



# دراسة استقصائية حول الضبط الأمثل لمعاملات تقنية النمذجة بالصهر والترسيب بهدف تعزيز الخصائص الميكانيكية لمنتجاتها

عبدالعظيم سالم باله

كلية التقنية الصناعية، قسم الهندسة الصناعية، مصراتة-ليبيا

## الملخص

تقنية النمذجة بالصهر و الترسيب هي إحدى تقنيات التصنيع بالإضافة أو ما يعرف بالطباعة الثلاثية الأبعاد. تقنية جديدة اقترحت جميع المجالات الصناعية و الخدمية، انتشر استخدامها بشكل واسع وذلك لما لها من قدرات كبيرة مستمدة من قدرات الحاسبات الآلية. فهي قادرة على تصنيع المنتجات ذوات التصميم المعقدة و في عملية إنتاجية واحدة وبدون الحاجة لأي مهارات يدوية ولا قوالب تشكيل. تعتمد جودة منتجات هذه التقنية على معاملات تتحكم في عملية بنائها للنماذج، فالضبط الرشيد لهذه المعاملات يُحسن من جودة النماذج المطبوعة. لهذه المعاملات تأثيرات متباينة على مفردات جودة المنتجات المتمثلة في الخصائص الميكانيكية و الديناميكية، دقة المقاسات، جودة السطح و زمن الطباعة. يختص هذا البحث بمراجعة البحوث السابقة المتعلقة بدراسة تأثير معاملات عملية النمذجة بالصهر و الترسيب على الخصائص الميكانيكية للنماذج المنتجة بهذه التقنية. لقد حُلِصت الدراسة إلى استنتاج و تحديد طبيعة تأثير هذه المعاملات على الخصائص الميكانيكية لمنتجات العملية و القيم المثالية الإسترشادية لهذه المعاملات التي تفوق المستخدم لتحقيق أفضل نتائج ممكنة.

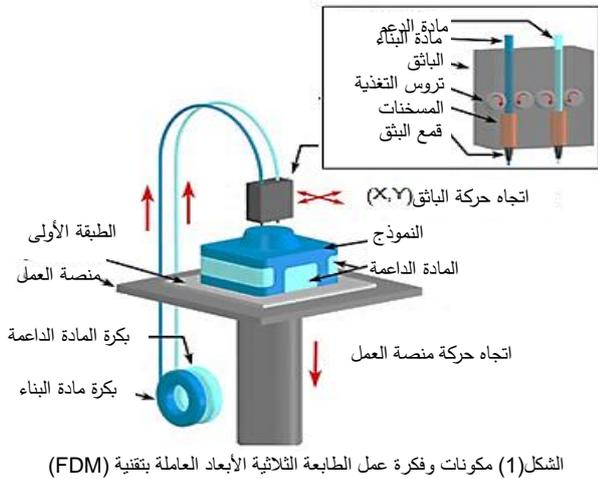
## الكلمات الدالة: Optimization of FDM ، FDM Process Parameters، Fused Deposition Modeling Process Parameters

هذه البرمجيات بتحديد جميع المسارات التي يجب على بائق المادة الخام سلكها عند بناء كل طبقة من طبقات النموذج. تقوم الناسخة ببناء الطبقة الأولى مباشرة على سطح منصة العمل و عند الانتهاء من بناء جميع تفاصيل التصميم خلال تلك الطبقة تقوم منصة العمل بالنزول بمقدار يكافئ سمك طبقة البناء الذي يُحدد حسب رغبة المستخدم عند ضبط إعدادات برنامج التشريح، وعندها يشرع البائق في بناء الطبقة الثانية بنفس الطريقة السابقة، وتستمر عملية البناء (الطباعة) بنفس المنوال حتى الانتهاء إلى القمة كما هو موضح بالشكل(1). يؤدي أسلوب عمل التقنية هذا (الطبقات) إلى زيادة خشونة السطح الخارجي للنموذج المنتج، وهذا من أهم عيوب هذه التقنية مقارنة ببعض الطرق الأخرى التي تقدم منتجاتها بأسطح خارجية فائقة النعومة [1].

