حلقة بطبقتين مختلفتين من المواد. عند تعرض هذا المكون للماء، تتمدد الطبقة الداخلية وتُسبب تشوهًا للحلقة. يمكن التحكم في التمدد الخطي الكلي لهذا المكون عن طريق تغيير نصف قطر أو قطر الحلقات. يُظهر المكون السفلي في الشكل ظاهرة طي. يتم ذلك عن طريق طباعة طبقة من مادة محبة للماء فوق طبقة من مادة صلبة. لتحقيق زاوية الطي المطلوبة، تُستخدم ألواح صلبة من مواد مختلفة. أُدخلت مسافات وأقطار بين القضبان لإيقاف عملية الطي عند تداخل الصفائح جسدًا مع بعضها البعض^[3].

[1]Khoo, and others (2015), P110.

[2]Riviv, and others (2014), P1.

[3]Khoo, and others (2015), P110.



الشكل (33) الهيكل ذاتي التطور

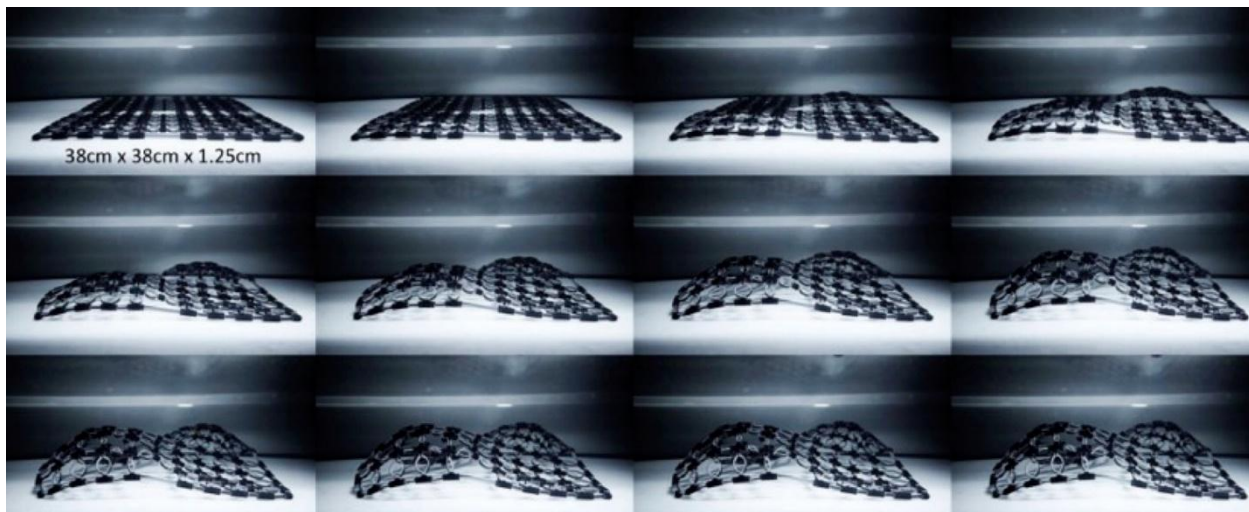
المصدر (Khoo, and others (2015),P111.)

صُنعت مجموعة متنوعة من المكونات متعددة المواد الأكثر تعقيدًا بناءً على النتائج التي تم الحصول عليها من تشوهات التمدد والطي. أظهرت هذه المكونات المعقدة طيًا أحادي البعد، وطيًا ثنائي الأبعاد، وطيًا ثنائي الأبعاد مع التمدد. يظهر المكون متعدد المواد الذي أظهر طيًا ثنائي الأبعاد مع التمدد في الشكل (34). يتشوه هذا المكون إلى أسطح محدبة ومقعرة من خلال تشوه الطي وتشوه تمدد الحلقة^[1].

ومع ذلك، ووفقًا للنتائج التي تم الحصول عليها، وُجد تدهور ميكانيكي عندما تخضع المكونات لدورة تحول الطي والانبساط (الترطيب/التجفيف) بشكل متكرر. علاوة على ذلك، يمكن ملاحظة تدهور المادة المحبة للماء أيضًا عند ترطيب المادة وتجفيفها بشكل متكرر. علاوة على ذلك، فإن التحول بين الأشكال المختلفة ليس دائمًا. وبالتالي، وحسب التطبيقات، يمكن أن يكون هذا التحول العكسي إما ميزة أو عيبًا. ومن المشاكل الأخرى التي وُجّهت أن

[1]Khoo, and others (2015), P111.

المكون العلوي في الشكل 6 هـ، وأن تمدده يقتصر على 30% فقط. ومع ذلك، قد يكون من الممكن حل هذه المشكلة من خلال استكشاف مواد جديدة في الأبحاث المستقبلية^[1].



الشكل (34) نموذج لمكونات متعددة المواد

المصدر (Khoo, and others (2015),P111.)

بشكل عام، هناك العديد من التحسينات المستقبلية الممكنة. في البحث الذي تم إجراؤه، تم استكشاف المواد المحبة للماء فقط التي تتفاعل مع الماء. كما يمكن استكشاف آليات تنشيط أخرى مثل تغير درجة الحرارة والتعرض للأشعة فوق البنفسجية. بالإضافة إلى ذلك، يمكن التنبؤ بالخصائص الفيزيائية للمادة المحبة للماء وسلوكها من خلال المحاكاة على المستوى الجزيئي بدلاً من استخدام نموذج كتلة الزنبرك في هذا البحث. وأخيراً، يُمكن تطبيق هذا التصميم المبتكر للهياكل ذاتية التطور في مجالات عديدة. على سبيل المثال، يُمكن تجميع هيكل بسهولة تحت الماء العميق، وهو أمر يصعب على البشر القيام به بطريقة أخرى^[2].

^[1]Khoo, and others (2015), P111.

^[2]the same of the last one.

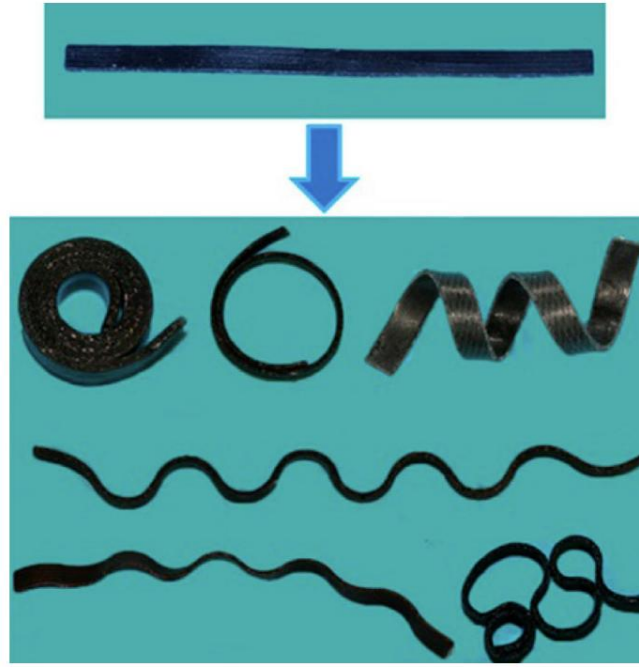
5-2-3 - الأوريجامي النشط والطبي التسلسلي المُتحكَّم به:

على الرغم من أن الأوريجامي نوع من الفنون التقليدية، حيث تُطوى قطعة من الورق المسطح لتكوين جسم ثلاثي الأبعاد، إلا أن مفهوم الأوريجامي قد استُكشف على نطاق واسع في الوقت الحاضر لتقديم حلول مبتكرة لمشاكل ضغط الأجسام الكبيرة في مساحة صغيرة. على سبيل المثال، يُمكن العثور على تطبيقات الأوريجامي في الوسائد الهوائية للسيارات، والكرتون، وأكياس التسوق، والخلايا الشمسية الكهروضوئية ذات القدرة على تغيير الشكل. ومع ذلك، غالبًا ما تكون عملية التعبئة صعبة، وقد تؤدي إلى زيادة تكلفة البنية التحتية، حيث قد يلزم استخدام معدات جديدة في حال حدوث أي تغييرات في تصميم الطبي. لذلك، تُعد فكرة الأوريجامي النشط مثيرة للاهتمام، إذ يُمكن أن تُساعد في تقليل الاستثمار اللازم لمعدات الطبي^[1].

يُعرَّف الأوريجامي النشط بأنه تصميم لإنشاء شكل أوريجامي قابل للطوي أو الفتح الذاتي. ولتحقيق ذلك، يلزم استخدام مواد ذكية. على سبيل المثال، تُجرى حاليًا أبحاث حول تصميم الأوريجامي باستخدام البوليمرات الدقيقة (SMPS) والبوليمرات المنشطة بالضوء والبوليمرات الدقيقة (SMAS). لذلك، يتمثل أحد التطورات في الطباعة رباعية الأبعاد للأوريجامي النشط في استخدام تقنية الطباعة متعددة المواد لطباعة ودراسة أداء المواد المركبة المنشطة المطبوعة (PACs printed active composites). ومن أمثلة المواد المركبة المنشطة المطبوعة المواد المركبة اللينة المصنوعة من ألياف SMP الزجاجية التي تُعزز المصفوفة المرنة. ومن خلال تعديل نسبة حجم واتجاه ألياف SMP وترتيب تكديس الصفائح، يمكن تصنيع صفائح مختلفة. ستخضع هذه الصفائح بعد ذلك لبرمجة حرارية ميكانيكية لتبني تكوينات ثلاثية الأبعاد معقدة، مثل الثني واللف والالتواء والطوي، كما هو موضح في الشكل (35). ويمكن استعادة شكل الصفيحة المسطحة الأصلية للصفائح عن طريق تسخينها. بالإضافة إلى ذلك، صُمم صندوق ذاتي الطبي وطُبِع باستخدام PACs كمفصلات تتصل بالصفائح الخاملة المصنوعة من البلاستيك الصلب^[2].

[1]Khoo, and others (2015), P113.

[2]the same as the last one.



الشكل (35) تصميم الأوريجامي باستخدام البوليمرات الدقيقة

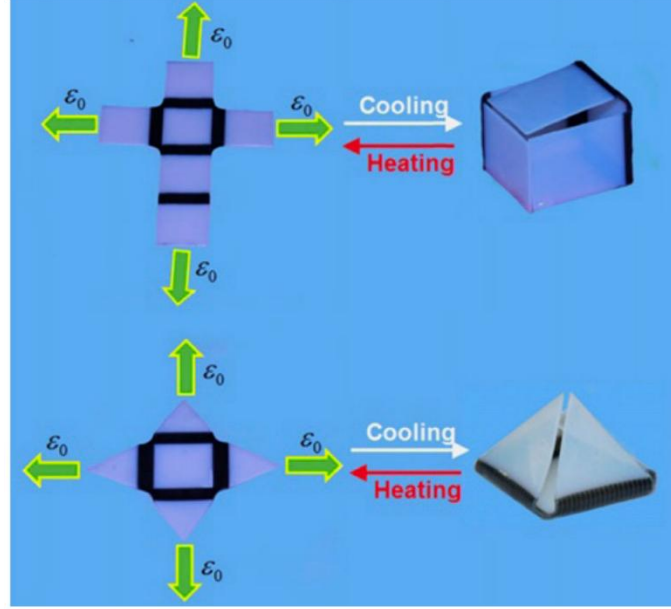
المصدر (Khoo, and others (2015),P113.)

بعد الجزء الأول من البحث، أُجري الجزء الثاني منه بتطبيق مفهوم الطباعة رباعية الأبعاد على تصميم وتصنيع الأوريجامي النشط. يركز البحث بشكل رئيسي على فهم الميكانيكا الحرارية لهياكل مفصلات PACs. أُجريت تجارب لتحديد العلاقة بين زاوية طي المفصلة والمعلومات البنيوية الدقيقة. علاوة على ذلك، طُورت نظرية تصف الظواهر المرصودة. يتكون تصميم وتصنيع الأوريجامي النشط من طباعة صفائح بوليمر مسطحة تتكون من مفصلات PACs. صُنعت مفصلات PACs هذه بنفس طريقة الجزء الأول من البحث. ومع ذلك، تحتوي مفصلات PACs المصنعة هنا على طبقتين فقط من صفائح PACs. تحتوي إحدى الطبقتين على مادة مصفوفة مرنة فقط، بينما تحتوي الطبقة الأخرى على حجم وتباعد الألياف المحددين مسبقاً^[1].

باستخدام نموذج نظري طُوّر لتوفير التوجيه في اختيار معايير التصميم، صُممت وصُنعت العديد من مكونات الأوريجامي النشطة لإظهار زوايا الطي المحددة. تُطوى هذه المكونات ذاتياً من صفائح بوليمر مسطحة، وتشمل صندوقاً مكوناً من ستة جوانب وهرماً خماسي الجوانب كما هو موضح في الشكل (36)، وطائرتي أوريجامي.

[1]Khoo, and others (2015),P113.

بالإضافة إلى ذلك، تثبت إمكانية طباعة كائن ثلاثي الأبعاد مباشرةً. ومع ذلك، يتطلب القيام بذلك المزيد من المواد نظرًا للحاجة إلى هياكل داعمة ووقت تصنيع أطول، حيث إن إزالة هذه الدعامات ستزيد من وقت المعالجة اللاحقة^[1].



الشكل (36) نماذج أوريجامي صندوقاً مكوناً من ستة جوانب وهرماً خماسي الجوانب

المصدر (Khoo, and others (2015),P114.)

باختصار، تم عرض مفهوم PACs، وتبين أنها قادرة على التكامل مع أجزاء مطبوعة أخرى لتشكيل مكون ثلاثي الأبعاد يمكنه التحول بمرور الوقت. علاوة على ذلك، طُبِّق مفهوم الطباعة رباعية الأبعاد، وأنشئ فن الأوريجامي النشط.

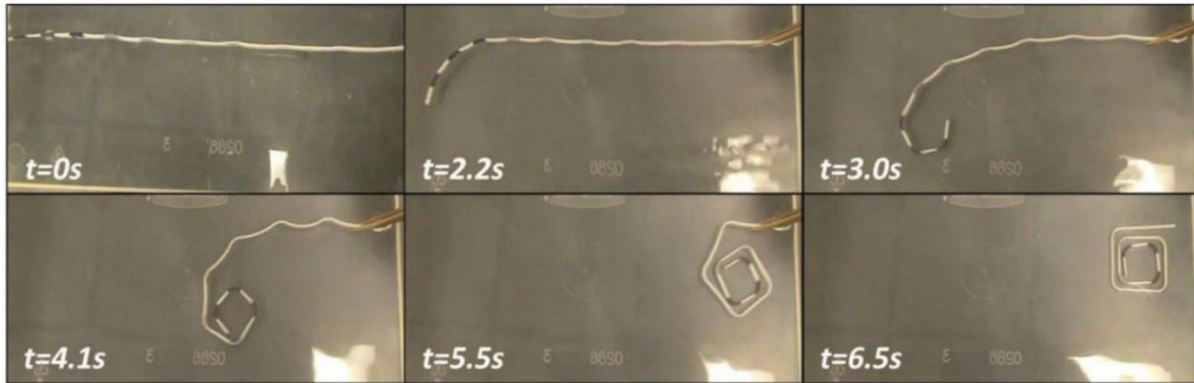
من مجالات البحث الأخرى التي يجب التركيز عليها فهم وتحقيق طَيّ متسلسل مُتحكَّم به أو استعادة شكل الأوريجامي النشط. مع ازدياد تعقيد تصميم الأوريجامي، قد يؤدي طَيّ أجزاء الأوريجامي النشطة في نفس اللحظة إلى تداخل أجزاء الطي المختلفة مع بعضها البعض.

[1]Khoo, and others (2015),P114.

نظرًا لحساسية SMP للتغيرات الحرارية، يمكن تحقيق استعادة الشكل التسلسلي المُتحكم بها من خلال تطبيق توزيع مُخصص لخصائص SMP الحرارية والميكانيكية على المقاطع المحددة. سيسمح هذا للأقسام المختلفة بتنشيط استعادة شكلها عند درجات حرارة مختلفة، وبالتالي تحقيق طبي تسلسلي للمكونات المطبوعة.

في البحث الذي أجراه الباحث يو وآخرون (2015)، تم عرض تجارب على المكونات الحلزونية والمكونات المتشابكة. تحتوي هذه المكونات على صفائح مستطيلة ومفصلاتها مصنوعة من SMPs ذات درجات حرارة تحريض T_g مختلفة أو متماثلة^[1].

يوضح الشكل (37) عملية الطي التلقائي والمتسلسل لمكون حلزوني بدرجات حرارة T_g مُصممة. ويمكن ملاحظة استعادة الشكل الكامل للمكون في أوقات مختلفة من خلال سلسلة من الصور. بالإضافة إلى ذلك، تم تصنيع مكون حلزوني آخر بنفس درجات حرارة T_g عند مفصلات مختلفة^[2].



الشكل (37) عملية الطي التلقائي والمتسلسل لمكون حلزوني

المصدر (Khoo, and others (2015),P114.)

ومع ذلك، يُظهر هذا المكون المطبوع، بنفس خصائص المادة، سرعة استعادة شكل أبطأ واستعادة شكل غير كاملة. من الواضح أن مواد مختلفة بدرجات حرارة T_g مختلفة تتطلب عملية استعادة شكل أو طبي متسلسلة مُتحكم بها للمكون المطبوع. وتم توضيح هذه النتيجة مرة أخرى من خلال المكونات المتشابكة. وقد تم إثبات استعادة الشكل المتسلسلة المُتحكم بها من خلال مكون متشابك بدرجات حرارة T_g مُصممة. وكذلك، عندما يكون مكون متشابك آخر

[1]Yu, and others (2015),P196.

[2]Khoo, and others (2015),P114.

بترتيب معكوس. عند اختبار مركبتين لدرجات حرارة T_g وأخرى لدرجات حرارة T_g متماثلة عند أقسام المفصلة المختلفة، لم يُظهر أيٌّ من المُكونين استعادةً كاملةً للشكل. وقد أكدت هذه الملاحظة الاستنتاج السابق بأن ترتيب وتوزيع خصائص المواد عند أقسام المفصلة المختلفة أمرٌ مهمٌ لتحقيق استعادة الشكل أو الطي المُتحكم بها والمتسلسلة^[1].

بشكلٍ عام، أثبت خو وآخرون (2015) إمكانية التحكم في تسلسل استعادة الشكل من خلال تصنيع مُكونات حلزونية ومكونات متشابكة. ويتم التحكم في تسلسل استعادة الشكل من خلال اختيار وتخصيص خصائص مواد مُختلفة بدرجات حرارة T_g مُختلفة للأقسام المُختلفة. وفيما يتعلق بإمكانيات هذا البحث، يُمكن أن تُسهم النتائج المُتحصل عليها بشكلٍ كبير في تطبيقات مُختلفة، مثل تبديلات التشوه المُعقد وتطوير مواد صلبة SMP ذات القدرة على التعديل الذاتي والتعزيز الذاتي لتتناسب مع الظروف البيئية المُتغيرة. علاوة على ذلك، ومن خلال استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد، يمكن لهياكل SMP ذات عملية الطي المتتالية المُتحكم بها أن تتمتع بحرية تصميم أكبر ودقة أعلى في توزيع خصائص المواد^[2].

فيما يلي دراسة حالة تم فيها الاعتماد على مادة SMP كمادة وحيدة لمفصلات هياكل الأوريجامي النشطة. تكمن ميزة هذا النهج في أن مواد SMP، المكونة من مواد متعددة بنسب مختلفة لكل مكون، تتيح حرية أكبر في التصميم واستجابة الشكل. فبدلاً من استخدام الألياف فقط للتحكم في اتجاه الاستجابة، يمكن لهذه الهياكل المطورة الاستجابة لأي اتجاه عند برمجة الهيكل. وهذا يسمح بحرية أكبر في هندسة تغيير الشكل، مما يؤدي إلى علاقة بين المادة واختلاف الأبعاد المتفاعل مع المحفز الحراري. علاوة على ذلك، قام الباحثون في هذه التجربة بتطوير هياكل أوريجامي قابلة لإعادة التشكيل من خلال استغلال مزيج من التصنيع متعدد المواد والتصميم الهندسي^[3].

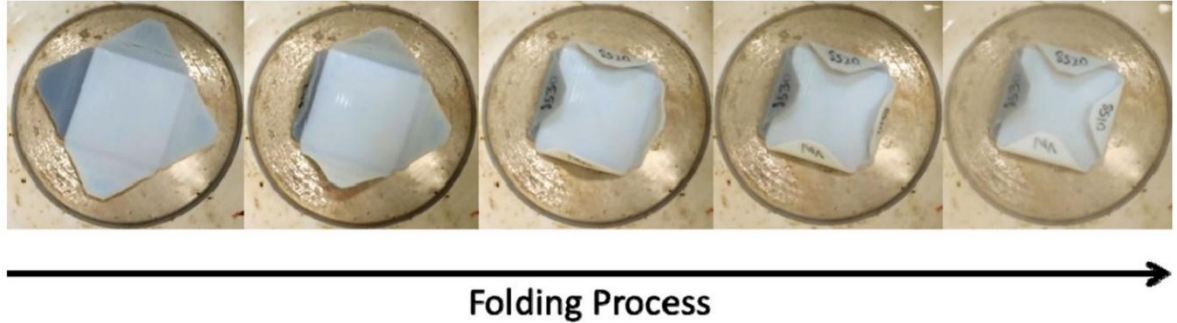
في حالة العينة الموضحة في الشكل (38)، تم تحقيق عملية طي متسلسلة مُتحكم بها لجزء مطبوع بمواد مختلفة مطبوعة في هياكل مفصلية مختلفة. كانت المفصلات فقط مكونة من SMP، وكانت درجات حرارة T_g للمفصلات

[1]Khoo, and others (2015), P114.

[2]the same as the last one.

[3]the same as the last one.

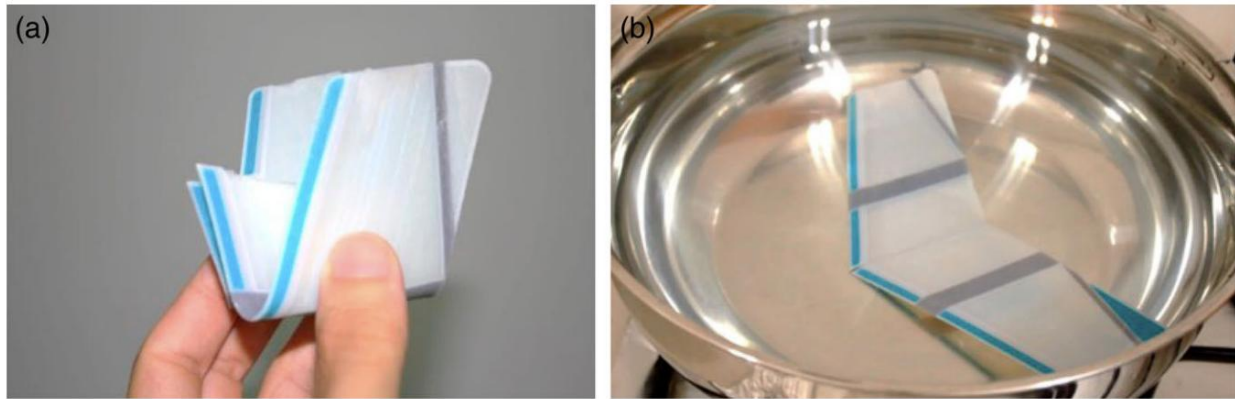
المختلفة مختلفة. وبالتالي، تطوى المفاصل عند درجات حرارة مختلفة أثناء التسخين المستمر، ولها مراحل مختلفة من الاستعادة، مما ينتج عنه طي متعدد المراحل كما هو موضح في الشكل (38) [1].



الشكل (38) عملية طي متسلسلة مُتحكم بها

المصدر (Khoo, and others (2015),P115.)

في مثال آخر، يُعرض في الشكل (39) تطبيق الطي المتعدد في جسم ثلاثي الأبعاد مُمثل بطائرة شراعية قابلة لإعادة التشكيل. طُبع الجزء متعدد المواد باستخدام المفاصل المكونة من صفائح إسفنجية مسطحة (SMPS). تقع هذه الصفائح تحديداً عند المفاصل بحيث لا يصطدم الهيكل المستوي بالمناطق الأخرى أثناء التنشيط بواسطة التحفيز الحراري. كما هو موضح في الشكل، ينفتح المنزلق من الشكل (a) إلى الشكل (b) عند تسخينه [2].



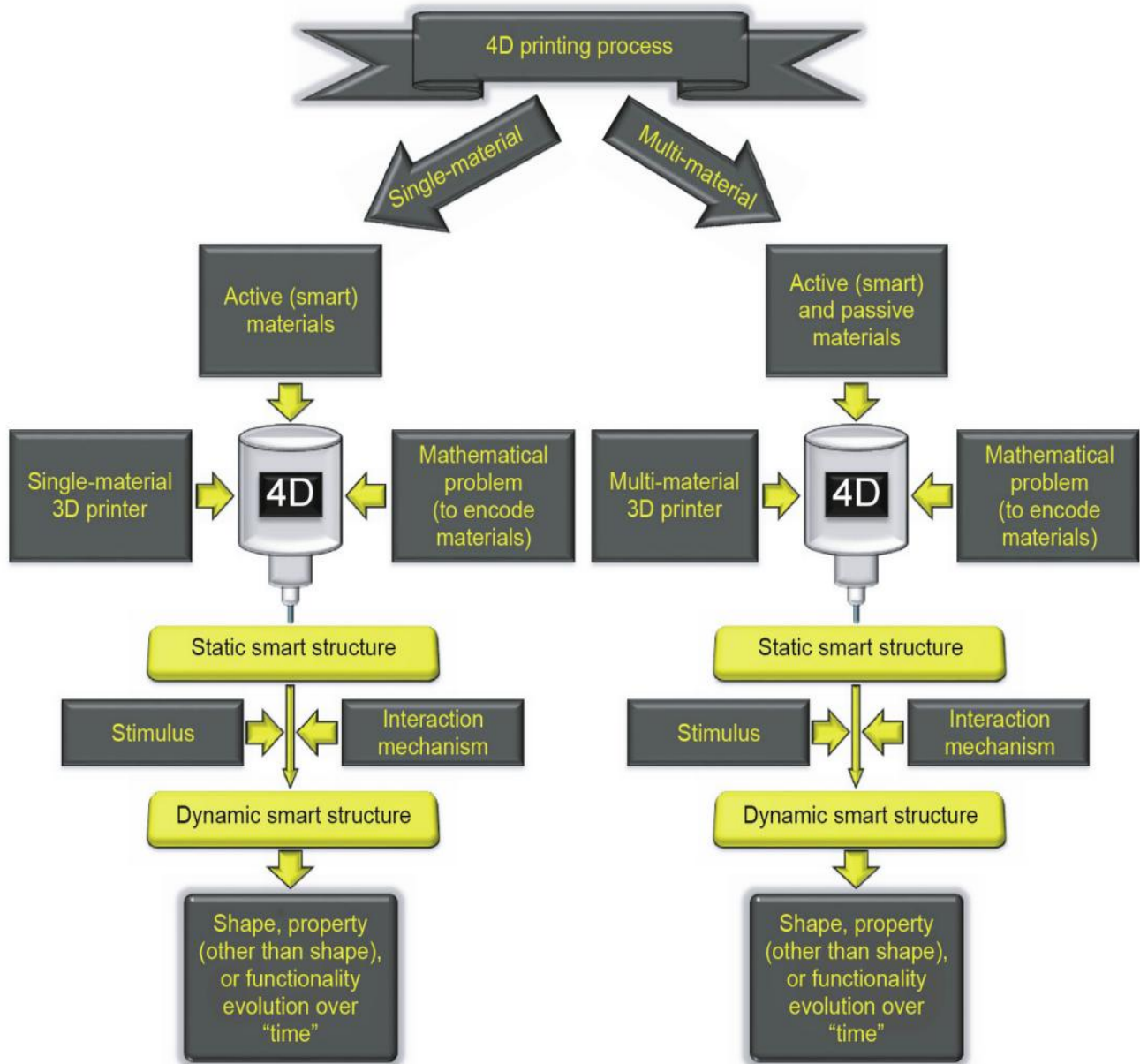
الشكل (39) تطبيق الطي المتعدد في جسم ثلاثي الأبعاد مُمثل بطائرة شراعية قابلة لإعادة التشكيل

المصدر (Khoo, and others (2015),P115.)

[1]Khoo, and others (2015), P115.

[2]the same of the last one.

بالنتيجة فإن عملية الطباعة رباعية الأبعاد مشابهة تماما لعملية الطباعة ثلاثية الأبعاد إلا أن الاختلاف يكون بنوع المواد المستخدمة حيث يتم في تقنية الطباعة رباعية الأبعاد استخدام مواد ذكية، كما أنه يمكن أن تتم الطباعة بمادة واحدة أو بعدة مواد، يوضح الشكل (40) مبدأ عمل تقنية الطباعة رباعية الأبعاد بمادة واحدة وبمواد متعددة.



الشكل (40) مبدأ عمل تقنية الطباعة رباعية الأبعاد بمادة واحدة وبمواد متعددة

المصدر (Momeni, and others (2020),P1050.)

6- تطبيقات تقنية الطباعة رباعية الأبعاد:

إن تطبيقات هذه التقنية واسعة ومتنوعة سوف نستعرض أهمها وأكثرها انتشاراً فيما يلي:

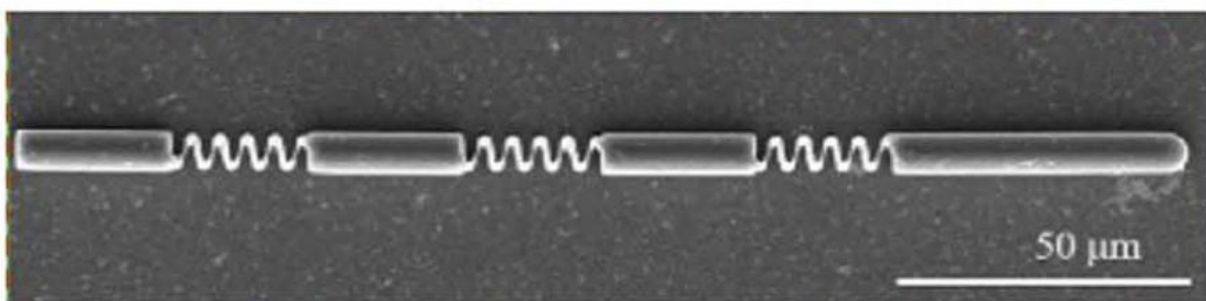
6-1- الروبوتات الدقيقة:

إن الروبوتات التقليدية، بسبب اعتمادها على المواد الصلبة، تواجه صعوبات في تنفيذ الحركات العضوية والمرنة مثل قبضات اليد البشرية أو الحركات المعقدة لأذرع الأخطبوط. نتيجة لهذه القيود، ظهرت الروبوتات اللينة كفرع جديد في الروبوتات، حيث يتم استخدام مواد لينة وخاصة، مثل بعض أنواع الإلستوميرات، كوسيط تفاعلي بين الروبوت وبينته. وتوفر هذه المواد قدرة على التفاعل اللطيف مع الأجسام الهشة، كما تمنح الروبوتات قدرة أكبر على تحمل القوى المؤثرة دون تضرر، مقارنة بالروبوتات التقليدية^[1]. ومن الأمثلة المثيرة للاهتمام في هذا التطبيق.

6-1-1- الروبوتات الدقيقة المستخدمة في توصيل الأدوية:

6-1-1-1- الروبوت الدقيق المعتمد على الهلام المائي:

طور سون وآخرون (2020) روبوتاً دقيقاً يعتمد على الهلام المائي^[2] الموضح بالشكل (41)، يتكون من أسطوانات صلبة متصلة بواسطة نوابض مرنة، ويتم تحريكه مغناطيسياً باستخدام مجال مغناطيسي متذبذب. يتألف هذا الروبوت من مزيج من مواد PEGDA و PETA (لتعزيز المتانة البنيوية) بالإضافة إلى جسيمات نانوية من Fe_3O_4 تمنحه خاصية الاستجابة المغناطيسية. يتميز هذا الروبوت بكونه متوافقاً حيويًا وقابلًا للتحلل الحيوي خلال 24 ساعة، مما يجعله مناسباً لتطبيقات إيصال الأدوية المستهدف^[3].



الشكل (41) الروبوت الدقيق المعتمد على الهلام المائي

المصدر (Adam, and others (2021), P11.)

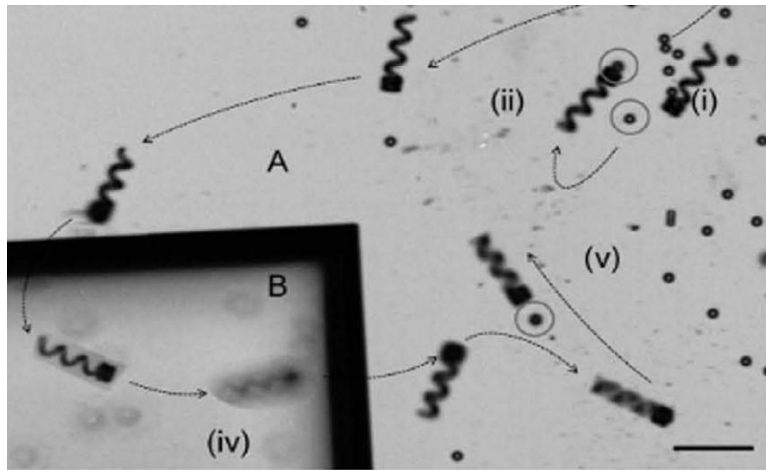
^[1]Zhang, and others (2019), P216.

^[2]sun, and others (2020), P2.

^[3]Adam, and others (2021), P11.

6-1-1-2-الميكروسويمر الهلامي:

عرض سيلان وآخرون (2019) نموذجًا آخر لروبوت دقيق مصنوع من هلام مائي يحتوي على جسيمات مغناطيسية من أكسيد الحديد^[1]، كما هو موضح بالشكل (42). يتم توجيه هذا الميكروسويمر مغناطيسيًا، ويتميز بقدرته على التحلل الإنزيمي استجابةً لإنزيم MMP-2، مما يؤدي إلى انتفاخه وإطلاق الحمولة الدوائية. بسبب هذه الاستجابة الذكية لمؤثر خارجي حيوي (الإنزيم)^[2].



الشكل (42) الميكروسويمر الهلامي

المصدر (Adam, and others (2021), P11.)

6-1-1-3-الروبوت الحلزوني المغناطيسي:

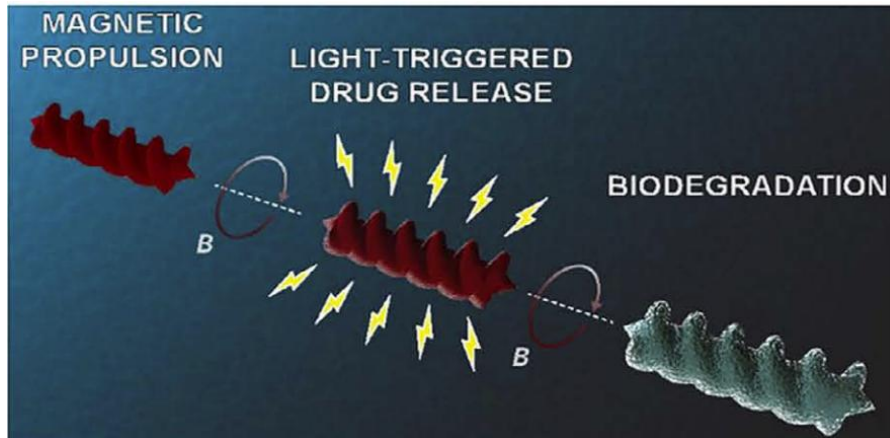
قام توتوري وآخرون (2012) بتصميم روبوت دقيق حلزوني الشكل مع رأس معدل^[3]، مبين بالشكل (43)، وقد تم تصنيعه باستخدام تقنيات طلاء معدني متقدمة. يعتمد هذا الروبوت على تصميم هندسي ذكي وحركة مغناطيسية للتحكم الدقيق بالأجسام المجهرية^[4].

[1]Ceylan, and others (2019), P3354.

[2]Adam, and others (2021), P11.

[3]Tottori, and others (2012), P814.

[4]Adam, and others (2021), P11.



الشكل (43) الروبوت الحلزوني المغناطيسي

المصدر (Adam, and others (2021),P11)

6-1-2- المشغلات المتغيرة الشكل (Shape-Changing Actuators):

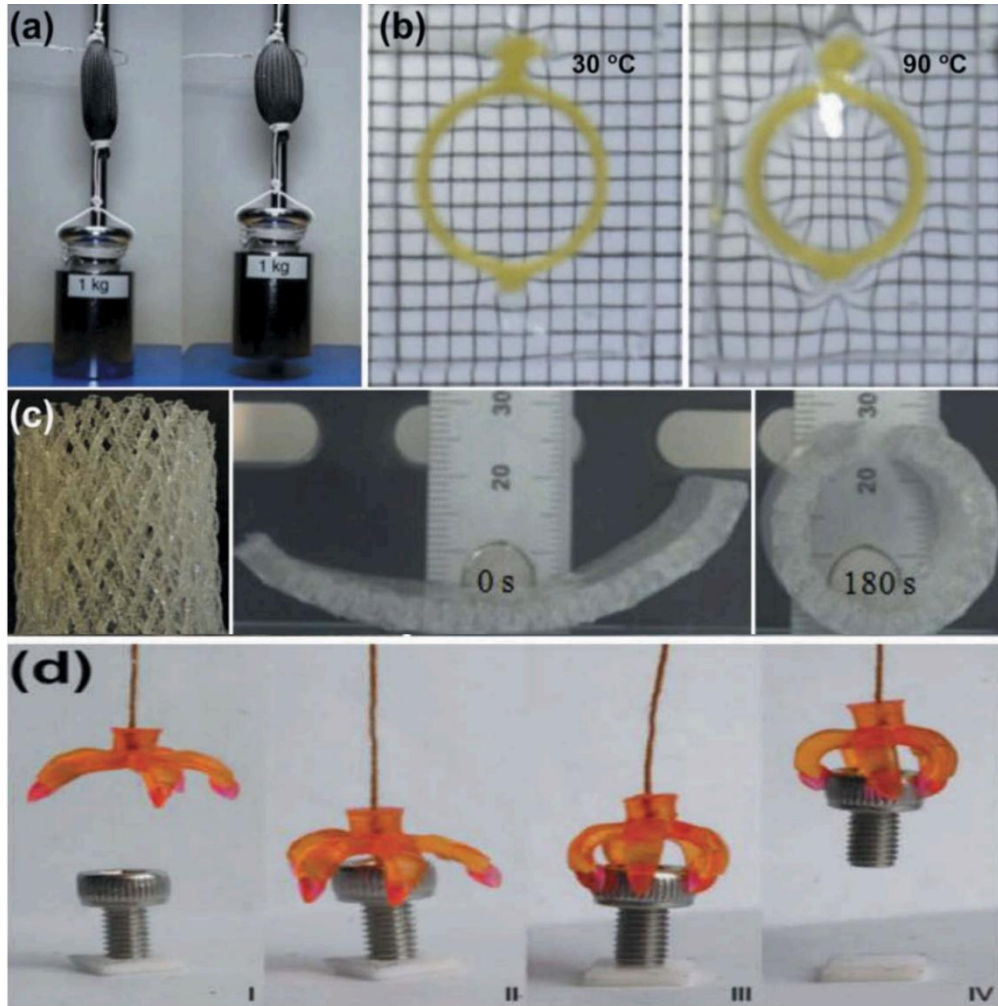
طوّر الباحث داردن وآخرون (2002) مادة مركّبة لاستخدامها كمشغل لِيْن كعضلة اصطناعية^[1]، وتتكوّن هذه المادة من مصفوفة من الإيلاستومير السيليكون المسامي، حيث تُملأ الفراغات المسامية بالإيثانول. ونظرًا لسهولة تحضير هذه المادة المركبة وإمكانية التعامل معها، يمكن طباعتها ثلاثية الأبعاد باستخدام تقنيات الطباعة التقليدية. يتم تفعيل المشغل عبر تطبيق حرارة من خلال التسخين المقاوم، ما يؤدي إلى تبخر الإيثانول المحتجز وتوسيع مصفوفة الإيلاستومير. وتتميّز المادة بإمكانية تحقيق انفعالات تصل إلى 900% وإجهادات تصل إلى 1.3 MPa بكثافة منخفضة تبلغ 0.84 g/cm³. ويدّعي الباحثون أن المادة قادرة على رفع وزن يعادل 1700 مرة من وزنها الذاتي كما في الشكل (44 a). كما أثبتت اختبارات التحميل الدوري بوزن 60 N على 6 غرامات من المادة عدم ظهور علامات تدهور. هذا المشغل يتميز بانخفاض تكلفته وبساطة تصنيعه وصديق للبيئة^[2].

[1]Daerden, and others (2002), P2.

[2]Zhang, and others (2019), P217.