## 1. المقدمة

تصنف تقنية التصنيع بالصهر والترسيب (Fused Deposition Modeling) (FDM) كأحد تقنيات التصنيع بالإضافة (Additive Manufacturing) (AM) وهي تشترك مع باقي التقنيات في فكرة عملها والمتمثلة في بناء منتجاتها ضمن عملية إنتاجية وحيدة يتم فيها تحويل التصميم (محمول في صيغة رقمية) (Digital design) (model) إلى شرائح عديدة يتم بنائها واحد فوق الأخرى ابتداء من القاعدة و انتهاء بالقمة. رغم أن جميع تقنيات التصنيع بالإضافة تشترك فيما بينها في فكرة عملها إلا أنها تختلف فيما بينها باختلاف هيئة المادة الخام المستخدمة (صلبة، سائلة، مسحوق)، الطاقة المستخدمة لتشكيل المادة الخام (ليزرية، حرارية). ولهذه التقنيات عدة تصنيفات تعتمد على طبيعة معيار التصنيف المستخدم، و من أشهرها ما يعتمد على طبيعة المادة الخام المستخدمة. فمن أمثلة تقنيات المستخدمة لمواد خام سائلة (SLA) (Stereolithography) و (Jetting systems). أما من أمثلة التقنيات المستخدمة لمواد خام على هيئة مسحوق (SLS) (Selective Laser Sintering) و (SMS) (Selective Masking Sintering) و (Fused Deposition Modeling) (FDM) من التقنيات المستخدمة لمواد خام صلبة.

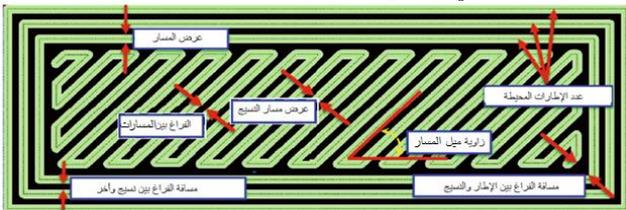
تصنف تقنية (FDM) من التقنيات المستخدمة لمواد خام صلبة (بولمر في هيئة سلك) و تستخدم الطاقة الحرارية (مسخنات كهربائية) لصهر المادة الخام. تعتبر هذه التقنية من أرخص تقنيات التصنيع بالإضافة، وهي سهلة الضبط والاستخدام، كما أنها مصنفة من التقنيات الصديقة للبيئة فهي لا تنتج أي مواد أو أبخرة ضارة. تعتمد فكرة عملها على بناء النماذج في طبقات متراكبة بعضها فوق بعض استناداً إلى برنامج التشغيل الذي تنتجه برمجيات التشريح (Slicing Software)، حيث يقوم برنامج التشغيل الذي تنتجه



الشكل(1) مكونات وفكرة عمل الطباعة الثلاثية الأبعاد العاملة بتقنية (FDM)

المعاملات وهي على النحو التالي [16, 17]، و كما هي موضحة بالشكل(2):

- سمك طبقة البناء (Layer thickness) (LT) : سمك المادة الميثوقة (المطروحة) بعد استوائها على منصة البناء.
- زاوية المسار (Raster Angle) (RA): الزاوية المحصورة بين امتداد مسار الباتق أثناء عملية الطباعة و المحور السيني لمنصة البناء.
- عرض المسار (Raster Width) (RW): عرض مسار الباتق المملوء بالمادة.
- عرض الإطار (Counter Width) (CW): عرض الإطار المحيط بالنسيج الداخلي.
- مسافة الفراغ (Air Gap) (AG) : مسافة الفراغ بين مسارات التعبئة و تعرف بالمسافة البينية أيضاً.
- وضعية إحداثيات الجسم (Orientation): إحداثيات المحور الطولي للنموذج (Z, Y, X) بالنسبة لمحاور فضاء منصة البناء.
- سرعة البثق (Extrusion Velocity) (EV): سرعة بثق المادة وهي معتمدة على سرعة التغذية بالمادة الخام.
- سرعة التعبئة (Filling Velocity) (FV): سرعة حركة الباتق أثناء عملية الترسيب (البثق).
- نمط التعبئة (Filling Pattern): يختص هذا المصطلح بتحديد شكل التعبئة للبناء النموذج في حالة اختياره غير مصمت وتكون بأشكال هندسية متعددة مثل سدسي أو على هيئة مثلثات.



الشكل(2) مصطلحات ضبط متغيرات عملية النمذجة بتقنية (FDM)

### 3. البحوث المتعلقة بتحسين عملية النمذجة بتقنية (FDM)

تنوعت البحوث المنجزة في هذه المساحة تبعاً لتنوع تأثير متغيرات عملية النمذجة على مخرجات العملية. فمن المهم الإشارة إلي أن لمعاملات عملية النمذجة تأثير ملحوظ على خمسة جوانب رئيسية تشترك في تحقيق الجودة الكلية لمخرجات العملية وهي: الخصائص الميكانيكية، الخصائص الديناميكية، خشونة السطح، دقة المقاسات، زمن النمذجة. في كثير من الأحيان يكون من الصعب الجمع بين هذه المخرجات، فتحقيق دقة عالية في المقاسات سوف يتعارض مع تقليل زمن النمذجة، لذلك يجب تحقيق التوازن بين المخرجات المستهدفة تحسينها. لكشف التداخل بين تأثيرات معاملات العملية ولتحسين نتائج تأثيراتها استخدم بعض الباحثون طرق إحصائية متقدمة تمكن الكشف عن تأثير تفاعلات هذه المعاملات و تحقيق التوازن المنشود بين المخرجات المتقاطعة.

تعتبر الخصائص الميكانيكية من أهم سمات المنتجات التي يحرص المهتمون على تحسينها بأكبر قدر ممكن، فهي السبيل الرئيسي الذي يُمكن التقنية من انتاج منتجات نهائية يمكن استخدامها مباشرة وعدم الإقتصار على النمذجة التمثيلية فقط. ومن المعلوم أن عملية النمذجة باستخدام تقنية (FDM) عدة معاملات تتحكم في طريقة عملها، وأن التغيير في قيم هذه المعاملات يؤثر بشكل مباشر على جودة مخرجاتها. ونظراً لكثرة هذه المتغيرات أصبح من الصعب فهم تأثيرها و خاصة أن لتأثيرات هذه

ارتبطت هذه التقنية بشكل مباشر باسم الشركة الأمريكية (Stratasys Inc) المنتجة لها لأول مرة سنة 1992، واستمرت في تطويرها وتحسين قدراتها وتصنيعها بأحجام مختلفة حتى باتت من أكثر تقنيات التصنيع بالإضافة استخداماً. بدأت هذه التقنية بعدد محدود جداً من المواد الخام من أشهرها (Acrylonitrile Butadiene Styrene) (ABS) و (Polylactic Acid) (PLA) وكانت هذه من أهم التحديات التي واجهت التقنية في بداية انتشارها، غير أن قدرات التقنية العالية وقلة تكلفتها استهوت الكثير من الباحثين وحثتهم على إيجاد خيارات جديدة من المواد الخام، الأمر الذي ساهم في انتشارها بشكل أوسع و استحدثت تطبيقات جديدة للتقنية لم تكن موجودة من قبل [2, 3, 4]. كما أنجزت في الآونة الأخيرة العديد من البحوث بهدف تعزيز جودة منتجات التقنية من عدة محاور من أهمها؛ دعم الخصائص الميكانيكية لقائمة المواد الخام المستخدمة سابقاً عن طريق خلطها بمواد لها خصائص ميكانيكية عالية، الأمر الذي ساعد وبشكل واضح في دعم هذه المواد و انتاج منتجات نهائية بدلاً من الإقتصار على النماذج التمثيلية [5, 6, 7]، هذا من جانب، ومن جانب آخر سعى كثير من الباحثين لتعزيز جودة منتجات التقنية عن طريق الضبط الأمثل لمعاملات العملية (Process Parameters) لتحقيق أفضل نتائج لخصائص النموذج الميكانيكية ( مقاومة الشد، مقاومة الصدم، مقاومة الانحناء، الجساءة) و الفيزيائية ( خشونة السطح الخارجي، دقة المقاسات، المطابقة للنسخ المكررة) وكان لهذه الجهود ثمار ممتازة جداً رفعة من كفاءة التقنية بشكل جيد. ولهذا الغرض استخدمت العديد من الطرق الإحصائية المتقدمة (Design of Experiment) (DOE) لغرض تحسين ضبط متغيرات عملية الطباعة لتحقيق أفضل مخرجات ممكنة عن طريق تصميم توليفات متعددة لقيم المتغيرات و اختبار تأثيرها على مخرجات العملية بهدف تعظيم أو تصغير قيم مخرجات العملية على حسب طبيعة المخرجات، وكان لها هي الأخرى نتائج عظيمة [8, 9, 10].