من جهة أخرى، تُعد الإيلاستوميرات العازلة (Dielectric Elastomers – DEs) نوعًا من المواد الذكية القادرة على توليد انفعالات كبيرة عند تطبيق جهد كهربائي. وتتألف بنيتها من مادة إيلاستوميرية عازلة محصورة بين قطبين

مرنين.



الشكل (44) المشغلات المتغيرة الشكل

المصدر (Zhang, and others (2019).P217)

وقد تم إجراء دراسات مكثفة حول استخدام DES في تطبيقات مختلفة، خاصة كمشغلات. وقد تم اعتماد طريقة جديدة لطباعة هذه المواد باستخدام تقنية الطباعة بالحبر النافث، مما مكن من تصنيع بنى ثلاثية الأبعاد معقدة، وتنفذت DES المطبوعة بهذه التقنية على مثيلاتها التقليدية من حيث الانفعال السطحي الناتج تحت نفس المجال الكهربائي. كما تم استخدام البوليمرات ذات الذاكرة الشكلية (SMPS) كمشغلات متغيرة الشكل في تطبيقات بسيطة مثل الملقاطات، كما يبين الشكل (c, d 44)، لكن أحد أهم عيوبها هو البطء في الاستجابة، حيث قد تستغرق عملية التفعيل عدة دقائق، مما يجعلها غير مناسبة للروبوتات التقليدية التي تتطلب حركات سريعة ودقيقة. إلا أن SMPS

يمكن تفعيلها عبر عدة محفزات مختلفة، ما يجعلها مناسبة في بعض التطبيقات الخاصة. ومن التطبيقات الواقعية لهذه المشغلات هو استخدام الطباعة رباعية الأبعاد لتصنيع هياكل معقدة يمكن أن تتغير أشكالها بطرق غير تقليدية. على سبيل المثال، يبين الشكل (44 b)، بوليمرات بلورية سائلة شبكية حرارية الاستجابة مصنعة باستخدام الطباعة رباعية الأبعاد لاستخدامها في البصريات التكيفية، وهو ما يُظهر إمكانية استخدامها في تطبيقات تقنية متقدمة^[1].

6-2- الهياكل ذاتية البناء:

لقد تطورت الهياكل ذاتية البناء من مرحلة المفهوم النظري إلى مرحلة التجريب العملي، وتُعد الطباعة رباعية الأبعاد أحد الأساليب الرائدة في هذا المجال، إذ تتيح إمكانية تصنيع هياكل قادرة على تغيير شكلها أو تجميع نفسها ذاتياً، وذلك عبر برمجة سلوك المواد المستخدمة مسبقاً من خلال التقلص أو الانتفاخ الموضعي المخطط له بعناية. يفتح هذا التوجه آفاقاً واسعة نحو تطوير أنظمة إنشائية ذكية يمكنها التفاعل مع بيئتها أو التحول ذاتياً من شكل إلى آخر دون تدخل بشري مباشر^[2].

6-2-1- الحاويات:

تُعد أبسط الهياكل ذاتية البناء المطبوعة رباعياً مثلاً على الحاويات القابلة للطي الذاتي، مثل المكعب القابل للانطواء الموضح في الشكل (45 a). وقد تم اقتراح هذا التصميم من قبل الباحث جي وآخرون (2013)^[3]، حيث تم طباعته أولاً على هيئة ورقة مسطحة تحتوي على خمسة مفاصل مبرمجة. تتكوّن هذه المفاصل من طبقتين، إحداها تحتوي على ألياف بوليمرية تُظهر تأثير الذاكرة الشكلية. تُمكن هذه الألياف من الحفاظ على التشوّه البلاستيكي عند درجات حرارة منخفضة، بينما تبقى الطبقة الأخرى مرنة. عند تسخين الهيكل ثم تبريده وهو مشدود، ينشأ تفاوت في الإجهاد بين الطبقتين مما يؤدي إلى طي الورقة تلقائياً إلى مكعب عند إطلاقها. وبفضل تأثير الذاكرة الشكلية، يمكن أن ينفث المكعب ذاتياً مرة أخرى عند إعادة التسخين. تُشير هذه التكنولوجيا إلى إمكانية إعادة ابتكار حلول التعبئة والتغليف، وقد تمتد تطبيقاتها مستقبلاً إلى الأثاث أو الطرود ذاتية الطي^[4].

وبالإضافة إلى الحاويات المكعبة، يمكن تصميم أنابيب أسطوانية ذاتية اللف باستخدام الطباعة رباعية الأبعاد. على سبيل المثال، قام كاور وآخرون (2018) بطباعة ورقة مربعة تحتوي على مصفوفة من شبكات البوليمر الذكي

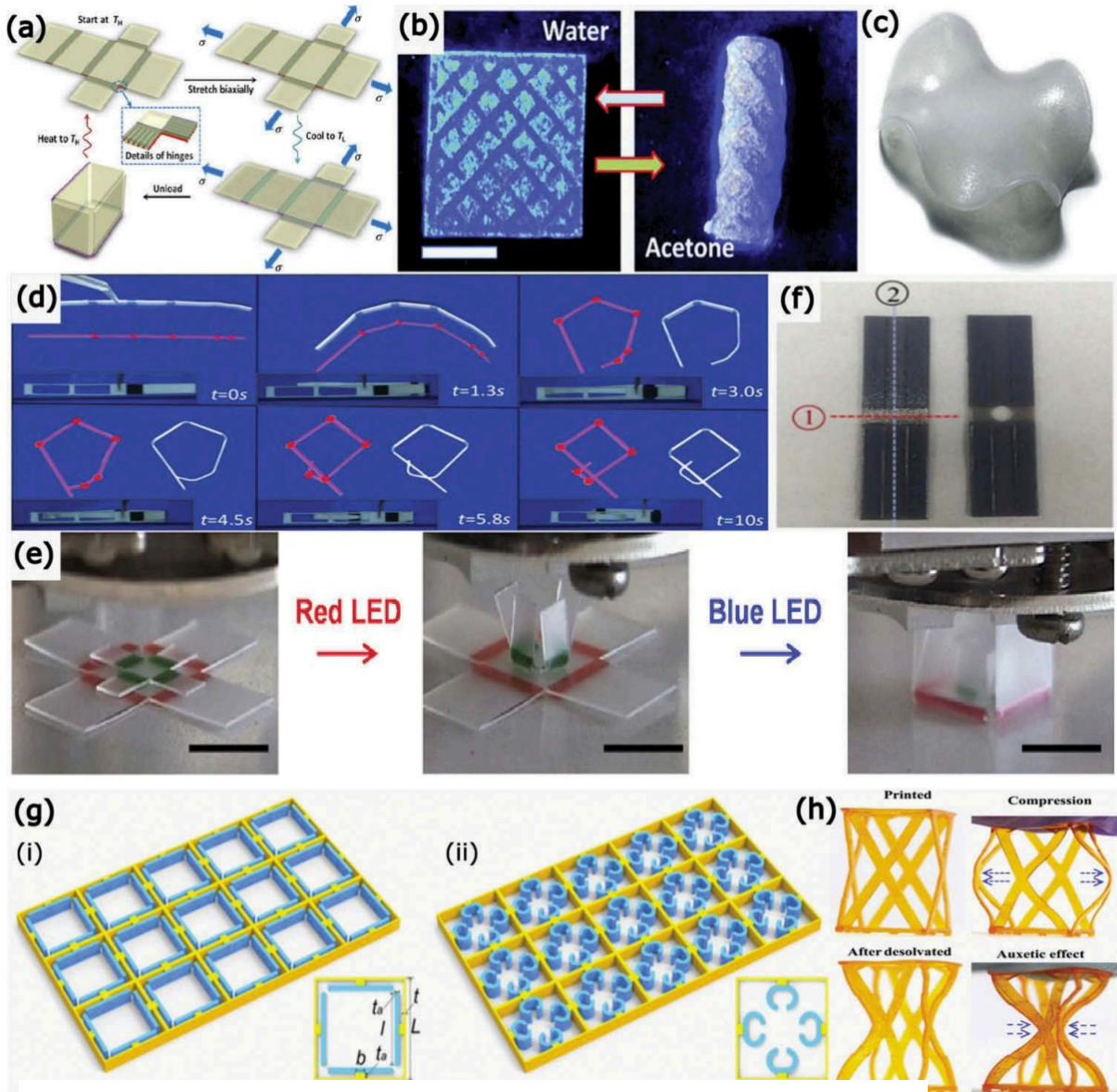
[1]Zhang, and others (2019), P217.

[2]Zhang, and others (2019), P211.

[3]Ge, and others (2013), P1.

[4]Zhang, and others (2019), P212.

موزعة بشكل منتظم^[1]. تسمح هذه الشبكة بانحناء موحد لكل نقطة على السطح باتجاه محدد، بدلاً من الطي الموضعي على الحواف كما في التصميم المكعب كما في الشكل (45 b). وبهذا، تتمكن الورقة من الانطواء الذاتي لتشكل أنبوباً^[2].



الشكل (45) الحاويات

المصدر (Zhang, and others (2019),P211)

[¹]Kaur, and others (2018), P1.

[²]Zhang, and others (2019), P212.

6-2-2-2- انحناء الأسطح:

يمكن أيضًا طباعة المواد الذكية بتوزيع تدريجي (تدرّج مادي) مما يمكن الباحثين من التحكم في انحناء سطح النموذج المطبوع. على سبيل المثال، تمت طباعة ورقة شبكية تحتوي على بوليمرات حساسة للرطوبة مركزة في مناطق محددة، مما أدى إلى توليد سطح متموّج (يشبه الشكل الجيبي) بعد غمر النموذج في الماء. ومن خلال التحكم الدقيق بتدرّج توزيع البوليمر، أمكن تحقيق تشوهات متعددة المراحل، تُظهر خصائص سطحية أكثر تعقيدًا. تُعد هذه التقنية مفيدة في تقليل الحجم أثناء التخزين أو النقل، حيث تُنتج الهياكل كأشكال مسطحة ثم تأخذ أشكالًا ثلاثية الأبعاد مع انحناءات معقّدة يصعب تحقيقها بطرق التصنيع التقليدية، كما في الشكل (45 c)^[1].

بالإضافة إلى ذلك، تمت طباعة عوارض مستقيمة باستخدام تقنية الطباعة رباعية الأبعاد، حيث برُمجت هذه العوارض للانحناء إلى تقوس معين اعتمادًا على تأثير التغيّر الشكلي. مكّن ذلك من تصنيع النواض بسهولة باستخدام قوالب مستوية. كما أثبتت البوليمرات ذات الذاكرة الشكلية (SMPs) فعاليتها أيضًا في تصنيع الأسطح المنحنية. فقد قام باحثون آخرون بتصنيع هيكل سطحي مركب، طُبعت إحدى طبقاته باستخدام SMP، وتمت برمجتها بحيث ينحني السطح تلقائيًا إلى شكل منحنى مُستهدف يحقق تركيزًا أمثل للطاقة الشمسية، كما في الشكل (45 d)^[2].

6-2-3- خزائن وصناديق الأمان:

في التطبيقات السابقة، كانت جميع التشوهات تحدث على نطاق شامل (تشوهات عامة)، حيث تُحفّز المواد الذكية كلها في الوقت ذاته ضمن بيئة تحفيز موحّدة. هذا الاستجابة المتزامنة تحدّ من نطاق الحركة للبنية، إذ يجب تجنّب أي تداخل فيزيائي بين الأجزاء المتحركة. لمعالجة هذا القيد، قام الباحث ماو وآخرون بطباعة شريط بوليمري (45 d) يجمع بين نوعين من البوليمرات ذات الذاكرة الشكلية بتركيز مختلفة عند كل مفصل^[3]، ما أدّى إلى اختلاف درجات حرارة الانتقال الزجاجي بين المفاصل. أتاح هذا التدرج في درجات الحرارة تفعيل تأثير الذاكرة الشكلية تدريجيًا أثناء التسخين، وبالتالي تكوين هياكل قابلة للترابط الذاتي. بالمثل، حقق بوداغي وآخرون (2019) طيًا تسلسليًا من خلال طباعة المفاصل بألوان مختلفة تميز معدلات امتصاصها للضوء (45 e)^[4]، حيث طُويت ورقة بوليمرية صغيرة

[1]Zhang, and others (2019), P212.

[2]Zhang, and others (2019), P212.

[3]Mao, and others (2015), P7.

[4]Bodaghi, and others (2019), P1.

لتشكيل صندوق عند تعريضها للضوء الأحمر، ثم تم تشكيل صندوق أكبر يغلف الأول عند التعرض للضوء الأزرق. إلى جانب الطي التسلسلي، تُعدّ البوليمرات ذات الذاكرة الثلاثية الشكل بديلاً واعدًا لتجنّب التداخل الذاتي عبر مراحل طي متعددة^[1]. ولتصاميم أكثر تعقيدًا تتطلب طيًا متقاطعًا، حيث تتقاطع حواف الطي، تبين فاعلية طباعة ثقب لتخفيف الإجهاد عند نقطة تقاطع الحواف، مما قلل بشكل كبير من التشققات (f 45). كما أظهرت التجارب أن الأوراق السمكية صمدت لفترات أطول خلال طيات متعددة. تشير نتائجهم إلى ضرورة إضافة مواد أو ميزات هيكلية إضافية لتفادي تركّز الإجهاد في هياكل الطي المتقاطع^[2].

3-6 - الأجهزة الطبية:

أحدثت الطباعة ثلاثية الأبعاد تأثيرًا كبيرًا في المجالات الطبية، لا سيما في المجالات التي تُعدّ فيها العلاجات الطبية الشخصية مهمة، مثل طب الأسنان، والغرسات، والأطراف الصناعية. ويمكن تعزيز هذه التطورات بشكل أكبر باستخدام الأجهزة المطبوعة رباعية الأبعاد من خلال الاستفادة من خصائصها المتغيرة الشكل، والتي سيتم تناولها في هذا القسم.

6-3-1 - توصيل الدواء المُستهدف:

يُعدّ توصيل الدواء المُستهدف طريقةً لتوصيل الدواء إلى مواقع مُحددة في الجسم. ونظرًا لتعدد مُحفزاتها المُحتملة، يُمكن للأجهزة المطبوعة رباعية الأبعاد احتواء الأدوية وإطلاقها عندما تُوفر بيئة الموقع المُستهدف المُحفز المناسب. تُعدّ الحاويات المطبوعة رباعية الأبعاد (الأشكال (41)، (42)، و(43)) مثالًا نموذجيًا يُستخدم لاحتواء الأدوية وإطلاقها. تم تصنيع الحاويات باستخدام الطباعة الضوئية التقليدية. تُصنع الحاويات من ألواح مقاومة للضوء ومفصلات بولي كابرولاكتون القابلة للتحلل الحيوي، والتي تستجيب للحرارة. تُصنع الألواح المسامية بترتيبات وأحجام مُختلفة من الثقوب، كما هو مُبين في الشكل (a 46)، لدراسة إطلاق محتويات الحاوية^[3].

صُنعت ملقطات حرارية متعددة الأصابع، أُطلق عليها اسم "ملاقطات ثيرا"، تُستخدم للتحكم في إطلاق الأدوية في الجهاز الهضمي. في هذا العمل، صُنعت ملقطات ثيرا باستخدام تقنية الليثوغرافيا الضوئية التقليدية، وتتكون من شرائح صلبة من فومارات بولي بروبيلين ومفصلات بولي (N-أيزوبروبيل أكريلاميد-حمض كو-أكريليك) مُحفزة.

[1]Zhang, and others (2019), P212.

[2]the same as the last one.

[3]the same as the last one.

تعمل ملقطات ثيرا عند درجات حرارة تزيد عن 32 درجة مئوية، مما يسمح لها بالتشبث بالأنسجة في درجة حرارة الجسم لإطلاق الأدوية بشكل مستدام. يُظهر الشكل (b 46) ملقطًا ثيرا يُمسك بكتلة من الخلايا^[1].

6-3-2- الدعامات:

يتطلب تصنيع الدعامات خطوات عديدة نظرًا لتعقيد هندستها وخصوصيتها للمريض. تتيح الطباعة رباعية الأبعاد تصنيع دعامات مخصصة بسرعة. كما تتيح خاصية ذاكرة الشكل للدعامات تقليل التدخل الجراحي للزرعة، وذلك بطباعة الدعامات أولًا بالقطر النهائي المطلوب، ثم برمجتها على قطر أصغر لتسهيل الزراعة ووضعها في المكان الصحيح. بعد الزراعة، تعود الدعامات إلى قطرها الأصلي عند درجة حرارة الجسم^[2].

كما قام بوداغي وآخرون (2019) بطباعة شبكة ميتاماتيرية رباعية الأبعاد تتكون من عوارض مرنة مزودة بألياف SMP مدمجة، مرتبة في شكل أنبوبي لإثبات أحد تطبيقاتها المحتملة كدعامة^[3]. كما طوروا نماذج حرارية ميكانيكية للمواد والهيكل، استُخدمت لإجراء محاكاة العناصر المحدودة للتنبؤ بتشوّه بنية الشبكة عند تحريكها حراريًا. علاوةً على ذلك، طوّر المؤلفون صيغةً للعناصر المحدودة تصف برمجة المواد في عملية الطباعة رباعية الأبعاد. تُعد هذه الأدوات الحاسوبية بالغة الأهمية لتصميم وتصنيع الأجهزة المطبوعة رباعية الأبعاد.

كما قام جي وآخرون (2016)^[4] بطباعة دعامات رباعية الأبعاد باستخدام تقنية الإسقاط المجهرية عالي الدقة، وذلك لإثبات كفاءة تصنيع الدعامات باستخدام الطباعة رباعية الأبعاد، وإثبات إمكانية استخدام بوليمرات ذاكرة الشكل في تصنيع الدعامات، كما هو موضح في الشكل (c 46). كما أظهرت الطباعة المباشرة باستخدام أحبار PLA المتشابهة بالأشعة فوق البنفسجية كتقنية تصنيع فعّالة، حيث تمكنوا من طباعة دعامات رباعية الأبعاد (d 46) باستخدام مواد مستجيبة للمغناطيس، مما يسمح بتوجيهها مغناطيسيًا عن بُعد إلى وجهتها^[5].

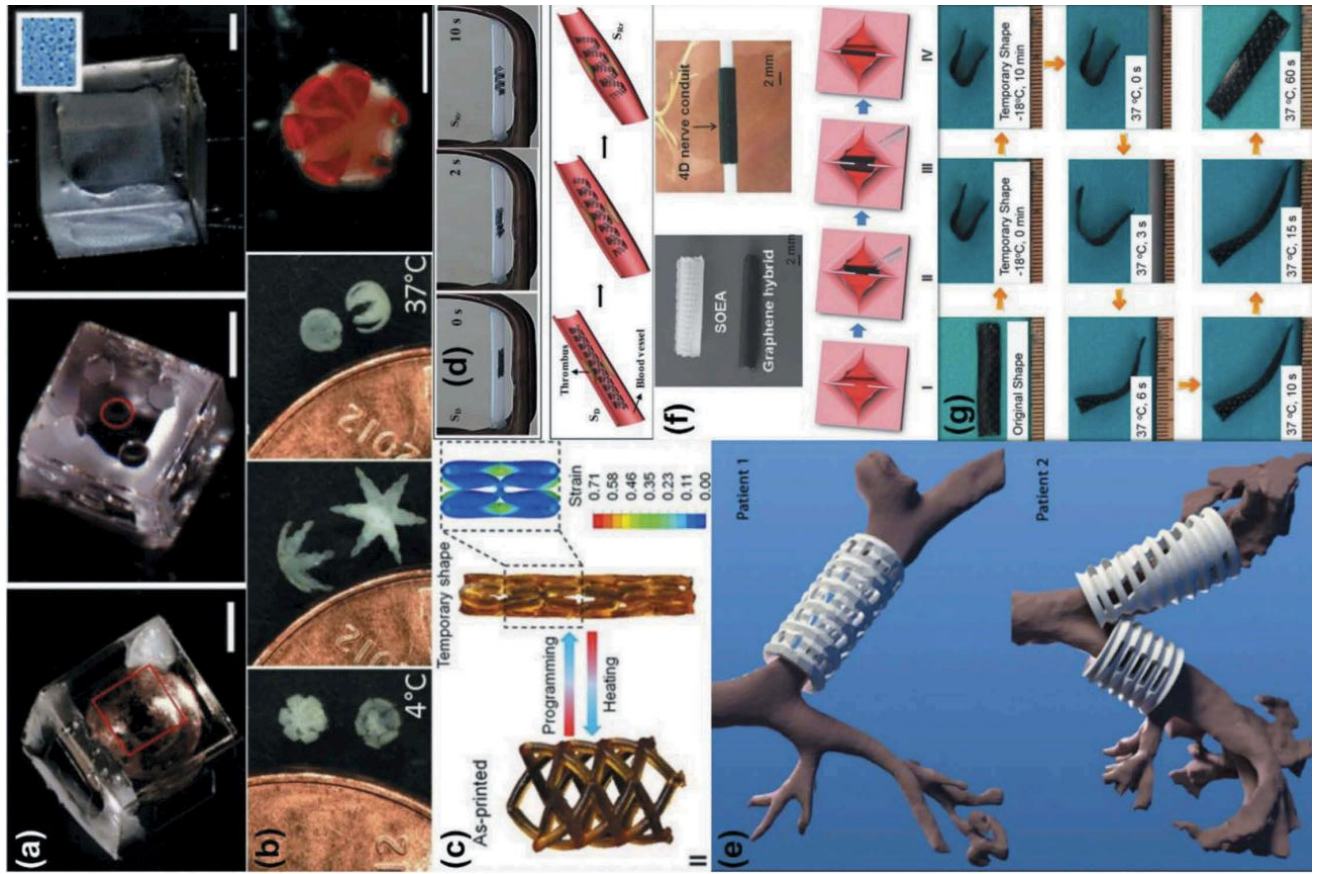
[1]Zhang, and others (2019), P215.