يسعى هذا البحث لإجراء مسح استقصائي واسع للبحوث السابقة ابتداءً من سنة 2015؛ وذلك طلباً لأحدث ما تم تقديمه من بحوث و البعد عن التكرار؛ فالبحوث السابقة تم تحليلها في دراسات أخرى. كما تخصصت هذه الدراسة جمع و تحليل الدراسات المتعلقة بتحسين ضبط قيم متغيرات العملية بهدف تعزيز الخصائص الميكانيكية لمنتجاتها. حيث سيتم استعراض نتائج أهم هذه الدراسات و الخروج بتصور واضح لميكانيكية تأثير هذه المتغيرات و لتكون نقاط استرشادية للمستخدمين و الباحثين لتحقيق أفضل نتائج ممكنة لمنتجاتهم [11, 12, 13].

### 2. معاملات العملية المؤثرة في جودة المنتجات

من المعلوم أن عملية بناء النماذج بتقنية (FDM) تُحكم بعدة معاملات (Parameters) أو متغيرات تضبط طريقة البناء، وهي تشمل سرعات البناء المختلفة، درجات الحرارة، سمك طبقة البناء، والعديد من المعاملات المتعلقة بالعملية أما بشكل مباشر أو غير مباشر. ومن المعلوم أيضاً أن تأثير هذه المتغيرات على العملية ليس بنفس المقدار لكل المتغيرات، بل لكل منها تأثير يختلف عن الآخر في قيمته وفي مجال تأثيره أيضاً. ويقصد بمجال التأثير ان بعض المتغيرات لها تأثير على مقاومة الشد وليس لها تأثير يذكر على دقة المقاسات و قد يكون العكس، فلكل متغير تأثير يختلف عن غيره [14]. كما أن لتأثير هذه المتغيرات تفاعلات فيما بينها ينتج عنها آثار تختلف عن تأثيرها بشكل منفرد، وفي بعض الحالات قد يتقاطع تأثير هذه المتغيرات على مخرج معين دون غيره من المخرجات، ويقصد بالمخرجات الخصائص الميكانيكية (مقاومة الشد، مقاومة الانحناء، مقاومة الصدم،...)، الفيزيائية (دقة المقاسات، جودة السطح) [15]. والجدير بالذكر أن المتغير لنتائج بحوث تحسين ضبط متغيرات عملية الطباعة يلاحظ وبوضوح أن لتأثير هذه المتغيرات درجة من التعقيد ليست بالبسيطة، وأنه من الأهمية بمكان أن تأخذ بعين الاعتبار، فليس من المقبول تنفيذ أي عملية طباعة باستخدام قيم عشوائية لمتغيرات العملية، فالضبط الرشيد لهذه المتغيرات يحقق تحسين ملحوظ في بعض أو جُل المخرجات، والعمل بقيم عشوائية قد يوقف عملية النمذجة أو ينتج منتجات معيوبة. من المهم قبل البدء في الحديث عن تأثير معاملات عملية النمذجة التعريف ببعض المصطلحات التي لها علاقة مباشرة بهذه

وباستخدام هذه الطريقة استنتج الباحثون النموذج الرياضي الذي يمثل العلاقة بين المعاملات والخصائص الميكانيكية (أقصى قوة للشد) للعينات المنتجة. لقد أثبتت النتائج انخفاض مقاومة الشد مع اقتراب زاوية المسار من 90° وابتعادها عن الزاوية 0°، بينما سُجل ارتفاع ملحوظ في قوى مقاومة الشد مع ازدياد عدد الإطارات المستخدمة لبناء العينات. أما فيما يخص تأثير سمك الطبقة فقد أشارت النتائج إلى تحقيق أعظم قيمة للمقاومة عند سمك 0.18 ملم و لوحظ انخفاض واضح عند تجاوز هذه القيمة، بينما سُجلت أكبر قيمة للإستطالة عند سمك الطبقة 0.15 ملم، ثم حدث انخفاض عند اقترابها من السمك 0.2 ملم. بالإضافة إلى ذلك أشارت النتائج إلى وجود تأثير واضح مشترك لنسبة التعبئة و عدد الإطارات على كلا الخاصيتين (مقاومة الشد، الإستطالة). كما أكدت نتائج الاختبارات على موثوقية النموذج الرياضي لما وجد من تقارب كبير بين نتائج النموذج و النتائج المعملية.

Wu و زملائه [22] سنة 2015 قدموا بحث درسوا فيه تأثير زاوية المسار و سمك الطبقة على الخصائص الميكانيكية (الشد، الضغط، الإنحناء) لعينات مصنوعة من مادة polyether-ether-ketone (PEEK) باستخدام تقنية (FDM). بالإضافة إلى ذلك عقد الباحثون مقارنة الخصائص الميكانيكية لهذه المادة مع خصائص مادة (ABS) الأكثر شيوعاً. أشارت نتائج البحث إلى وجود تأثير قيم للمعاملين وكانت أعلى قيم لخصائص مادة العينات عند المستوى المتوسط لسمك الطبقة (0.3 ملم)، وعند الزاوية 90°/0° و التي تحقق تطابق اتجاه تحميل القوى مع المحور الطولي لألياف نسيج الطبقات. كما أثبتت نتائج الدراسة تفوق كل الخصائص الميكانيكية لهذه المادة (PEEK) على خصائص المادة المرجعية للدراسة؛ الأمر الذي أشار إليه الباحثون إلى جدوى استخدام هذه المادة في كثير من التطبيقات.

قام Harpool و زملائه [23] سنة 2016 بدراسة تأثير نوع نمط التعبئة (سداسي، معين، مستطيل، مصمت) على الخصائص الميكانيكية لعينات الشد المطبوعة باستخدام تقنية (FDM) من مادة (PLA)، حيث تم طباعة كل العينات الغير مصممة بنسبة تعبئة 15%، كما تم أخذها بعين الاعتبار عند احتساب قيمة مساحة مقطع العينة لغرض حساب قيمة مقاومة الإجهاد و معامل المرونة. لقد أشارت نتائج اختبار تأثير نمط الطباعة إلى أن النمطين المستطيل و السداسي هما من حقق أعلى قيم في نتائج قياس معامل المرونة و مقاومة إجهاد الشد، و إن كان النمط الأخير هو الأعلى في كلا الحالتين وبنسبة تعادل 64%، 223% على التوالي مقارنة بنتائج العينات المصممة (القيمة الأدنى في كل العينات). بينما حققت العينات النمط المعين أعلى إستطالة و كذلك أعلى معدل إنفعال عند الكسر من بين كل أنواع الأنماط، تلتها عينات النمط السداسي، و هذا راجع إلى قابلية الشكل للإنحراف و الإستطالة أكثر من غيره من الأشكال.

Johansson و زملائه [24] سنة 2016 قدموا دراسة تتعلق بتعزيز الخصائص الميكانيكية لمنتجات تقنية (FFF) Fused Filament Fabrication من خلال التحقيق في جانبين أساسيين: المقارنة بين قوة أنواع مختلفة من المواد الخام و تأثير معاملات عملية الطباعة للتقنية (سمك الطبقة، سرعة التعبئة، درجة حرارة البثق، معدل البثق، تهوية محيط البناء). اعتمد الباحثون في دراستهم لتأثير هذه العوامل على تنفيذ اختبار الشد (أقصى حمل بالنيونتن) حيث قُسم الاختبار إلى قسمين: قسم لعقد مقارنة بين قوة تحمل المواد المختارة للدراسة (ABS، PLA، PET، Nylon، TPU) و القسم الثاني لدراسة تأثير معاملات العملية على قوة الترابط بين طبقات العينات المطبوعة تحت تأثير قوة الشد. أشارت نتائج القسم الأول من الاختبارات إلى أن (PLA) هي المادة الأقوى في المجموعة المختبرة تلتها (PET) غير أنها تُظهر سلوك مرن أكبر من (PLA) وكلا المادتين تعد من المواد المتينة مقارنة بمادة (ABS) الأكثر استخداماً في مجال الطباعة ثلاثية. أما مادة (TPU 95) لم تسجل لها أي نتائج لعدم ثبات العينات وإنزلاقها من بين فوك آلة الاختبار. كما أشارت نتائج اختبار التحميل للعينات المطبوعة من جميع المواد قيد الدراسة إلى تقارب كبير بين نتائج التحميل للعينات المطبوعة بنسب موازي لإتجاه تحميل القوى (Longitudinal) و الأخرى المطبوعة بنسب عمودي على إتجاه تحميل القوى (Transversal) باستثناء مادة Flashforge branded PLA فقد سُجل انخفاض في قوى التحميل للعينات المطبوعة بنسب عمودي على قوى التحميل المستعرض.