[2]Zhang, and others (2019), P216.

[3]Bodaghi, and others (2019), P1.

[4]Ge, and others (2016), P6.

[5]Zhang, and others (2019), P216.



الشكل (46) الأجهزة الطبية

المصدر (Zhang, and others (2019),P215.)

6-3-3- الجبائر:

تُعدّ الهندسة جانبًا بالغ الأهمية في الأجهزة الطبية الحيوية، مثل الجبائر، حيث يُعدّ ملائمة الجهاز للجسم ضروريًا لضمان عمله بشكل صحيح. ومع ذلك، في الحالات التي يكون فيها نمو الجسم كبيرًا، تواجه الأجهزة الطبية الحيوية المصنّعة تقليديًا صعوبات في التكيف مع هذا النمو بمرور الوقت. يمكن أن تسمح الطباعة رباعية الأبعاد لهذه الأجهزة بمواءمة تغير الشكل الناتج عن النمو^[1].

أجرى موريسون (2015) ثلاث علاجات طبية ناجحة شملت زراعة جراحية لجبائر مجرى الهواء الخارجي مطبوعة بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد لدى العديد من المرضى الرضع المصابين بتلين القصبة الهوائية^[2]. يُعدّ تلين القصبة الهوائية حالة تُهدّد الحياة، حيث ينهار مجرى الهواء لدى المريض بشكل مفرط أثناء التنفس. صُممت الجبيرة

^[1]Zhang, and others (2019), P216.

^[2]Morrison, (2015), P1.

لاستيعاب نمو مجرى الهواء، وبالتالي منع الضغط غير المرغوب فيه. يوضح الشكل (46 e) نماذج ثلاثية الأبعاد لمجاري الهواء لمريضين رضيعين مع جبائر مُخصصة حول المناطق المصابة. أظهرت المسوحات أن مجاري الهواء لدى الرضع استمرت في النمو بشكل صحي وأن المضاعفات الخاصة بهم قد تم حلها^[1].

قنوات توجيه الأعصاب (NGCs) هي أجهزة أنبوبية تُسهّل تجديد الأعصاب، ويجب أن تستوفي المتطلبات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية التي تسمح بتكوين الأنسجة. باستخدام مونومر طبيعي مشتق من مادة طبيعية، ومتشابه ضوئياً (أكريلات إيبوكسيد زيت فول الصويا، SOEA)، قام الباحث ميو وآخرون (2018) بطباعة قناة توجيه عصبي رباعية الأبعاد (باستخدام الطباعة المجسمة) تؤدي وظائف متعددة مرغوبة لتجديد الأنسجة العصبية (e 46). تتيح خاصية ذاكرة الشكل لقناة NGC إجراء تعديلات سهلة (من خلال التحفيز الحراري) أثناء عملية الزرع. بالإضافة إلى ذلك، توفر خاصية ذاكرة الشكل شداً محورياً ضرورياً لتوجيه إعادة النمو. استُخدم الجرافين لتعزيز خصائص مهمة أخرى لقناة. كما قاموا بطباعة سقالة طبية حيوية رباعية الأبعاد (46 f) باستخدام. تتمتع السقالة بخصائص ممتازة لتغيير الشكل وتتمتع بقدرة ممتازة على الالتصاق والتكاثر للخلايا الجذعية المتوسطة البشرية عند مقارنتها بسقالات ثنائي أكريلات البولي إيثيلين جليكول التقليدية^[2].

7- موجز الفصل:

تُظهر النتائج التي تم الوصول إليها في هذا الفصل أن الطباعة رباعية الأبعاد تمثل نقلة نوعية في مجال التصنيع الذكي، بفضل قدرتها على دمج المواد الذكية مع مبادئ التصميم المبرمج لإنتاج هياكل متحركة ذاتياً تستجيب للمؤثرات البيئية دون الحاجة إلى أنظمة تشغيل خارجية. كما تبيّن أن التحكم في التشوهات البنيوية من خلال توزيع المواد والخصائص الفيزيائية يتيح تصميم تطبيقات معقدة وفعالة، خاصة في الروبوتات اللينة والأنظمة القابلة للتحويل. وتؤكد الدراسة أن استغلال هذه التقنية يتطلب فهماً عميقاً للخصائص الميكانيكية والحرارية للمادة المستخدمة، إلى جانب إدراك العلاقة بين التصميم والاستجابة الوظيفية، مما يمهد الطريق أمام تطبيقات واسعة في الطب، الصناعة، والتقنيات الحيوية.

[1]Zhang, and others (2019), P216.

[2]the same as the last one.

الفصل الرابع: دراسة وتحليل معطيات البحث

1-المقدمة:

يهدف هذا الفصل إلى تحليل المعطيات التطبيقية المرتبطة بتقنيتي الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد وذلك من خلال مراجعة أهم الدراسات المرجعية ذات العلاقة، وتحليل نتائج هذه الدراسات، واستخدامها في المقارنة المرجوة من البحث.

كما سيتم من خلال هذا التحليل اختيار النماذج التي سيقوم الباحث باختبارها بالاعتماد على التطبيقات الواعدة التي تم البحث فيها سابقاً.

2-الدراسات المرجعية:

2-1- دراسة (Kantaros 2023):^[1]

ذكر الباحث في بحث قد أجراه أن الطباعة ثلاثية الأبعاد لا تزال تعاني من بعض القيود، أبرزها أنها تُنتج هياكل ثابتة غير قابلة للتغير، ما يجعلها غير ملائمة للبيئات الديناميكية التي تتطلب استجابة متغيرة مع الوقت.

مقارنةً بطرق التصنيع التقليدية مثل الصب والتشغيل الآلي والحفر، تُعد هذه الطريقة أكثر كفاءة. تُعتبر الطباعة ثلاثية الأبعاد عملية موفرة للطاقة والمواد، حيث تستهلك ما يصل إلى 90% من الموارد وتوفر ما يصل إلى 50% من الطاقة

ولمعالجة هذه القيود، ظهرت تقنية الطباعة رباعية الأبعاد، التي تعتمد على استخدام مواد ذكية تستجيب للمؤثرات الخارجية مثل الحرارة والرطوبة والضوء. تتيح هذه التقنية للأجسام المطبوعة أن تغيّر شكلها أو وظيفتها تدريجيًا بعد الطباعة، وفق تصميم مبرمج مسبقًا. وهذا يفتح المجال لتطبيقات متقدمة، خاصة في المجالات التي تتطلب تكيفًا ذاتيًا أو وظائف متعددة في منتج واحد.

كما نظم الجدول (9) يقارن بين التقنيتين من حيث تقنيات الطباعة والمواد المستخدمة ضمن بحثه.

[1]Kantaros, and others (2023)

الشرح	الطباعة ثلاثية الأبعاد	الطباعة رباعية الأبعاد
قابلية تغيير الشكل بعد الطباعة	لا	نعم
نوع المواد المستخدمة	اللدائن الحرارية المعادن والسبائك المواد الحيوية والهلاميات المواد النانوية	مواد ذكية مثل سبائك الذاكرة الشكلية (SMAs) وبوليمرات الذاكرة الشكلية (SMPs)
نوع تقنية الطباعة المستخدمة	طابعات ثلاثية الأبعاد SLA و FDM و SLS	طابعات SLA وطابعات المواد المتعددة (FDM)

الجدول (9) مقارنة بين التقنيتين من حيث تقنيات الطباعة والمواد المستخدمة

وذكر بنتيجة بحثه أن تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد تتميز بمرونتها وكفاءتها العالية من حيث التصميم والتصنيع والتطبيقات. في المستقبل، قد تكتسب الطباعة رباعية الأبعاد أهمية بالغة نظرًا لقدرتها على إحداث تحولات جذرية في الصناعات المرتبطة بالتصنيع. تشمل بعض المقاييس الرئيسية التي يمكن قياسها في الطباعة رباعية الأبعاد معدل نجاح تغيير الشكل، ودقة المنتج المطبوع، وقوة ومتانة المنتج النهائي. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أيضًا مراعاة عوامل مثل تكلفة المواد والوقت المستغرق لطباعة المنتج. ومع ذلك، لا بد من تطوير هذه التقنية بشكل أكبر قبل أن تحل محل أساليب التصنيع التقليدية.

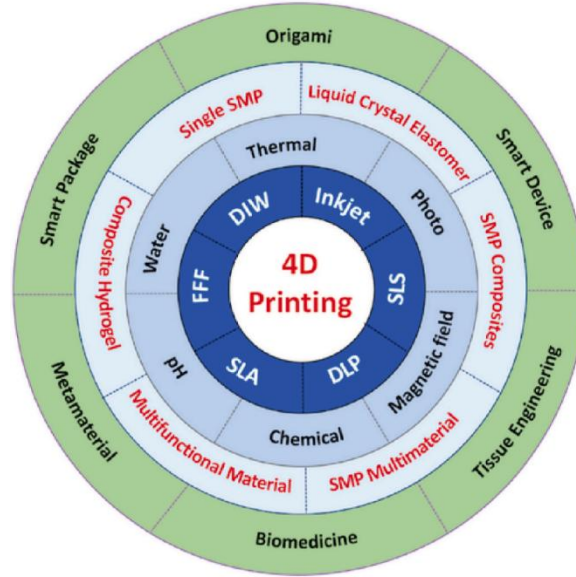
2-2- دراسة (Ahmed 2021):^[1]

ذكر الباحث في بحث قد أجراه أنه في الطباعة ثلاثية الأبعاد، وبفضل التطورات الحديثة، أصبحنا قادرين على وضع المواد بدقة ومرونة أكبر، مما ساهم بشكل كبير في الطباعة رباعية الأبعاد. تُسمى المواد المستخدمة في الطباعة رباعية الأبعاد عمومًا بالمواد الذكية نظرًا لقدرتها على تغيير خصائصها بمرور الوقت. تستجيب هذه المواد للمحفزات الخارجية، وتتمتع بخصائص مثل التجميع الذاتي، والشفاء الذاتي، وذاكرة الشكل، والقدرة الذاتية. لا تستخدم الطباعة رباعية الأبعاد موادًا قادرة على تغيير شكلها فحسب، بل تُحدث أيضًا تغييرًا في اللون عند تعرضها للأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي.

بعد ظهور تقنية الطباعة رباعية الأبعاد، نوقشت تطبيقاتها في مختلف مجالات البحث والتكنولوجيا. وقد قللت هذه التقنية بشكل كبير من الحجم المستخدم للتخزين في الهياكل المطبوعة، وفتحت أيضًا مجالات مختلفة للتحويل في الهياكل والأجهزة المطبوعة. يمكننا إنتاج الهياكل المعقدة مباشرةً من طباعة ثلاثية الأبعاد، أو يمكننا أولاً إنتاج هياكل ثلاثية الأبعاد بسيطة ثم تجميعها لإنتاج هيكل معقد شامل. لقد جعلت الطباعة رباعية الأبعاد عملية الطباعة ديناميكية، حيث يتمتع الباحثون بخيار اختيار طرق ومواد مختلفة وفقًا للمتطلبات. على النقيض من ذلك، كانت الطباعة ثلاثية الأبعاد ثابتة، حيث استُخدمت نفس المادة لتطبيقات مختلفة. ونظرًا لخصائصها الديناميكية، ركز الباحثون عملهم على الهياكل المطبوعة رباعية الأبعاد. عندما نتعمق في هذه الهياكل المطبوعة رباعية الأبعاد، نجد أن قدرتها على التجميع والإصلاح الذاتي تزيد أيضًا من إمكاناتها في تطبيقات مختلفة. على سبيل المثال، يمكن استخدامها لبناء أجهزة جراحية يمكنها اختراق الجسم ثم تجميع نفسها في الموقع المطلوب، إلخ. الخصائص الثلاث للهياكل المطبوعة بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد التي جعلت هذه الهياكل أكثر قابلية للتطبيق في تطبيقاتها هي: التجميع الذاتي، والقدرة على التكيف الذاتي، والإصلاح الذاتي.

ولقد لخص الباحث التقنيات المستخدمة في الطباعة رباعية الأبعاد، محفزاتها، موادها وتطبيقاتها بالمخطط الموضح بالشكل (47).

[1]Ahmed, and others (2021).



الشكل (47) التقنيات المستخدمة في الطباعة رباعية الأبعاد، مخفزاتها، موادها وتطبيقاتها

المصدر (Ahmed and others, 2021, p8)

وذكر بنتيجة بحثه أن الطباعة رباعية الأبعاد تُعدّ تطوراً في الطباعة ثلاثية الأبعاد الحالية من خلال تضمين عامل الوقت. يمكن للهياكل رباعية الأبعاد أن تتشوه بمرور الوقت اعتماداً على المحفزات التي تتعرض لها. يمكنها الاستجابة للحرارة، والماء، والضوء، والطاقة الكهربائية، والطاقة المغناطيسية، والإجهاد، والانفعال، والضغط، وما إلى ذلك، كما تستطيع هذه الهياكل أن تتجمع ذاتياً، وتُصلح نفسها، وتتوافق ذاتياً مع التغيرات.

تتضمن الطباعة رباعية الأبعاد استخدام تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد لطباعة مواد ذكية، مثل مادة واحدة، أو مواد متعددة، أو مواد غير نشطة. تجد الطباعة رباعية الأبعاد تطبيقاتها في العلوم الطبية، والروبوتات اللينة، والمنتجات ذاتية الشفاء، والأوريجامي النشط، وما إلى ذلك. للطباعة رباعية الأبعاد حدودها فيما يتعلق بتقنيات الطباعة، والمواد المستخدمة، وتقنيات تصميم الهياكل. ولكن هناك مجال واسع للطباعة رباعية الأبعاد في المستقبل، حيث يمكن اكتشاف المزيد من المواد الذكية إلى جانب تقنيات طباعة جديدة وأكثر كفاءة. يمكن تطوير الطباعة رباعية الأبعاد، التي تقتصر في الغالب على التغييرات الهيكلية، لتحقيق تطبيقات متعددة الوظائف. كما يمكن توسيع نطاق تطبيقات الطباعة رباعية الأبعاد في المستقبل ليشمل مجالات أخرى مختلفة. ونظراً لكونها مجالاً بحثياً متعدد التخصصات، ستمتع بميزة وجود تطبيقات في مجالات مختلفة، مثل الهندسة، وعلوم المواد، والعلوم الطبية، وعلوم النانو، وغيرها، في المستقبل أيضاً. ومن المؤكد أن الطباعة رباعية الأبعاد لن تقتصر على تغيير الشكل في المستقبل، بل ستتطور في تطبيقات أخرى مختلفة، وستقدم كمجال جديد لطباعة الهياكل الذكية المُتحكم بها.

2-3- دراسة (Honghui 2020):^[1]

قام الباحث بإجراء بحث ذكر فيه أن الهياكل الدقيقة المصنعة باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد ثابتة. وللتغلب على هذا التحدي، فإن الطباعة رباعية الأبعاد، والتي تُعرف بأنها تصنيع هيكل عفوي معقد يتغير بمرور الوقت، تستجيب بطريقة مقصودة للمحفزات الخارجية. نشأت الطباعة رباعية الأبعاد في الطباعة ثلاثية الأبعاد، ولكنها تجاوزت الطباعة ثلاثية الأبعاد. وعلى الرغم من أن الطباعة رباعية الأبعاد تعتمد بشكل أساسي على الطباعة ثلاثية الأبعاد وتصبح فرعاً من التصنيع الإضافي، إلا أن الأشياء المصنعة لم تعد ثابتة ويمكن تحويلها إلى هياكل معقدة عن طريق تغيير الحجم والشكل والخصائص والوظيفة تحت تأثير المحفزات الخارجية، مما يجعل الطباعة ثلاثية الأبعاد حية.

صنف الباحث خلال بحثه تقنيات التصنيع الإضافي المستخدمة في الطباعة رباعية الأبعاد إلى عدة فئات بناءً على طريقة ترسيب المواد أو الحبر: طرق تعتمد على البثق بما في ذلك نمذجة ترسيب الاندماج (FDM)، والكتابة المباشرة بالحبر (DIW)، والحبر النفث، بالإضافة إلى طرق البلمرة الضوئية في الحوض بما في ذلك الطباعة الضوئية المجسمة (SLA) والمعالجة الضوئية الرقمية (DLP).

بنتيجة البحث، نوه الباحث على واحدة من أهم التحديات التي تواجه الطباعة رباعية الأبعاد، حيث ذكر أنه ينبغي تطوير مواد ذكية جديدة لمزيد من التوسع في الطباعة رباعية الأبعاد. وعلى الرغم من أن أنواعاً مختلفة من المواد بما في ذلك بوليمرات ذاكرة الشكل والهلام المائي المستجيب للمحفز قد تم التحقيق فيها بنجاح للطباعة رباعية الأبعاد، إلا أن معدل الاستجابة البطيء وانخفاض الكفاءة يعيقان المزيد من التطوير. على سبيل المثال، قام باحثون بترسيب مواد الإيلاستومر المتدرجة المستجيبة للماء على بوليمر ذاكرة الشكل القابل للانكماش بالحرارة لتشكيل هياكل ذاتية التحول ذات محفزين. ومع ذلك، فإن الوقت الكامل للتشوه الكامل تحت المحفز هو ما يقرب من 20 دقيقة. صمم آخرون مستشعراً مشغلاً متكاملًا عالي الأداء مع استشعار الانفعال واستشعار درجة الحرارة ذاتيًا ويبلغ متوسط وقت استجابة المواد حوالي 20 ثانية. من ناحية أخرى، فإن معظم المواد الموجودة تستجيب لمحفز واحد فقط ولن تعمل في حالة فشل المعدات المنتجة للمحفز. لذلك، هناك حاجة إلى تطوير مواد تستجيب لمحفزات متعددة. نعتقد أن الجمع المستقبلي بين أنواع مختلفة من المواد المستجيبة سيحدث نقلة نوعية في مجال الطباعة رباعية الأبعاد. إضافةً إلى ذلك، يُعدّ التوافق الحيوي الجيد والخصائص الميكانيكية المناسبة من المتطلبات الأساسية للمواد المثالية في الطباعة الحيوية رباعية الأبعاد. حتى الآن، تتميز معظم المواد الحيوية المستخدمة حاليًا بتوافق حيوي جيد، ولكن لم تُختبر الخاصية الميكانيكية بعد.

[1]Honghui, and others (2020).

قام الباحث بالتعاون مع باحثين آخرين بإجراء دراسة في مجال الطباعة رباعية الأبعاد وذكر فيها أن الطباعة رباعية الأبعاد للبوليمرات ذات أهمية خاصة في الطب نظرًا لقدرتها على إنشاء أجهزة طبية ديناميكية وسريعة الاستجابة وشخصية. غالبًا ما تكون البوليمرات، مثل الهلاميات المائية والمواد القابلة للتحلل الحيوي، متوافقة حيويًا، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في الغرسات، وهياكل هندسة الأنسجة، وأنظمة توصيل الأدوية دون التسبب في تفاعلات نسيجية ضارة. علاوة على ذلك، يمكن تصميم البوليمرات المطبوعة رباعية الأبعاد لتغيير شكلها أو خصائصها استجابةً لدرجة الحرارة، أو الرقم الهيدروجيني، أو الرطوبة، على سبيل المثال لا الحصر. يمكن الاستفادة من هذه القدرة على الخضوع للتغيرات الفيزيائية والميكانيكية بمرور الوقت لإنشاء أجهزة طبية مثل الدعامات ذاتية التمدد أو الخيوط الجراحية التي تتذكر شكلها. بالإضافة إلى ذلك، تُمكن الطباعة رباعية الأبعاد من إنتاج غرسات وأطراف صناعية وأجهزة تقويمية مخصصة توفر ملائمة أفضل ووظائف مُحسّنة مقارنةً بالحلول التقليدية الشاملة. كما أن التصميم المدمج والقابل للنشر للأجهزة المطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد يسهل أيضًا الإجراءات الجراحية الأقل تدخلًا.