المتغيرات تفاعلات بنجم عنها تأثيرات أخرى تختلف عن تأثيراتها بشكل مستقل. ونظراً لأهمية هذا الموضوع انكب كثير من الباحثون على دراسة تأثير هذه المتغيرات. سنستعرض فيما يلي آخر الأبحاث المنشورة في هذا الموضوع ثم نحاول تلخيص نتائج هذه البحوث في نقاط ترسم بوضوح معالم سلوك هذه المتغيرات لتكون دليل للمستخدم يستفيد منها في تحسين الخصائص الميكانيكية لمنتجاتهم وبدون أي تكلفة إضافية. الجدول (1) يعرض مختصر لكل المعاملات التي تم دراستها و القيم التي تم اختبارها لكل معامل ثم القيم المثالية التي حققت أقصى تعظيم لخصائص النموذج المطبوع.

سنة 2015 قَدَّم Guan [18] وزملائه بحث مختبري لدراسة تأثير مسافة الفراغ بين المسارات (AG) على مقاومة الانحناء لمنتجات تقنية النمذجة بالصر و الترسب بنوعها التقليدي التي تعمل بنظام الطبقات المستوية (planar layer FDM)، وتلك التي تعمل بنظام الطبقات المنحنية (Curved layer fused deposition modeling) عند استخدامها لبناء الأسطح المنحنية. أشارت النتائج بوضوح إلى تدهور مقاومة الانحناء للعينات المنتجة بالتقنيتين مع ازدياد مسافة الفراغ، و من خلال الجمع بين نتائج اختبار الانحناء و صور الفحص المجهرية، استخلص الباحثون أن السبب في ذلك يرجع لتقلص مساحة الترابط بين حبيبات النسيج (Beads bound) مع ازدياد قيمة الفراغ بينها. كما أشارت نتائج الدراسة إلى تفوق تقنية (CLFDM) على التقنية التقليدية (FDM) في دقة مقاسات و جودة أسطح منتجاتها بسبب الحد من ظاهرة التدرج في طبقات الأسطح المنحنية (stair-stepping effect)، و يرجع الفضل في ذلك إلى أسلوب التقنية المختلف عن الطريقة التقليدية في بناء الأسطح المنحنية.

Baich و زملائه [19] قدموا سنة 2015 بحث درسوا فيه تأثير تصميم نمط التعبئة على الخصائص الميكانيكية (الشد، الضغط، الإنحناء) لعينات مصنوعة من مادة (ABS) و باستخدام تقنية (FDM). لقد أثبتت نتائج اختبارات خصائص الشد أن نمط التعبئة المصمت هو الأقوى من بين جميع الأنماط المختبرة. كما أشارت النتائج إلى أن معامل المرونة و أقصى إجهاد للعينات ذرات الكثافة المضاعفة كانت أقل من عينات الكثافة العالية و المنخفضة و هذا يقودنا إلى أن ارتفاع كثافة مادة العينة قد لا تعني زيادة في قوتها و ذلك فيما يخص خصائص شد. أما اختبارات الضغط فقد سجلت نتائج البحث تباين كبير في قيم معامل مرونة الضغط بين الأنماط و هذا يشير إلى أن هذه الخاصية تعتمد بقوة على نمط التعبئة التي يملأ بها لب العينة. كما استنتج الباحثون أن مقاومة الضغوط تزداد مع ازدياد تعقيد تصميم نمط التعبئة. أما نتائج مقاومة الإنحناء أشارت إلى أن مقاومة الإنحناء تزداد مع ازدياد كثافة النمط مع ملاحظة تقارب نتائج مقاومة الإنحناء لعينات الكثافة المنخفضة مع عينات الكثافة العالية مما يسلط الضوء على إمكانية التوفير في المادة مع تحقيق نفس النتائج عن طريق استخدام النمط المناسب للنتائج المطلوب تحقيقها.

Letcher و زملائه [20] سنة 2015 درسوا تأثير عدد الطبقات و زاوية المسار على الخصائص الميكانيكية (مقاومة الشد، معامل المرونة، و أقصى إستطالة) لعينات الشد المصنوعة من مادة (ABS) باستخدام تقنية (FDM). أثبتت نتائج الدراسة أن أفضل خصائص ميكانيكية للعينات تكون عند الزاوية صفر لمسارات نسيج الطبقات؛ والتي تحقق توازي بين اتجاه المحور الطولي لألياف النسيج مع اتجاه قوى التحميل. كما أثبتت الدراسة الازدياد الواضح لكلاً من مقاومة الشد و معامل المرونة للعينات مع ازدياد عدد الطبقات إلى حد 12 طبقة، بعدها يستمر الإزدياد ولكن بمعدل أضعف من السابق، الأمر الذي يمكن من حفظ تكاليف و زمن الطباعة عن طريق استبعاد الطبقات الغير ضرورية و التي لا تضيف الشيء القيم لخصائص المنتج و تكون عبء عليه.