على سبيل المثال، يمكن إدخال جهاز مطبوع بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد عبر شق صغير، ثم توسيعه أو تغيير شكله في موقعه، مما يقلل الحاجة إلى جراحات مفتوحة واسعة، ويسرع تعافي المريض. ومن خلال إنتاج أجهزة طبية مخصصة وقابلة للتكيف، يمكن للطباعة رباعية الأبعاد للبوليمرات أن تساعد في تقليل الحاجة إلى جراحات متعددة واستبدال الأجهزة، مما يؤدي إلى خفض تكاليف الرعاية الصحية وتحسين نتائج المرضى. علاوة على ذلك، يمكن للطباعة رباعية الأبعاد للبوليمرات إنشاء أنظمة ذكية لتوصيل الأدوية، تُطلق الأدوية بطريقة مُتحكم بها ومُستهدفة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للهياكل المطبوعة رباعية الأبعاد توجيه نمو الخلايا وتمايزها، مما يُعزز تجديد الأنسجة وإصلاحها.

تتأثر الخصائص الميكانيكية للأجزاء المطبوعة بتقنية FDM بمعلمات الطباعة والخصائص الجوهرية للمواد المستخدمة. على سبيل المثال، يمكن أن يؤدي إضافة النحاس إلى خيوط PLA إلى زيادة قوة الشد والصلابة بشكل كبير، مما يجعل هذه المركبات مناسبة للتطبيقات عالية الأداء. ومع ذلك، لا تزال هناك تحديات مثل ضعف التصاق الطبقات الداخلية، وخشونة السطح، والإجهادات الحرارية. وقد أظهرت الأبحاث المتعلقة باختلافات سماكة الطبقة أن السماكات المنخفضة تُحسّن عمومًا خصائص التأثير، ولكن يجب مراعاة التنازلات

[1]Cabrera, and others (2024).

في وقت الطباعة واستخدام المواد. علاوة على ذلك، لا يزال تحقيق ثبات الخصائص الميكانيكية عبر مختلف الأشكال الهندسية وظروف الطباعة مهمة معقدة، مما يتطلب نماذج عددية قوية للتنبؤ بالنتائج وتحسينها.

كما ذكر الباحث أن تطوير مجال الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد يعتمد على عدة مجالات محورية للبحث والتطوير. ومن أبرز هذه المجالات ابتكار مواد ذكية من الجيل التالي تتميز باستجابة وعمر افتراضي أطول.

يجب أن تتحمل هذه المواد مختلف الظروف البيئية مع الحفاظ على سلامتها الوظيفية لفترات طويلة. ومن المتوقع أن تسهم الابتكارات في كيمياء البوليمرات والمواد المركبة في دفع هذا التقدم، مقدمة حلولاً تلبي المتطلبات الصارمة لمختلف التطبيقات، لا سيما في قطاع الطب الحيوي.

ولقد قدم الباحث ملخص المواد المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد ورباعية الأبعاد في الجدول التالي.

المادة	الخواص	التطبيقات	الإيجابيات	السلبيات
البوليمرات	متعددة الاستخدامات، قابلة للمعالجة، ويمكن تصميمها وفقاً لخصائصها الميكانيكية والكيميائية والبيولوجية.	الأجهزة الطبية الحيوية، والإلكترونيات المرنة، والمواد الذكية.	قابلة للتخصيص، وفعالة من حيث التكلفة، ومناسبة لمجموعة واسعة من التطبيقات.	قد تكون قابليتها للتحلل البيولوجي محدودة، حيث تتطلب بعض البوليمرات درجات حرارة معالجة عالية.
الهلاميات المائية	عالية الامتصاص، متوافقة حيويًا، تستجيب للمحفزات البيئية (مثل درجة الحموضة، درجة الحرارة).	هندسة الأنسجة، توصيل الأدوية، الغرسات قليلة التوغل.	متوافقة حيويًا، يمكن تصميمها لاستجابات محددة، مناسبة لتطبيقات طبية متنوعة.	قد تتدهور بمرور الوقت، ويمكن أن تكون خصائصها الميكانيكية محدودة، وحساسة للبيئة.
المواد المركبة	خصائص ميكانيكية ووظيفية مُحسَّنة، غالبًا ما تتضمن أليافًا أو مواد أخرى.	هياكل عظمية، وأنظمة توصيل الأدوية ومكونات عالية الأداء.	خصائص ميكانيكية مُحسَّنة، ومتعددة الوظائف، مناسبة للتطبيقات الصعبة.	عمليات تصنيع معقدة، ومشاكل محتملة في توافق المواد.

بوليمرات ذاكرة الشكل (SMPs)	القدرة على العودة إلى شكل محدد مسبقاً عند التعرض لمحفزات (مثل الحرارة والضوء والمجالات المغناطيسية)	هياكل ديناميكية وسريعة الاستجابة، وأجهزة طبية مخصصة	تحولات قابلة للبرمجة، متوافقة حيويًا، يمكنها إنشاء أشكال معقدة.	التباين المحتمل في الاستجابة، والاستقرار طويل الأمد في ظل دورات متكررة، غير مؤكد.
الأحبار الحيوية	مزيج من الخلايا والمواد الحيوية، دقة عالية في وضع الخلايا، تدعم قابلية الخلايا للبقاء على قيد الحياة الطب التجديدي	توصيل الأدوية الشخصية، هياكل تشبه الأنسجة دعم نمو الخلايا،	دقة عالية، يمكن أن تخلق هياكل معقدة ووظيفية حساسة لظروف المعالجة.	احتمال حدوث مشكلات في قابلية الخلايا للبقاء على قيد الحياة أثناء الطباعة

الجدول (10) المواد المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد ورباعية الأبعاد

3- تحليل البيانات المتوفرة:

3-1- تحليل الدراسات المرجعية:

اتفق جميع الباحثين في الدراسات المرجعية والدراسات التي تم الاعتماد عليها في الأساس النظري على أن تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد تعمل على إنشاء أجسام مادية عن طريق الإضافة التراكمية للمواد الأولية، وتعد هذه التقنية من التقنيات سريعة الانتشار عالمياً، حيث أنها تستخدم على مجال واسع في صناعة في العديد من الصناعات مثل صناعة السيارات، القاطرات والطيران كما أنها تستخدم في المجالات الطبية والزراعية وغيرها من المجالات.

إلا أن هذه التقنية يتم باستخدامها الحصول على منتجات ذات شكل ثابت، مما فتح آفاق الباحثين لاستكشاف واستخدام مواد ذكية قادرة على التكيف وتتأثر بالظروف المحيطة ومن هنا تمت ولادة مفهوم الطباعة رباعية الأبعاد حيث أن البعد الرابع هو الزمن الذي يستغرقه المنتج المطبوع بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد (مطبوع باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام مواد ذكية) لتغيير شكله بتأثير محفز معين متناسب مع خواص المادة التي صنع منها النموذج.

3-2- بديهيات متعلقة بالإجراء التجريبي:

3-2-1-بديهيات: إن المواد المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد تحديداً تقنية بثق المواد تكون على شكل خيوط بلاستيكية ذات مقطع دائري بقطر 1.75 ملم، حيث يتم صهر هذا الخيط وتشكيله بشكل صحيح لبناء الشكل المطلوب.

إن المواد الذكية المستخدمة في الطباعة رباعية الأبعاد تحديدا تقنية بثق المواد تكون على شكل خيوط بلاستيكية ذات مقطع دائري بقطر 1.75 ملم، حيث يتم صهر هذا الخيط وتشكيله بشكل صحيح لبناء الشكل المطلوب الذي يتميز بأنه قادر على تغيير شكله بتأثير المحرض المناسب. يبين الجدول (11) ملخص أوجه التشابه والاختلاف بين التقنيتين.

طباعة رباعية الأبعاد	طباعة ثلاثية الأبعاد	
نوع الطباعة	طباعة ثلاثية الأبعاد FDM	طباعة ثلاثية الأبعاد FDM
نوع المواد	بوليميرات	مواد ذكية
شكل المواد	سلك ذو مقطع دائري بقطر 1.75mm	سلك ذو مقطع دائري بقطر 1.75mm
المنتج النهائي	ثابت	قادر على التغير
زمن التصنيع	قيد الدراسة	قيد الدراسة
استهلاك المواد	قيد الدراسة	قيد الدراسة
الكلفة	منخفضة نسبيا	مرتفعة نسبيا (6 أضعاف)

الجدول (11) ملخص أوجه التشابه والاختلاف بين التقنيتين

3-2-2- بارامترات الطباعة التي تؤثر على استهلاك المواد وسرعة الطباعة:

يتعلق مقدار استهلاك المواد بعدة عوامل مثل حجم النموذج، التعبئة المطلوبة للجسم، عدد الجدران، عدد الطبقات اللازم للسطحين العلوي والسفلي للنموذج، شكل التصميم الافتراضي للنموذج، طريقة توضع النموذج وكمية الدعامات اللازمة لإتمام عملية الطباعة وخيارات أخرى إضافية.

يتعلق زمن تصنيع النموذج بعدة عوامل مثل سرعة الطباعة، دقة الطباعة على كل من المحور العمودي والمستوي الأفقي، حجم النموذج، التعبئة المطلوبة للجسم، عدد الجدران، عدد الطبقات اللازم للسطحين العلوي والسفلي

للمنموذج، شكل التصميم الافتراضي للمنموذج، طريقة توضع النموذج وكمية الدعامات اللازمة لإتمام عملية الطباعة وخيارات أخرى إضافية. يبين الجدول (11) ملخص البارامترات المؤثرة على زمن استهلاك المواد وزمن التصنيع.

3-2-2-1 - حجم النموذج:

- التأثير على استهلاك المواد: يؤثر حجم النموذج بشكل مباشر على كمية المواد المستهلكة. كلما زاد حجم النموذج، زادت كمية المادة المطلوبة لطباعته. العلاقة بين الحجم واستهلاك المواد تكون عادة علاقة طردية، حيث أن استهلاك المواد يتناسب مع الحجم الكلي للنموذج.
- التأثير على زمن التصنيع: يزداد زمن التصنيع بشكل طردي مع زيادة حجم النموذج، حيث يتطلب طباعة المزيد من الطبقات والمسارات. النماذج الكبيرة تستغرق وقتاً أطول بكثير من النماذج الصغيرة، حتى مع ثبات باقي البارامترات.

3-2-2-2 - تعبئة النموذج:

- التأثير على استهلاك المواد: تشير تعبئة النموذج (Infill Density) إلى النسبة المئوية للمادة المستخدمة لملء الأجزاء الداخلية للنموذج. كلما زادت نسبة التعبئة، زاد استهلاك المواد بشكل كبير. على سبيل المثال، زيادة نسبة التعبئة من 20% إلى 50% يمكن أن تزيد استهلاك المواد بنسبة تصل إلى 30-40%.
- التأثير على زمن التصنيع: تؤثر نسبة التعبئة بشكل مباشر على زمن التصنيع. كلما زادت نسبة التعبئة، زاد الوقت اللازم لطباعة النموذج، حيث يتطلب ذلك طباعة المزيد من المسارات الداخلية. زيادة نسبة التعبئة من 20% إلى 100% يمكن أن تضاعف زمن الطباعة.

3-2-2-3 - سماكة الجدران:

- التأثير على استهلاك المواد: يشير عدد الجدران (Wall Count) إلى عدد طبقات المحيط الخارجي للنموذج. زيادة عدد الجدران تؤدي إلى زيادة استهلاك المواد، خاصة في النماذج ذات المساحة السطحية الكبيرة. كل جدار إضافي يمكن أن يزيد استهلاك المواد بنسبة 5-15% حسب تعقيد النموذج.
- التأثير على زمن التصنيع: زيادة عدد الجدران تزيد من زمن التصنيع، حيث يتطلب طباعة مسارات إضافية حول محيط النموذج. كل جدار إضافي يمكن أن يزيد زمن الطباعة بنسبة 3-10% حسب تعقيد النموذج.

3-2-2-4 - سماكة السطحين العلوي والسفلي:

- التأثير على استهلاك المواد: زيادة عدد طبقات السطحين العلوي والسفلي (Top/Bottom Layers) تؤدي إلى زيادة استهلاك المواد، خاصة في النماذج ذات المساحة السطحية الكبيرة. هذه الطبقات عادة ما تكون مصممة بنسبة 100%، مما يعني استهلاك أكبر للمواد مقارنة بالتعبئة الداخلية.
- التأثير على زمن التصنيع: زيادة عدد هذه الطبقات تزيد من زمن التصنيع، حيث تتطلب طباعة طبقات مصممة بالكامل. كل طبقة إضافية يمكن أن تزيد زمن الطباعة بنسبة 2-5% حسب مساحة النموذج.

3-2-2-5 - شكل التصميم:

- التأثير على استهلاك المواد: يؤثر تعقيد شكل التصميم على استهلاك المواد، خاصة فيما يتعلق بالحاجة إلى هياكل الدعم. التصاميم المعقدة ذات الأجزاء المعلقة تتطلب المزيد من هياكل الدعم، مما يزيد من استهلاك المواد بنسبة قد تصل إلى 30-50%.
- التأثير على زمن التصنيع: التصاميم المعقدة تستغرق وقتاً أطول للطباعة بسبب الحاجة إلى تغيير اتجاه الطباعة بشكل متكرر، وطباعة تفاصيل دقيقة، وإضافة هياكل دعم. يمكن أن يزيد التعقيد زمن الطباعة بنسبة 20-100% مقارنة بالتصاميم البسيطة ذات الحجم المماثل.

3-2-2-6 - طريقة توضع النموذج:

- التأثير على استهلاك المواد: توجيه النموذج (Model Orientation) على منصة الطباعة يؤثر بشكل كبير على كمية هياكل الدعم المطلوبة. التوجيه الأمثل يمكن أن يقلل من استهلاك المواد بنسبة تصل إلى 40% من خلال تقليل الحاجة إلى هياكل الدعم.
- التأثير على زمن التصنيع: التوجيه يؤثر على زمن التصنيع من خلال تحديد عدد الطبقات وكمية هياكل الدعم. توجيه النموذج بحيث يكون ارتفاعه أقل يقلل من عدد الطبقات وبالتالي يقلل من زمن الطباعة، لكنه قد يزيد من الحاجة إلى هياكل الدعم.

3-2-2-7 - الدعامات:

- التأثير على استهلاك المواد: هياكل الدعم (Supports) تمثل جزءاً كبيراً من هدر المواد في الطباعة ثلاثية الأبعاد، حيث يتم التخلص منها بعد الانتهاء من الطباعة. يمكن أن تشكل هذه الهياكل 20-50% من إجمالي المواد المستخدمة حسب تعقيد النموذج وتوجيهه.

- التأثير على زمن التصنيع: طباعة هياكل الدعم تزيد من زمن التصنيع بشكل كبير، حيث تتطلب طباعة أجزاء إضافية لا تشكل جزءاً من النموذج النهائي. يمكن أن تزيد هياكل الدعم زمن الطباعة بنسبة 15-40%.

3-2-2-8 - سرعة الطباعة:

- التأثير على استهلاك المواد: سرعة الطباعة (Print Speed) لها تأثير غير مباشر على استهلاك المواد. السرعات العالية جداً قد تؤدي إلى عيوب في الطباعة تتطلب إعادة الطباعة، مما يزيد من استهلاك المواد. السرعات المنخفضة جداً قد تؤدي إلى زيادة تدفق المادة في بعض الحالات.
- التأثير على زمن التصنيع: تؤثر سرعة الطباعة بشكل مباشر وعكسي على زمن التصنيع. مضاعفة سرعة الطباعة يمكن أن تقلل زمن التصنيع بنسبة تقارب 50%، لكن مع مراعاة أن السرعات العالية جداً قد تؤثر سلباً على جودة الطباعة.

3-2-2-9 - الدقة على المحور العمودي:

- التأثير على استهلاك المواد: الدقة على المحور العمودي (Layer Height) تؤثر على استهلاك المواد بشكل طفيف. الطبقات الرقيقة جداً قد تؤدي إلى زيادة طفيفة في استهلاك المواد بسبب التداخل بين الطبقات.
- التأثير على زمن التصنيع: تؤثر الدقة العمودية بشكل كبير على زمن التصنيع. تقليل ارتفاع الطبقة إلى النصف يضاعف عدد الطبقات المطلوبة، مما يضاعف تقريباً زمن الطباعة. على سبيل المثال، تغيير ارتفاع الطبقة من 0.2 مم إلى 0.1 مم يمكن أن يزيد زمن الطباعة بنسبة 80-100%.

3-2-2-10 - الدقة في المستوى الأفقي:

- التأثير على استهلاك المواد: الدقة في المستوى الأفقي (XY Resolution) تؤثر على استهلاك المواد من خلال تحديد دقة تفاصيل النموذج. الدقة العالية تعني مسارات طباعة أكثر دقة، مما قد يقلل من استهلاك المواد في بعض الحالات بنسبة 2-5%.
- التأثير على زمن التصنيع: زيادة الدقة الأفقية تزيد من زمن التصنيع بسبب الحاجة إلى طباعة مسارات أكثر تفصيلاً. يمكن أن تزيد الدقة العالية جداً زمن الطباعة بنسبة 10-30%.

3-2-2-11- نوع المادة:

- التأثير على استهلاك المواد: تختلف المواد المختلفة (Material Type) في كثافتها وخصائصها الفيزيائية، مما يؤثر على كمية المادة المطلوبة لطباعة نموذج معين. على سبيل المثال، المواد ذات الكثافة العالية مثل المعادن تتطلب كمية أكبر من المادة (بالوزن) مقارنة بالبوليمرات لنفس الحجم.
- التأثير على زمن التصنيع: تتطلب المواد المختلفة درجات حرارة وسرعات طباعة مختلفة. المواد ذات درجة الانصهار العالية مثل بعض المعادن والبوليمرات عالية الأداء تتطلب وقتاً أطول للتسخين والتبريد، مما يزيد من زمن التصنيع بنسبة 10-50% مقارنة بالمواد سهلة الطباعة مثل PLA.

3-2-2-12- قطر الفوهة:

- التأثير على استهلاك المواد: قطر الفوهة (Nozzle Diameter) يؤثر على دقة الطباعة وكمية المادة المستخدمة. الفوهات ذات القطر الأكبر تؤدي إلى خطوط طباعة أعرض، مما قد يزيد من استهلاك المواد بنسبة 5-15% خاصة في النماذج ذات التفاصيل الدقيقة.
- التأثير على زمن التصنيع: الفوهات ذات القطر الأكبر تسمح بتدفق أكبر للمادة، مما يقلل من زمن التصنيع. زيادة قطر الفوهة من 0.4 مم إلى 0.8 مم يمكن أن تقلل زمن الطباعة بنسبة 40-60%، لكن على حساب الدقة والتفاصيل.

3-3- التطبيقات الرائدة لتقنية الطباعة رباعية الأبعاد:

تنوعت المواد الذكية كما تنوعت طرق وتقنيات الطباعة المستخدمة في تقنية الطباعة رباعية الأبعاد وتوجه الباحثون لتطوير التقنية بما يتناسب مع التطبيقات المرجوة من هذه التقنية، تنوعت التطبيقات في عدة مجالات مثل المجال الطبي، مجال الروبوتات اللينة والدقيقة والكثير من المجالات الواعدة.

- من التطبيقات المهمة في الطباعة رباعية الأبعاد الهياكل ذاتية الطي حيث تمكن الباحثون من تحريض الهياكل المطبوعة باستخدام مادتين مختلفتين إحداها بوليميرات عادية تستخدم لطباعة السطوح والأخرى مواد ذكية (SMPs) تستخدم لطباعة مفاصل الإغلاق ليقوم بعدها بتعريض الهيكل للمحفز المناسب لتتم عملية الإغلاق، لاحظ الباحث أن عملية الإغلاق لم تتم بشكل كامل في الدراسات السابقة، مما دفعه لمحاولة الحصول على نماذج مغلقة عن طريق استخدام تصميم ذكي للصندوق.

- من التطبيقات الواعدة أيضا في هذا المجال طباعة نماذج الأوريغامي، حيث قام الباحثون في الدراسات السابقة بطباعة نماذج أوريغامي باستخدام مادتين، إحداهما مادة بوليميرية للسطوح الثابتة والأخرى مادة ذكية تستخدم لطباعة المفاصل والحواف.

4- مجريات البحث:

4-1- نطاق البحث التجريبي:

انطلاقا من مشكلة البحث، تقرر البحث فيما يلي:

- 4-1-1- إمكانية الحصول على هيكل مكعب الشكل عن طريق طباعة صفيحة من المادة الذكية مصممة بشكل ذكي بحيث يمكن طي نقاط الضعف الموزعة على الصفيحة للحصول على مكعب مغلق بعد تعريض النموذج للمحفز المناسب، كما سيتم العمل على إيجاد آلية إغلاق مناسبة لكي يستطيع الحصول على هياكل مغلقة من صفائح مصنوعة من مواد ذكية باستخدام تصميم ذكي.
- 4-1-2- إمكانية الحصول على نموذج أوريغامي على شكل طائرة ورقية عن طريق طباعة صفيحة من المادة الذكية مصممة بشكل ذكي بحيث يمكن طي نقاط الضعف الموزعة على الصفيحة للحصول على أوريغامي طائرة ورقية بعد تعريض النموذج للتحريض المناسب.
- 4-1-3- إمكانية الحصول على النماذج باستخدام مادتين إحداهما مادة ثلاثية الأبعاد والأخرى مادة ذكية بحيث تستخدم المادة الذكية فقط في الطبقات التي يتم فيها تشكيل المفاصل، وذلك بغاية تقليل كمية المواد الذكية وبالتالي تقليل تكاليف النموذج.
- 4-1-4- طباعة كلا من النماذج باستخدام تقنيتي الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد باستخدام مادة واحدة ومادتين وقياس الزمن الافتراضي والفعلي وكذلك استهلاك المواد الافتراضي والفعلي وإجراء المقارنة المرجوة من البحث.
- 4-1-5- يستخدم لهذه التطبيقات طابعات ثلاثية الأبعاد تقوم بطباعة مادتين إحداهما مادة بوليميرية والأخرى مادة ذكية، بينما سيتم العمل باستخدام طابعة ذات رأس طباعة وحيد وسيتم طباعة كامل النموذج باستخدام مادة ذكية بحالة الطباعة بمادة واحدة تتعرض بمحفز حراري، والاعتماد على التصميم الذكي في عملية طي الحواف. وفي الحالة الثانية متعددة المواد سيتم تبديل المواد يدويا واستبدال المادة ثلاثية الأبعاد بمادة ذكية في الطبقات التي تشكل المفاصل.

4-2- مجريات البحث:

للحصول على نتائج المقارنة المراد إجرائها في البحث سيتم إجراء التالي:

- 4-2-1- اختيار نموذجين A هيكل مكعب الشكل، و B أوريغامي طائرة ورقية للعمل عليهما في الإجراء التجريبي.
- 4-2-2- طباعة النموذج A باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، وتوثيق زمن التصنيع واستهلاك المواد.
- 4-2-3- طباعة النموذج A باستخدام تقنية الطباعة رباعية الأبعاد بمادة واحدة، وتوثيق زمن التصنيع واستهلاك المواد.
- 4-2-4- طباعة النموذج A باستخدام تقنية الطباعة رباعية الأبعاد بمادتين، وتوثيق زمن التصنيع واستهلاك المواد.
- 4-2-5- طباعة النموذج B باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، وتوثيق زمن التصنيع واستهلاك المواد.
- 4-2-6- طباعة النموذج B باستخدام تقنية الطباعة رباعية الأبعاد بمادة واحدة، وتوثيق زمن التصنيع واستهلاك المواد.
- 4-2-7- طباعة النموذج B باستخدام تقنية الطباعة رباعية الأبعاد بمادتين، وتوثيق زمن التصنيع واستهلاك المواد.
- 4-2-8- تجميع وتحليل البيانات والخلوص إلى النتيجة المرجوة من البحث.

الفصل الخامس: الإجراء التجريبي للبحث

سيتم خلال هذا البحث إجراء المقارنة بين تقنيتي الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد على نموذجين (A,B)، ودراسة الحالة من حيث استهلاك المواد وزمن التصنيع.

1-منهجية التجربة وضبط البارامترات:

بعد دراسة البارامترات المؤثرة على استهلاك المواد وزمن التصنيع في الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد، تم تصميم التجربة العملية وفق المنهجية التالية:

1-1- البارامترات الثابتة:

تم تثبيت البارامترات التالية خلال جميع التجارب لضمان دقة المقارنة بين التقنيتين:

1-1-1- حجم النموذج:

- بالنسبة للنموذج (3DA)، مكعب بأبعاد 30*30*30mm.
- بالنسبة للنموذج (4DA1, 4DA2)، هو عبارة عن انفراد للنموذج 3DA.
- بالنسبة للنموذج (3DB)، طائرة ورقية بأبعاد 73*40*150mm.
- بالنسبة للنموذج (4DB1, 4DB2)، هو عبارة عن انفراد للنموذج 3DB.

1-1-2- سماكة الجدران، وسماكة طبقات السطح السفلي والعلوي:

تم توحيدها لمراعاة خصوصية عملية طباعة الصفائح لأن النماذج المطبوعة بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد تملك سطوحها نفس السماكات.

- بالنسبة للنموذج (3DA)، السماكة 3mm.
- بالنسبة للنموذج (4DA1, 4DA2)، السماكة 3mm.
- بالنسبة للنموذج (3DB)، السماكة 1.5mm.
- بالنسبة للنموذج (4DB1, 4DB2)، السماكة 1.5mm.

1-1-3- سرعة الطباعة: تم ضبط سرعة الطباعة على 60mm/s لجميع النماذج، وهي السرعة الموصى بها

من قبل الشركة المصنعة للطابعة والمواد المستخدمة.

1-1-4 - قطر الفوهة: تم استخدام فوهة بقطر 0.4mm لجميع التجارب، وذلك لتحقيق توازن مناسب بين الدقة وزمن التصنيع.

1-1-5 - درجة حرارة الطباعة: تم ضبط درجة حرارة الطباعة على 220 درجة مئوية لتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد ولتقنية الطباعة رباعية الأبعاد، وفقاً لمواصفات المواد المستخدمة.

1-2 - البارامترات المتغيرة:

1-2-1 - تعبئة الجسم:

- بالنسبة للنموذج (3DA)، تمت تعبئة النموذج بنسبة 5% وذلك الحد الأدنى لبناء الشكل بنجاح دون تداعي السطح العلوي.
- بالنسبة للنموذج (4DA1, 4DA2)، تمت تعبئة النموذج 100% مراعاة لخصوصية الطباعة رباعية الأبعاد.
- بالنسبة للنموذج (3DB)، تمت تعبئة النموذج 100% بسبب خصوصية تصميم النموذج.
- بالنسبة للنموذج (4DB1, 4DB2)، تمت تعبئة النموذج 100% مراعاة لخصوصية الطباعة رباعية الأبعاد.

1-2-2 - توضع النموذج:

- بالنسبة للنموذج (4DA1, 4DA2)، في هذا النموذج يمكن ان يتوضع المكعب على أي من سطوحه، وذلك لن يؤثر على البارامترات المدروسة.
- بالنسبة للنموذج (4DA1, 4DA2)، يتوضع النموذج بشكل أفقي على قاعدة الطباعة.
- بالنسبة للنموذج (3DB)، تم وضع النموذج بشكل عمودي على الجزء السفلي للطائرة حيث أن هذه الوضعية تأخذ أقل القيم للبارامترات المدروسة.
- بالنسبة للنموذج (4DB1, 4DB2)، يتوضع النموذج بشكل أفقي على قاعدة الطباعة.

1-2-3 - الدعامات:

- بالنسبة للنموذج (3DA)، لا يحتاج النموذج لأية دعامات.
- بالنسبة للنموذج (4DA1, 4DA2)، لا تحتاج الصفائح لأية دعامات.
- بالنسبة للنموذج (3DB)، تم وضع الحد الأدنى من الدعامات، بما يخدم عملية البناء.
- بالنسبة للنموذج (4DB1, 4DB2)، لا تحتاج الصفائح لأية دعامات.

1-2-4- الدقة على المحور العمودي:

- بالنسبة للنموذج (3DA)، تتمثل الدقة بسماكة الطبقة وهي 0.2mm.
- بالنسبة للنموذج (4DA1, 4DA2)، تتمثل الدقة بسماكة الطبقة وهي 0.3mm.
- بالنسبة للنموذج (3DB)، تتمثل الدقة بسماكة الطبقة وهي 0.2mm.
- بالنسبة للنموذج (4DB1, 4DB2)، تتمثل الدقة بسماكة الطبقة وهي 0.3mm.

1-2-5- نوع المادة: تم استخدام PLA+ لجميع النماذج المطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، ومادة ذكية

حساسة للحرارة THERMO SMPs لجميع النماذج المطبوعة بتقنية الطباعة رباعية الأبعاد.

1-3- تقنية تبديل المواد يدويا:

غالبا ما يستخدم الباحثون في مجال الطباعة رباعية الأبعاد طابعات متعددة المواد حيث يتم اختيار أماكن توضع المادة الذكية في النموذج بما يتناسب مع خصوصية التصميم، حيث أننا لا نحتاج لأن يكون الجسم مطبوعا بشكل كامل باستخدام مواد ذكية بل نحتاج لطباعة المفاصل وأماكن الطي فقط باستخدامها.

بسبب عدم توفر طابعة متعددة المواد تم ابتكار طريقة بديلة لتحقيق أهداف البحث، تمثلت هذه الطريقة بتبديل المواد يدويا أثناء عملية الطباعة بحيث يتم استخدام المادة الذكية فقط في الطبقات التي يتم من خلالها بناء المفاصل وحواف الطي.

تساعد هذه العملية في تقليل استهلاك المواد الذكية مما يساعد في تحسين الجدوى الاقتصادية للنموذج وذلك لأن سعر المواد الذكية مرتفع نسبيا بالمقارنة مع المواد ثلاثية الأبعاد، كما يتم من خلال هذه الطريقة الحفاظ على شكل السطوح الثابتة المطوية التي لا ينبغي لها أن تتأثر بالحرارة المطبقة على النموذج.

تتم عملية التبديل بعد دراسة تقطيع البرنامج التشغيلي للنموذج المدروس ومراقبة الطبقة التي يبدأ عندها بناء المفاصل ليتم عندها تبديل المواد ثلاثية الأبعاد بمواد ذكية، وحين الانتهاء من طباعة المفاصل يتم تبديل المادة الذكية بمادة ثلاثية الأبعاد مجددا.

تم تقدير زمن عملية التبديل بما يقارب أربع دقائق.

يلخص الجدول (12) التالي علاقة البارامترات الأساسية لعملية الطباعة بكل من استهلاك المواد وزمن التصنيع.

البارامتر	استهلاك المواد	زمن التصنيع	الارتباط
حجم النموذج	نعم	نعم	ثابت
تعبئة الجسم	نعم	نعم	متغير
عدد الجدران	نعم	نعم	ثابت
عدد طبقات السطح السفلي والعلوي	نعم	نعم	ثابت
شكل التصميم	نعم	نعم	ثابت
توضع النموذج	نعم	نعم	متغير
الدعامات	نعم	نعم	متغير
السرعة	لا	نعم	ثابت
الدقة على المحور العمودي	لا	نعم	متغير
الدقة في المستوى الأفقي	لا	نعم	ثابت
قطر الفوهة	لا	نعم	ثابت
نوع المادة	لا	نعم	متغير

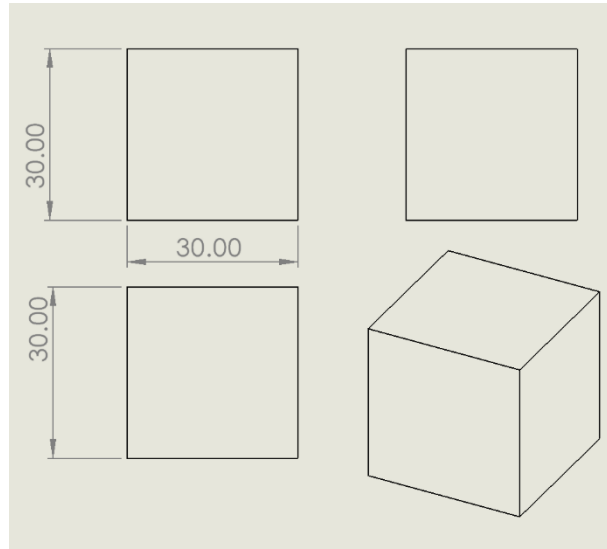
الجدول (12) علاقة البارامترات الأساسية لعملية الطباعة بكل من استهلاك المواد وزمن التصنيع.

2- اختبار النموذج (A):

2-1- طباعة النموذج (3DA) المكعب باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد:

2-1-1- إنشاء التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DA):

تم استخدام برنامج (SOLIDWORKS)



الشكل (48) التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DA) باستخدام برنامج (SOLIDWORKS)

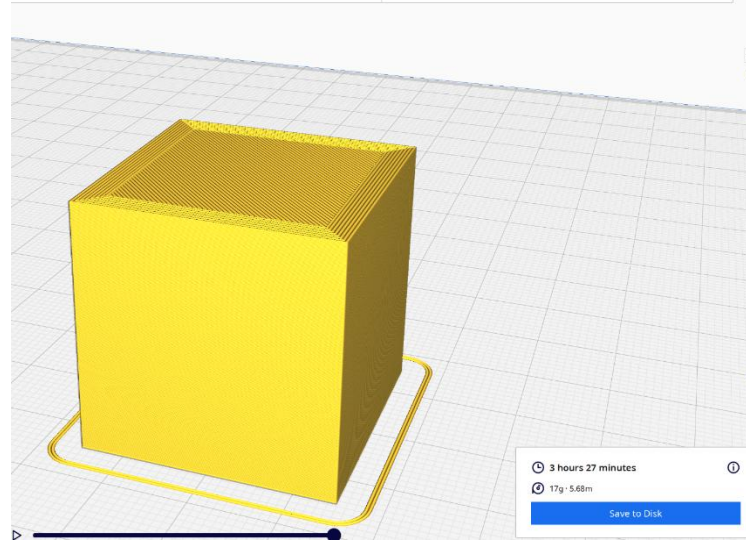
كما يبين الشكل (48)، النموذج (3DA) هو عبارة عن مكعب أبعاده $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}$.

2-1-2- تحضير التصميم الافتراضي (3DA) للطباعة:

بعد تحويل صيغة الملف الافتراضي لصيغة STL، تم إدخاله إلى البرنامج التشغيلي للطباعة ثلاثية الأبعاد (ULTIMAKER CURA)، وتم تحديد بارامترات الطباعة.

قدر البرنامج التشغيلي قيمة افتراضية:

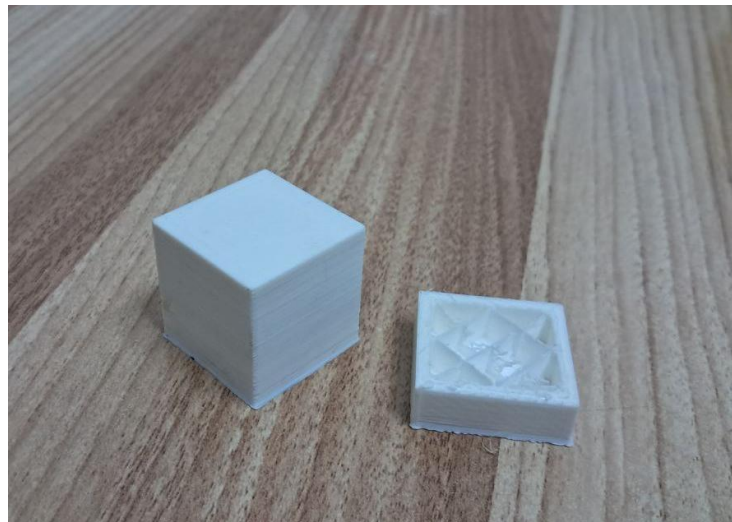
- زمن التصنيع: 03:27 h
- وزن المواد المستهلكة: 17 g



الشكل (49) تحضير التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DA) باستخدام برنامج (ULTIMAKER CURA)

2-1-3 - طباعة النموذج (3DA):

يتلو عملية التحضير، الحصول على الملف بصيغة (G-CODE)، ويكون الملف قد تحول لمجموعة من الأوامر تستطيع الطابعة ثلاثية الأبعاد فهمها وتنفيذها. بعد ذلك تتم عملية الطباعة بعد تلقين الطابعة بالمواد الأولية، علماً أن المواد المستخدمة من نوع PLA+.



الشكل (50) النموذج (3DA) باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد

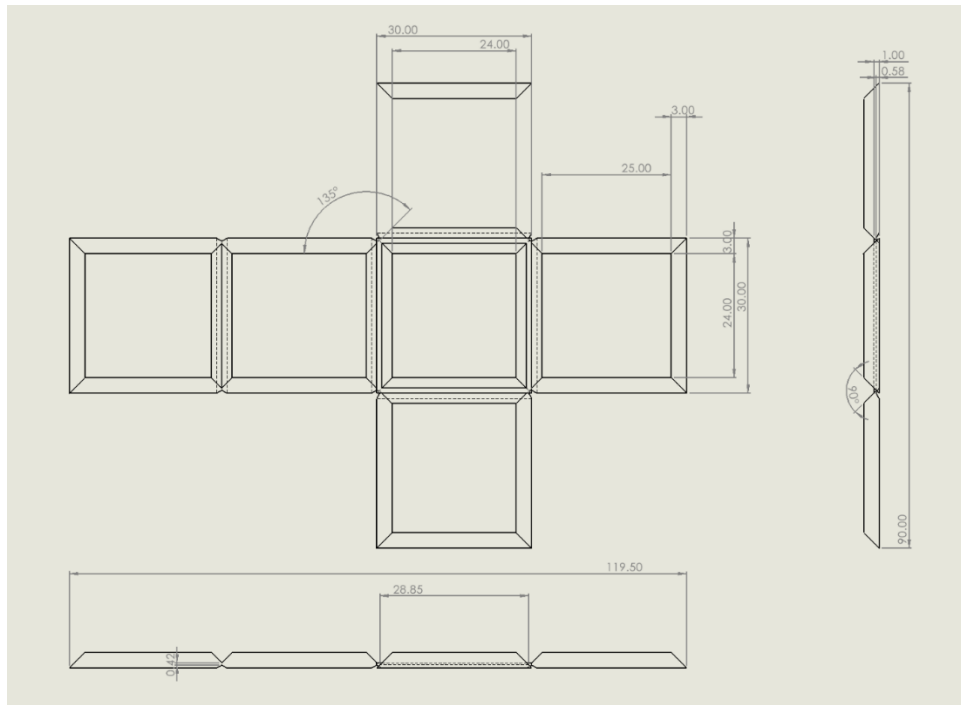
قيم التشغيل الفعلية:

• زمن التصنيع 03:30h .

• وزن المواد المستهلكة: 15g.

2-2- طباعة النموذج (4DA1, 4DA2) باستخدام تقنية الطباعة رباعية الأبعاد:

2-2-1- إنشاء التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (4DA1, 4DA2):



الشكل (51) التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (4DA1, 4DA2) باستخدام برنامج (SOLIDWORKS)

كما يبين الشكل (51)، النموذج (4DA1, 4DA2) هو عبارة عن مكعب مفتوح أبعاده موضحة بالشكل.

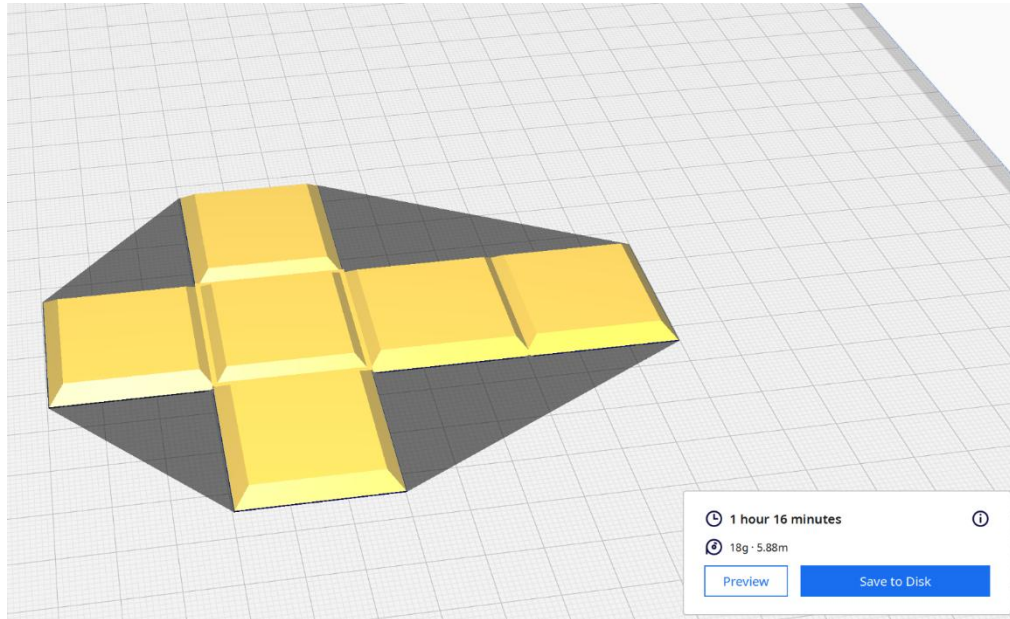
توجب إضافة بعد التعديلات على تصميم المكعب المفتوح بما يتناسب مع خصوصية الشكل، والآلية المتوقعة تشكله فيها بعد الطباعة.