Lanzotti و زملائه [21] سنة 2015 انجزوا بحثاً درسوا فيه تأثير سمك الطبقة، زاوية المسار، عدد الإطارات على الخصائص الميكانيكية لعينات الشد المصنوعة من مادة (PLA) باستخدام تقنية (FDM). استخدم الباحثون طريقة Response Surface Methodology والتي تُمكن من قياس التأثير المشترك للمعاملات المقاسة فضلاً عن تأثيراتها المستقلة.

الباحثون على السبب في الاختلاف في معامل المرونة بين للأنماط المختبرة راجع إلي درجة تعقيد مسارات الترسيب و عدد نقاط الإتصال بينها.

Rankouhi وزملائه [28] قدموا دراسة سنة 2016 عن تأثير سمك الطبقة و إحدائيات البناء على خصائص اختيار الشد (مقاومة الشد القصوي، معامل المرونة) للعينات المصنوعة من مادة (ABS) باستخدام تقنية (FDM). أكدت المؤشرات الإحصائية لجدول ANOVA وجود تأثير قيم لهذه المتغيرات على خصائص قوى الشد. كما أوضحت النتائج أن سمك الطبقة الأقل للمستويان المقاسان (0.2، 0.4 ملم) هو السمك الأمثل الذي حقق أعلى القيم في كل الخصائص المقاسة. أما بالنسبة لإحدائيات البناء كانت الزاوية 0° هي الزاوية المثلى التي تحقق توافق بين اتجاه قوى التحميل مع اتجاه محور انسجة البناء. ولقد أكد الباحثون نتائجهم من خلال تصوير نسيج البناء لمنطقة الكسر للعينات والتي أوضحت صغر حجم الفراغات الموجودة في العينات المبنية بسمك طبقة 0.2 ملم مقارنة بحجم الفراغات الموجودة في العينات الأخرى المبنية بسمك طبقة أكبر. وكما هو معلوم فإن وجود الفراغات بحجم كبير يضعف متانة المادة و يُعجل بإنهيارها.

Mahmood و زملائه [29] أدخلوا سنة 2017 دراسة متغير مختلف عن معاملات عملية النمذجة وهو؛ دراسة تغير أبعاد (السمك و العرض) مقطع العينات بالإشتراك مع تأثير عدد الإطارات؛ لإعتقادهم بأنها المؤثرات الأهم على قيمة مقاومة الشد القصوي، اضافوا إليها نسبة التعبئة كإربع متغيرات باستخدام طريقة Taguchi's design of experiment لتحديد مستويات المعاملات و عدد العينات الكافية لدراسة تأثير هذه المعاملات. استخدم الباحثون مادة (ABS) لبناء عينات الشد وفق المواصفة المعيارية ISO-527:2012 Type 1B المصممة لدراسة تأثير تغير مساحة مقطع عينات الشد، وذلك باستخدام تقنية (FFF) (fused filament fabrication) وهو الأسم المناظر للأسم الشائع الاستخدام (FDM). أشارت نتائج الدراسة إلي العلاقة العكسية القوية لتعاظم مساحة مقطع العينات مع قيمة مقاومة الشد القصوي. بالإضافة إلي ذلك سجلت نتائج الاختبارات تعاظم مقاومة الشد للعينات مع زيادة عدد الإطارات و نسبة التعبئة المستخدمة؛ وهذا يتفق مع نتائج البحوث الأخرى.

لمزيد من المحاكاة الواقعية لظروف العملية قام Qattawi وزملائه [30] بتقديم بحث سنة 2017 قاموا فيه بدراسة تأثير ستة من معاملات النمذجة بتقنية (FDM) (سمك الطبقة، إحدائيات النموذج، سرعة التعبئة، درجة حرارة البثق، نسبة التعبئة، نمط التعبئة) على خصائص مقاومة الشد للنماذج المصنعة من مادة PLA. قام الباحثون باختبار تأثير كل معامل بشكل مستقل وفي أربعة مستويات ما عدا معامل إحدائيات موضع النموذج فكان في ثلاثة مستويات فقط، نظراً لطبيعة المعامل. لقد اشارت النتائج إلي أن عدد ثلاثة معاملات فقط (سمك الطبقة، إحدائيات النموذج، درجة حرارة البثق) كان لها تأثير ملحوظ على مقاومة الشد. كما أشارت النتائج إلي أن أعظم قيم لمقاومة الشد يمكن تحقيقها تكون عند الطباعة بأعلى مستويات درجة حرارة البثق و سمك الطبقة بشرط أن يكون اتجاه إحدائيات البناء في اتجاه قوة التحميل المسلطة.