2-2-2- تحضير التصميم الافتراضي (4DA1, 4DA2) للطباعة:

بعد تحويل صيغة الملف الافتراضي لصيغة STL، تم إدخاله إلى البرنامج التشغيلي للطباعة ثلاثية الأبعاد (ULTIMAKER CURA).

قدر البرنامج التشغيلي قيمة افتراضية:

- زمن التصنيع: 1:16 h
- وزن المواد المستهلكة: 18 g



الشكل (52) تحضير التصميم الافتراضي (4DA1) للطباعة

3-2-2- طباعة النموذج (4DA1):

يتلو عملية التحضير، الحصول على الملف بصيغة (G-CODE)، ويكون الملف قد تحول لمجموعة من الأوامر تستطيع الطابعة ثلاثية الأبعاد فهمها وتنفيذها. بعد ذلك تتم عملية الطباعة بعد تلقيم الطابعة بالمواد الأولية، حيث أن المواد الأولية في هذه الحالة هي مواد ذكية ذات ذاكرة الشكل SMES.



الشكل (53) النموذج (4DA1) قبل التحريض



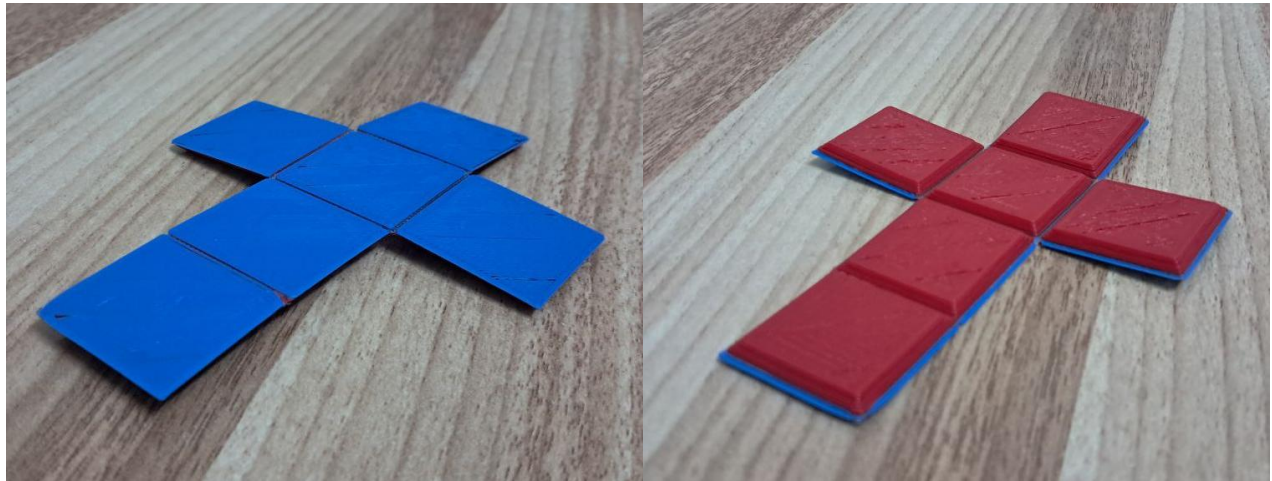
الشكل (54) النموذج (4DA1) بعد التحريض والتشكيل

قيم التشغيل الفعلية:

- زمن التصنيع: 01:17 h.
- وزن المواد المستهلكة: 16g.

4-2-2 - طباعة النموذج (4DA2):

تم تبديل المواد يدويا أثناء عملية الطباعة مرتين، كلا المادتين باللون الأزرق والأحمر هي مواد طباعة ثلاثية الأبعاد من نوع PLA+، حيث تم استخدام المادة الذكية شفافة اللون بينهما بالطبقات التي يتم فيها تشكيل المفاصل.



الشكل (55) النموذج (4DA1) قبل التحريض



الشكل (56) النموذج (4DA2) بعد التحريض والتشكيل

قيم التشغيل الفعلية:

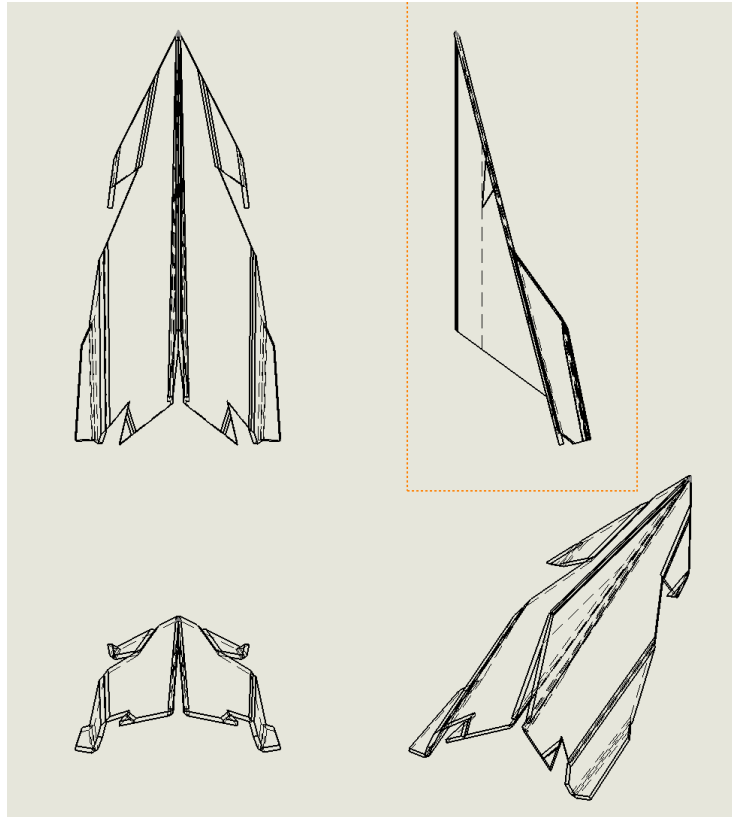
- زمن التصنيع: 01:21 h مع الأخذ بعين الاعتبار الزمن المستغرق في تبديل المواد.
- وزن المواد المستهلكة: 16g منها 4g مواد ذكية، 12g مواد ثلاثية الأبعاد (بمعدل طبقتين مواد ذكية إلى 12 طبقة مواد ثلاثية الأبعاد).

3- اختبار النموذج (B):

3-1- طباعة النموذج (3DB) الطائرة الورقية باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد:

3-1-1. إنشاء التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DB):

تم استخدام برنامج (SOLIDWORKS)



الشكل (57) التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DB) باستخدام برنامج (SOLIDWORKS)

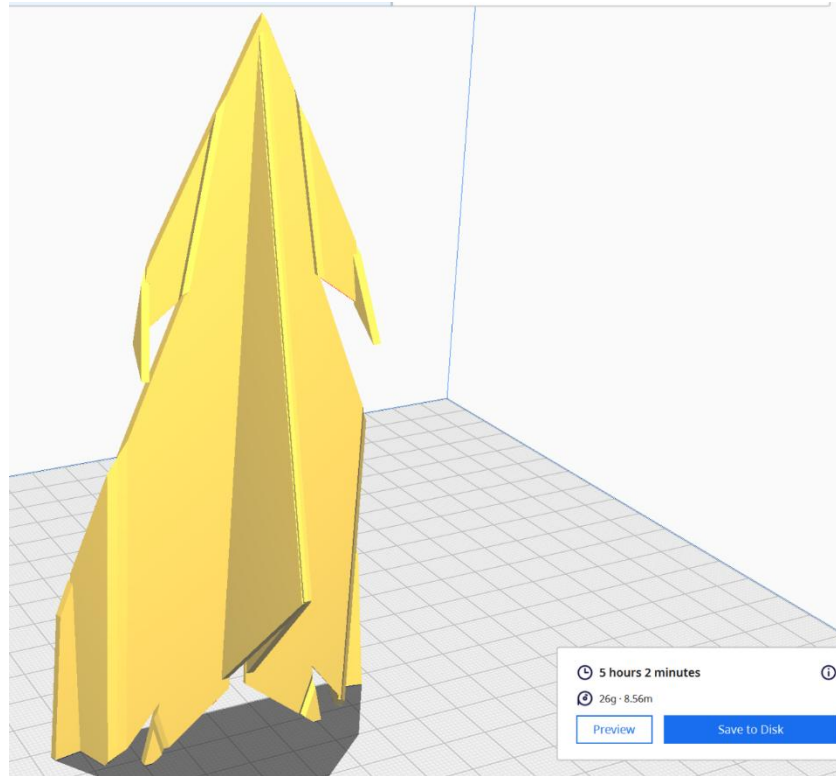
كما يبين الشكل (57)، النموذج (3DB) هو عبارة عن طائرة ورقية ثلاثية الأبعاد.

3-1-2- تحضير التصميم الافتراضي (3DB) للطباعة:

بعد تحويل صيغة الملف الافتراضي لصيغة STL، تم إدخاله إلى البرنامج التشغيلي للطباعة ثلاثية الأبعاد (ULTIMAKER CURA)، وتم تحديد بارامترات الطباعة.

قدر البرنامج التشغيلي قيمة افتراضية:

- زمن التصنيع: 05:02 h
- وزن المواد المستهلكة: 26 g



الشكل (58) تحضير التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (3DB) باستخدام برنامج (ULTIMAKER CURA)

3-1-3 - طباعة النموذج (3DB):

يتلو عملية التحضير، الحصول على الملف بصيغة (G-CODE)، ويكون الملف قد تحول لمجموعة من الأوامر تستطيع الطابعة ثلاثية الأبعاد فهمها وتنفيذها. بعد ذلك تتم عملية الطباعة بعد تلقين الطابعة بالمواد الأولية، علماً أن المواد المستخدمة من نوع PLA+.



الشكل (59) النموذج (3DB) باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد

قيم التشغيل الفعلية:

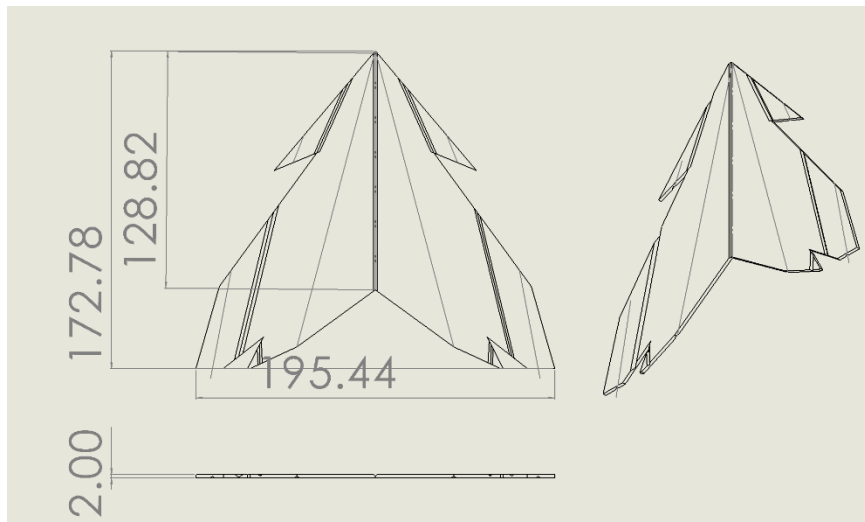
- زمن التصنيع 05:00h .

- وزن المواد المستهلكة: 25g.

3-2- طباعة النموذج (4DB1, 4DB2) الطائرة الورقية باستخدام تقنية الطباعة رباعية الأبعاد:

3-2-1- إنشاء التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (4DB1, 4DB2):

كما يبين الشكل (60)، النموذج (4DB1, 4DB2) هو عبارة عن طائرة ورقية مفتوحة أبعادها موضحة بالشكل مع الأخذ بعين الاعتبار أن الباحث قام بتطبيق مقياس رسم مناسب بحيث تكون أبعاد كل من النموذجين ثلاثي ورباعي الأبعاد متساوية.



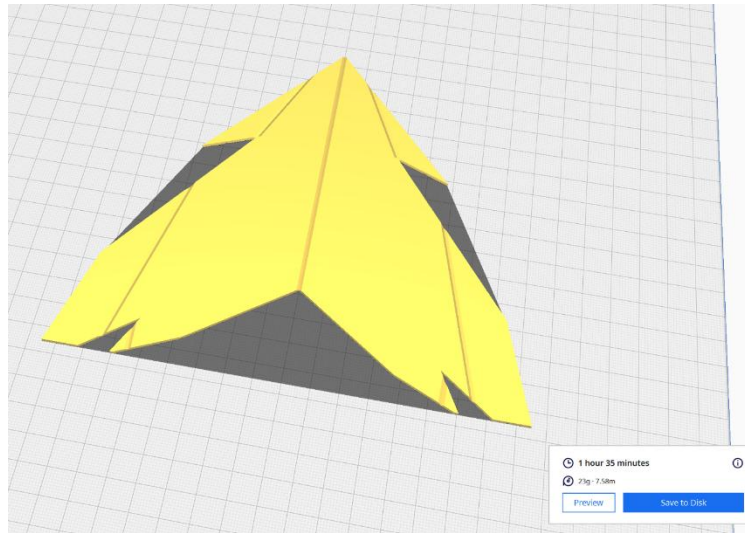
الشكل (60) التصميم الافتراضي ثلاثي الأبعاد للنموذج (4DB1, 4DB2) باستخدام برنامج (SOLIDWORKS)

3-2-2- تحضير التصميم الافتراضي (4DB1, 4DB2) للطباعة:

بعد تحويل صيغة الملف الافتراضي لصيغة STL، تم إدخاله إلى البرنامج التشغيلي للطباعة ثلاثية الأبعاد (ULTIMAKER CURA).

قدر البرنامج التشغيلي قيمة افتراضية:

- زمن التصنيع: 1:35 h.
- وزن المواد المستهلكة: 23 g.



الشكل (61) تحضير التصميم الافتراضي (4DB1) للطباعة

3-2-3 طباعة النموذج (4DB1):

يتلو عملية التحضير، الحصول على الملف بصيغة (G-CODE)، ويكون الملف قد تحول لمجموعة من الأوامر تستطيع الطابعة ثلاثية الأبعاد فهمها وتنفيذها. بعد ذلك تتم عملية الطباعة بعد تلقين الطابعة بالمواد الأولية، حيث أن المواد الأولية في هذه الحالة هي مواد ذكية ذات ذاكرة الشكل SMES.



الشكل (62) النموذج (4DB1) قبل التحريض



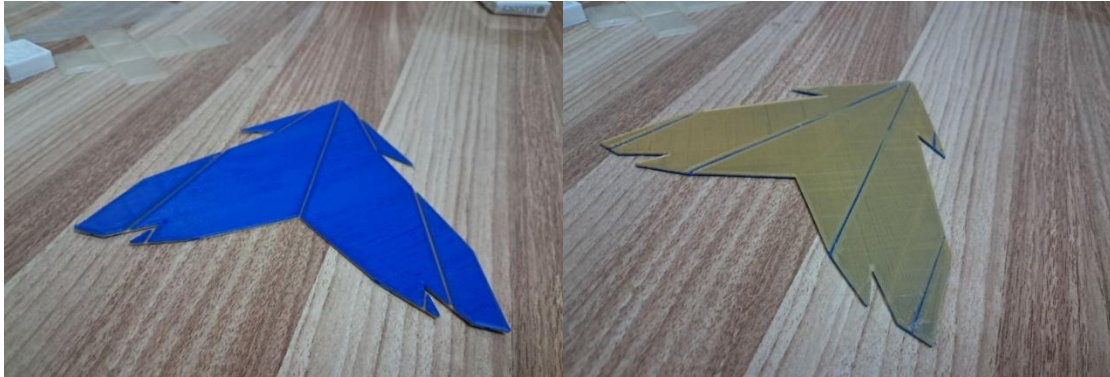
الشكل (63) النموذج (4DB1) بعد التحريض والتشكيل

قيم التشغيل الفعلية:

- زمن التصنيع: 01:32 h.
- وزن المواد المستهلكة: 24g.

3-2-4 - طباعة النموذج (4DB2):

تم تبديل المواد يدويا أثناء عملية الطباعة مرتين، كلا المادتين باللون الأزرق والأصفر هي مواد طباعة ثلاثية الأبعاد من نوع PLA+، حيث تم استخدام المادة الذكية شفافة اللون بينهما بالطبقات التي يتم فيها تشكيل المفاصل.



الشكل (64) النموذج (4DB2) قبل التحريض



الشكل (65) النموذج (4DB2) بعد التحريض والتشكيل

قيم التشغيل الفعلية:

- زمن التصنيع: 01:36 h مع الأخذ بعين الاعتبار الزمن المستغرق في تبديل المواد.
- وزن المواد المستهلكة: 24g منها 14 g مواد ذكية، 10g مواد ثلاثية الأبعاد (بمعدل ثلاث طبقات مواد ذكية إلى طبقتين مواد ثلاثية الأبعاد).

الفصل السادس: النتائج والتوصيات

يتناول هذا القسم عرضًا للنتائج العملية التي تم الحصول عليها من خلال النماذج المصنّعة باستخدام الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد. شملت التجربة ستة نماذج مختلفة من حيث الشكل، نوع المواد، وطريقة الطباعة.

1- عرض النتائج:

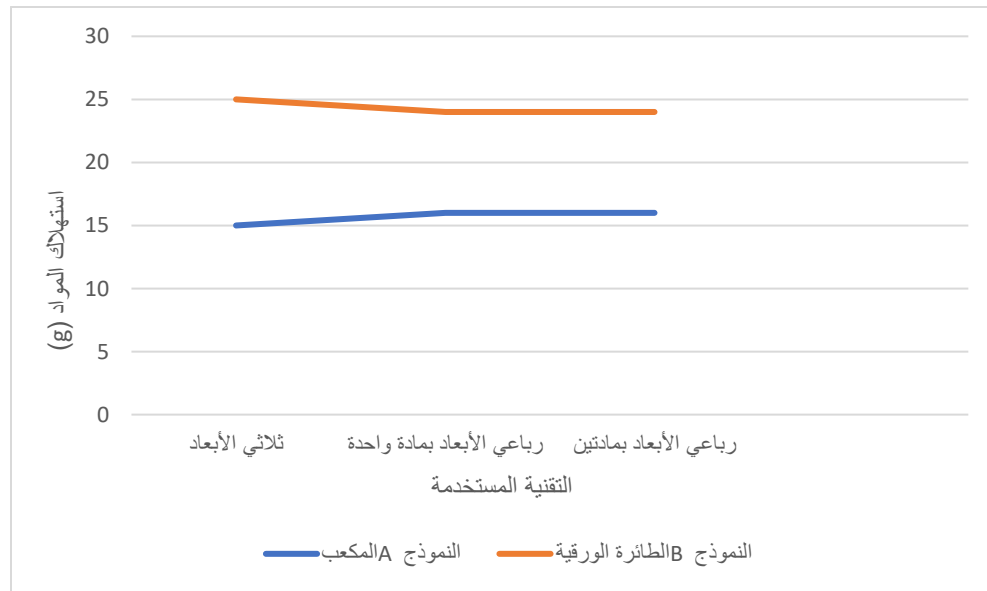
1-1- نتائج استهلاك المواد:

يعرض الجدول (13) استهلاك المواد بالغمات لستة نماذج مختلفة تم تنفيذها بتقنيات ومواد متنوعة. يُلاحظ أن الفرق في استهلاك المواد بين تقنيتي الطباعة ثلاثية ورباعية الأبعاد يكاد لا يذكر لكل من النموذجين (A)، و(B).

الجدول (13) نتائج استهلاك المواد

النموذج	4DB2	4DB1	3DB	4DA2	4DA1	3DA
استهلاك المواد (g)	24	24	25	16	16	15

الشكل (66) يوضح بشكل بصري الفروقات في استهلاك المواد بين النماذج. يظهر فيه استقرار لمنحني استهلاك المواد لكل من النموذجين (A)، و(B).



الشكل (66) الرسم البياني المعبر عن نتائج استهلاك المواد

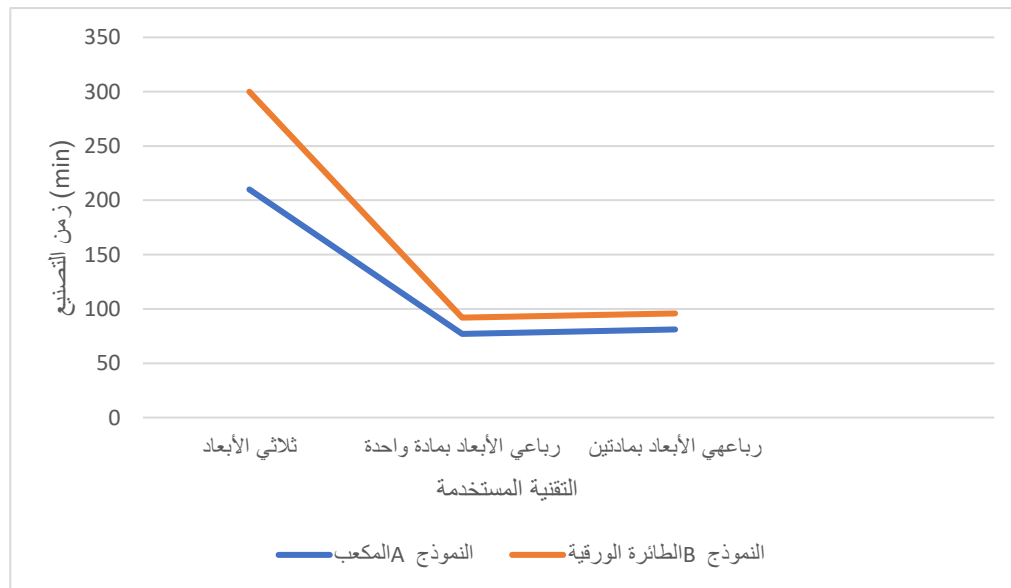
1-2- نتائج زمن التصنيع:

يعرض الجدول (14) زمن التصنيع بالدقائق لستة نماذج مختلفة تم تنفيذها بتقنيات ومكونات متنوعة. يُلاحظ أن النماذج المطبوعة بتقنية الطباعة الرباعية الأبعاد استغرقت زمناً أقل مقارنة بالنماذج المطبوعة بتقنية الطباعة الثلاثية الأبعاد.

الجدول (14) نتائج زمن التصنيع

النموذج	4DB2	4DB1	3DB	4DA2	4DA1	3DA
زمن التصنيع (min)	96	92	300	81	77	210

أما الشكل (67) فيوضح بشكل بصري الفروقات في زمن التصنيع بين النماذج. يظهر فيه انخفاض واضح في الزمن عند الانتقال من نموذج DA3 إلى النماذج DB14 و DB24، مما يبرز أثر التقنية المستخدمة على الكفاءة الزمنية.



الشكل (67) الرسم البياني المعبر عن نتائج زمن التصنيع

تبين المعادلة التالية نسبة التوفير بالوقت للنموذج (A)

$$S_A = \frac{T_{3DA} - T_{4DA2}}{T_{3DA}} \times 100 = \frac{210 - 81}{210} \times 100 = 61.4\%$$

تبين المعادلة التالية نسبة التوفير بالوقت للنموذج (B)

$$S_B = \frac{T_{3DB} - T_{4DB2}}{T_{3DB}} \times 100 = \frac{300 - 96}{300} \times 100 = 68\%$$

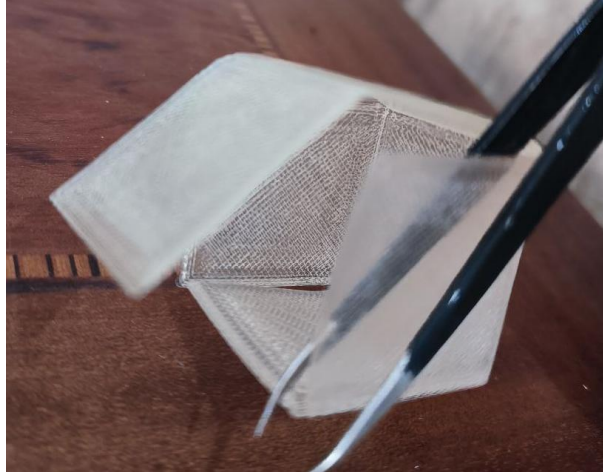
1-3-3- تحليل النماذج غير الناجحة:

خلال مراحل التصنيع والتجريب، لوحظ أن بعض النماذج لم تحقق النتائج المرجوة لأسباب تصميمية وتقنية متعلقة بشكل النموذج وتوزيع المادة. ومن أبرز المشكلات التي واجهها الباحث:

1-3-3-1 تشوه كامل للقطعة عند المفصل:

من بين النماذج التي واجهت فشلاً وظيفياً، كان هناك نموذج يحتوي على مفصلات رفيعة جداً في التصميم. أدت هذه الرقة إلى تشوه كامل في القطعة أثناء عملية التصنيع، حيث لم تتحمل المفصل الرقيقة درجة الحرارة، مما تسبب بتشوهات كبيرة وعدم استقرار في البنية النهائية.

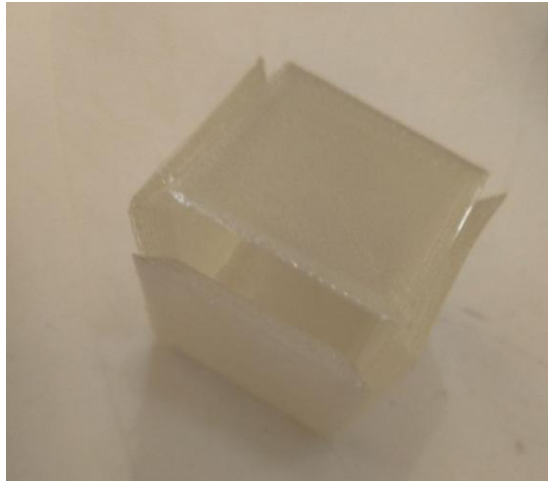
تشير هذه النتيجة إلى أهمية التحقق من سماكة الأجزاء الحساسة مثل المفصلات، وخاصة عند التعامل مع مواد ذكية تتفاعل مع الحرارة أو الرطوبة. يجب أن تراعى الحدود الدنيا المقبولة لسماكة هذه الأجزاء في مرحلة التصميم لضمان المتانة وعدم الفشل أثناء التصنيع أو الاستخدام.



الشكل (68) نموذج غير ناجح بسبب تشوه المفصل

1-3-2- إغلاق غير كامل للنموذج A:

في النموذج A المصمم على شكل مكعب مفتوح، لم يتم الإغلاق الكامل للسطوح، وذلك بسبب زوايا الإطباق غير الدقيقة. أدى ذلك إلى بقاء فجوات واضحة تمنع اكتمال الشكل النهائي. ويعزى ذلك إلى أخطاء بسيطة في التصميم ثلاثي الأبعاد أو إلى تفاوتات في دقة الطابعة نفسها. هذه الملاحظة تشير إلى ضرورة مراعاة زاوية الإغلاق والتراصف الهندسي عند تصميم الأجزاء التي تعتمد على الطي المُتحكم به.



الشكل (69) نموذج غير ناجح بسبب زوايا الإطباق

2- تحليل ومناقشة النتائج:

2-1- تحليل تأثير نوع التقنية على استهلاك المواد:

أظهرت نتائج الدراسة التجريبية أن تأثير نوع التقنية (ثلاثية الأبعاد مقابل رباعية الأبعاد) على استهلاك المواد كان محدوداً جداً. فمن خلال مقارنة النماذج المتشابهة في التصميم، نجد أن النموذج 3DA استهلك 15 غرام من المواد، بينما استهلك النموذجان 4DA1 و 4DA2 حوالي 16 غرام لكل منهما، بزيادة طفيفة تبلغ حوالي 6.7%. وبالمثل، استهلك النموذج 3DB حوالي 25 غرام، بينما استهلك النموذجان 4DB1 و 4DB2 حوالي 24 غرام لكل منهما، بانخفاض طفيف يبلغ حوالي 4%. هذه الفروقات الطفيفة تشير إلى أن نوع التقنية ليس له تأثير جوهري على كمية المواد المستهلكة، وأن العامل الرئيسي المؤثر هو حجم وتعقيد النموذج نفسه. يمكن تفسير هذا التقارب في استهلاك المواد بأن كلتا التقنيتين تعتمدان على بناء النموذج من نفس المواد الأساسية، وأن الاختلاف الرئيسي بينهما يكمن في طريقة تشكيل وتوزيع هذه المواد وليس في كميتها. هذه النتيجة تختلف عما قد يتوقعه البعض من أن الطباعة رباعية الأبعاد قد تستهلك مواد أقل بسبب اعتمادها على خاصية التشكل الذاتي، مما يشير إلى أن توفير المواد ليس من المزايا الرئيسية للطباعة رباعية الأبعاد مقارنة بالطباعة ثلاثية الأبعاد.

2-2- تحليل تأثير نوع التقنية على زمن التصنيع:

على عكس استهلاك المواد، أظهرت النتائج تأثيراً كبيراً وواضحاً لنوع التقنية على زمن التصنيع. فقد استغرق تصنيع النموذج 3DA حوالي 210 دقيقة، بينما استغرق تصنيع النموذجين 4DA1 و 4DA2 حوالي 77 و 81 دقيقة على التوالي، مما يمثل انخفاضاً كبيراً في زمن التصنيع بنسبة تتراوح بين 61-65%. وبالمثل، استغرق تصنيع النموذج 3DB حوالي 300 دقيقة، بينما استغرق تصنيع النموذجين 4DB1 و 4DB2 حوالي 92 و 96 دقيقة على التوالي، بانخفاض كبير يصل إلى 68-69%. هذا الانخفاض الكبير في زمن التصنيع يُعد من أهم مزايا تقنية الطباعة رباعية الأبعاد، ويمكن تفسيره بأن هذه التقنية تعتمد على طباعة نموذج مسطح أو شبه مسطح ثم الاعتماد على خصائص المواد الذكية للوصول إلى الشكل النهائي، مما يقلل بشكل كبير من عدد الطبقات المطلوب طباعتها. بالإضافة إلى ذلك، تتجنب الطباعة رباعية الأبعاد الحاجة إلى طباعة هياكل دعم معقدة للأجزاء المعلقة، مما يوفر المزيد من الوقت. مما يجعلها خياراً مثالياً للتطبيقات التي تتطلب إنتاجاً سريعاً، خاصة في المجالات الصناعية والطبية التي تحتاج إلى نماذج أولية سريعة أو منتجات مخصصة بوقت قياسي.

2-3- الاستنتاجات:

- بناءً على تحليل النتائج، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:
- 2-3-1- تقنية الطباعة رباعية الأبعاد تتفوق بشكل كبير على تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد من حيث زمن التصنيع، مع تحقيق انخفاض يصل إلى 65% في زمن التصنيع.
 - 2-3-2- نسبة التوريد بالزمن تختلف حسب خصوصية شكل النموذج وحجمه.
 - 2-3-3- لا يوجد فرق كبير في استهلاك المواد بين التقنيتين، مما يشير إلى أن الحجم الإجمالي للنموذج هو العامل الرئيسي المؤثر على كمية المواد المستهلكة.
 - 2-3-4- تقنية الطباعة رباعية الأبعاد تقدم كفاءة أعلى من حيث زمن التصنيع، مما يجعلها خياراً أفضل للتطبيقات التي تتطلب إنتاجاً سريعاً مع الحفاظ على كفاءة استخدام المواد.
 - 2-3-5- التحديات التقنية المتعلقة بتصميم المفاصل وزوايا الإطباق تؤثر على نجاح النماذج المطبوعة بتقنية رباعية الأبعاد، مما يتطلب اهتماماً خاصاً بمرحلة التصميم.
 - 2-3-6- هناك حد أدنى للسماكات التي يتم تصنيع النماذج رباعية الأبعاد المنفردة منها، ويتغير هذا الحد حسب النموذج المدروس.
 - 2-3-7- لا يمكن استبدال تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد بالطباعة رباعية الأبعاد كلياً، حيث أن هذه الطريقة تعمل فقط مع النماذج التي يمكن تشكيلها من خلال طي الصفائح.
 - 2-3-8- يمكن العمل على نماذج مغلقة أو مفتوحة.

2-4- التوصيات والملاحظات:

- 2-4-1- استخدام تقنية الطباعة رباعية الأبعاد في التطبيقات التي تتطلب إنتاجاً سريعاً مع الحفاظ على كفاءة استخدام المواد.
- 2-4-2- يمكن أن يكون هناك توفير بالمواد عند إجراء التجارب على نماذج أكثر تعقيداً وتحتاج إلى دعومات.
- 2-4-3- من الممكن أن تتغير نسبة التوريد بالوقت عند إجراء التجارب على نفس النماذج بأبعاد أكبر.
- 2-4-4- يمكن أن يكون هناك توفير بالمواد عند إجراء التجارب على نفس النماذج بأبعاد أكبر.
- 2-4-5- إيلاء اهتمام خاص لمرحلة تصميم النماذج المطبوعة بتقنية رباعية الأبعاد، مع مراعاة سماكة المفاصل وزوايا الإطباق لضمان نجاح النموذج.

2-4-6- اختيار التصميم المناسب للنموذج بما يتوافق مع متطلبات التطبيق، مع مراعاة تأثير تعقيد الشكل على استهلاك المواد وزمن التصنيع.

2-4-7- 4. إجراء المزيد من الدراسات حول تأثير نوع المواد المستخدمة في الطباعة رباعية الأبعاد على استهلاك المواد وزمن التصنيع.

- 1- Blanco, I. (2020). The Use of Composite Materials in 3D Printing, *journal of composite science*. doi:10.3390(jcs4020042):1.
- 2- Bozkurt, Y. Karayel, E. (2021). 3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends, *Journal of materials research and technology*, 2238(7854):1431.
- 3- Shahrubudin, N. Ramlan, R. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications, *ScienceDirect*, 2351 (9789) :1286, 1287.
- 4- Jandyal, A. Chaturvedi, I. Wazir, I. Raina, A. Irfan, M. (2022). 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0, *KEAI*, 2666(4127):34,35.
- 5- Pagac, M. Hajnys, J. Ma, Q. Jancar, L. Jansa, J. Stefek, P. and Mesicek, J. (2021). A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing, *polymers*, 13(598):4.
- 6- Ramya, A. Vanapalli, S.(2016). 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN VARIOUS APPLICATIONS, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 0976(6359):407-408.
- 7- Paral, S. Jeng, J. Cheng, Y. (2025). Novel vat design for liquid crystal display vat photopolymerization: reduction of separation force and pixelated effect, *Virtual and Physical Prototyping*, 1745(2759):2.
- 8- Wickramasinghe, S. Do, T. and Tran, P. (2020). FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments, *Polymers*, doi:10.3390/polym12071529:4
- 9- Swetham, T. Reddy, K. M. Huggi, A. Kumar, M.N. (2017). A Critical Review on of 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM, *IJSRSET*, 2 (3): 353-361.
- 10- Li, X. Shang, J. and Wang, Z. (2017). Intelligent materials: a review of applications in 4D printing, *Emerald*, DOI 10.1108:2,171.
- 11- Ahmed, A. Arya, S. Gupta, V. Furukawa, H. Khosla, A. (2021). 4D printing: Fundamentals, materials, applications and challenges, *Polymer*, 288(123926) :2,22.
- 12- Momeni, F. Ni, J. (2020). Laws of 4D Printing, *Elsevier*. 10(1016):1035-1055.

- 13- Khoo, Z. Teoh, J. Liu, Y. Chua, C. Yang, S. (2015). 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing, *Virtual and Physical Prototyping*, DOI: 10.1080(17452759):105.
- 14- Gurung, D. Arcada,(2017). Degree Programme in Plastics Technology, P:37,40,42.
- 15- Snyder, R. (2013). An overview of the past, present, and future of 3D printing technology with an emphasis on the present, *ASCUE Proceedings*.P:9,95.
- 16- Adam, G. Benouhiba, A. Rabenoroso, K. Clévy, C. and Cappelleri, D. (2021). 4D Printing: Enabling Technology for Microrobotics Applications, *Advanced Intelligent Systems*. 3(2000216):11-12.
- 17- Zhang, Z. Demir, K. Gu, G. (2019). Developments in 4D-printing: a review on current smart materials, technologies, and applications, *International Journal of Smart and Nano Materials*. 10(3): 211-219.
- 18- Kantaros, A. Ganetsos, T. and Piromalis, D. (2023). 3D and 4D Printing as Integrated Manufacturing Methods of Industry 4.0, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 16(1):2-22.
- 19- Chu, H. Yang, W. Sun, L. Cai, S. Yang, R. Liang, W. Yu, U. and Liu, L. (2020). 4D Printing: A Review on Recent Progresses, *micromachines*. Micromachines. doi:10.3390/mi11090796.
- 20- Raviv, D. Zhao, W. McKnelly, C. Papadopoulou, A. Kadambi, A. Shi, B. (2014) Active Printed Materials for Complex Self-Evolving Deformations, *SCIENTIFIC REPORTS*. DOI: 10.1038/srep07422. P1.
- 21- Yu, K. Ritchie, A. Mao, Y. Dunn, M. L. Qi, H. J. (2015). Controlled Sequential Shape Changing Components by 3D Printing of Shape Memory Polymer Multimaterials, *ScienceDirect*. doi: 10.1016/j.piutam.2014.12.021:196.
- 22- Sun, H.C.M. Liao, P. Wei, T. Zhang, L. Sun, D. (2020). Magnetically Powered Biodegradable Microswimmers, *Micromachines*. doi:10.3390/mi11040404. P2.
- 23- Ceylan, H. Yasa, I. C. Yasa, O. Tabak, A. F. Giltinan, G. Sitti, M. (2019), 3D-Printed Biodegradable Microswimmer for Theranostic Cargo Delivery and Release, *ACS Nano*. DOI: 10.1021/acsnano.8b09233:3354.
- 24- Tottori, S. Zhang, L. Qiu, F. Krawczyk, K. K. Nelson, B. J. (2012), DOI: 10.1002/adma.201103818:814.

- 25- Daerden, F. Lefeber, D. Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation, *robotikk* ,(2002), P2.
(http://www.robotikk.com/inf5207/Daerden_Lefeber_EJMEE.pdf)
- 26- Ge, Q. Qi, H. J. Dunn, M.L. Active materials by four-dimension printing, *AIP Publishing*, Doi: 10.1063/1.4819837.
- 27- Kaur, G. Garg, P. Kaur, B. Chaudhary, G. R. Kumar, S. Dilbaghi, N. Gawali, S. L. (2018) Cationic double chained metallosurfactants: synthesis, aggregation, cytotoxicity, antimicrobial activity and their impact on the structure of bovine serum albumin, *Soft matter*. Doi: 10.1039/C8SM00535D. P1.
- 28- Mao, Y. Yu, K. Isakov, M. S. Wu, J. Dunn, M. L. Qi, H. J. (2015), Sequential Self-Folding Structures by 3D Printed Digital Shape Memory Polymers , *scientific reports*. DOI: 10.1038/srep13616, P7.
- 29- Bodaghi, M. Damanpack, A.R. Liao, W.H.(2019) Triple shape memory polymers by 4D printing, *Smart Mater*. doi:10.1088/1361-665X/aabc2a, P1.
- 30- Ge, Q. Sakhaei, A.H. Lee, H. Dunn, C.K. Fang, N.X. and Dunn, M.L. Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers, *ACS*. doi:10.1038/ srep31110. P2.
- 31- Morrison, R.J. (2015) Mitigation of tracheobronchomalacia with 3D-printed personalized medical devices in pediatric patients., *ACS*. doi:10.1126/scitranslmed.aad3106. P1.
- 32- Miao, S. Cui, H. Nowicki, M. Xia, L. Zhou, X. Lee, S.-J. Zhu, W. Sarkar, K. Zhang, Z. Zhang, L.G. (2018), Stereolithographic 4D bioprinting of multiresponsive architectures for neural engineering, *Advanced Biology*, doi:10.1002/adbi.v2.9.



Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Department Mechanical Design Engineering

MASTER in Production Automation

Title

**Comparison study between three-dimensional and Four-dimensional
printing and their applications (case study: the point of view for production
time and materials consumption)**

A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of
MASTER in Production Automation

By

Eng. Rafah Mohammad Jumaa

Supervisor

Prof.Dr.Eng Mahmoud Bahaa Eddin Bany AlMarjeh

2024-2025

جامعة دمشق - رفاة محمد جمعة - ماجستير - دمشق - 2024-2025