لقد أجري Dudescu وزملائه [31] دراسة سنة 2017 لتقييم تأثير نسبة التعبئة، نمط التعبئة (0°-90° and، rectilinear 0°- 90°، triangular، full honeycomb، fast honeycomb، 45°-45° and wiggly) ، زاوية مسارات التعبئة (Raster angle) على الخصائص الميكانيكية (الشد) لمنتجات تقنية (FDM) المصنعة من مادة ABS. لقد أقتصرت البحث على دراسة التأثير المستقل للمعاملات و أهمل التأثيرات المشتركة لها. عند دراسة تأثير نسبة التعبئة على خصائص الشد للعينات تم تحديد النمط Rectilinear، و 0° كمقدار لزاوية المسارات (Raster angle). أثبتت الاختبارات أن أعلى قيم لخصائص الشد محل الدراسة (متانة الشد، معامل المرونة، أقصى انفعال) كانت عند أعلى مستوى لنسبة التعبئة. بينما أختبر تأثير نوع نمط التعبئة عند نسبة التعبئة 100% و الزاوية 0° فكان Wiggly هو النمط المثالي لتحقيق أعلى قيم لكلاً من إجهاد الشد ومعامل المرونة، أما أقصى انفعال فكان عند استخدام النمط Full

هذه النتائج تشير إلي أن العينات التي سجلت تقارب بين وضعي التحميل أنها تمتلك نسيج مترابط بشكل كبير جداً. أما بالنسبة للقسم الثاني من الإختبارات فإظهرت نتائج قيمة عالية لتأثير المعاملات المختبرة على خصائص الشد للعينات باستثناء تأثير معامل تهونة المحيط فقد أظهرت تحسن غير كبير عند الطباعة بالنظام العادي (جميع نوافذ مغلقة و مروحة التبريد تعمل) و النظام المغلق (جميع النوافذ مغلقة و المروحة لا تعمل). كما سجل تحسن ملحوظ لنتائج التحميل عند الطباعة بالمستوى الأعلى لدرجة حرارة البثق، المستوى الأدنى لسمك طبقة البناء، المستوى الأعلى لمعدل البثق، وكذلك المستوى الأدنى لسرعة التعبئة. بالإضافة إلي ذلك أشارت النتائج إلي التأثير العكسي لسرعة التعبئة على قدرة التحميل فالتعبئة باستخدام مستوى عالي من السرعة يفتح الفرصة لتكوين الفراغات الكبيرة و المتوسطة والتي تعد نقاط ضعف تؤدي إلي الإنهيار المبكر للمادة. جميع القيم المثالية التي سجلتها نتائج البحث كانت تدعم قوة الترابط بين أنسجة الطبقة الواحدة وكذلك بين الطبقات المتجاورة الأمر الذي ينتج عنه تعزيز ملحوظ في قوى التحميل التي يمكن للعينات تحملها.

Liu وزملائه [25] قدموا بحث سنة 2016 يدرس تأثير إحدائيات موضع البناء، سمك الطبقة، زاوية المسار، عرض المسار، المسافة البيئية (باعتبارها المعاملات الأكثر تأثيراً على عملية النمذجة) على الخصائص الميكانيكية (الشد، الإنحناء، الصدم) لمادة (PLA) باستخدام النمذجة بالصهر والترسيب. و بالإعتماد على طريقة Taguchi تم تحليل و تقييم تأثير المعاملات الخمسة على خصائص العينات باستخدام طريقة تحليل الانحراف ANOVA كما استخدم الباحثون طريقة gray relational analysis لغرض تحليل التأثير المشترك و المتداخل للمعاملات المقصودة في هذه الدراسة و تحديد القيم المثالية لهذه المعاملات التي تحقق التحسين الأمثل و الشامل لجميع مخرجات العملية. لقد خلصت نتائج البحث إلي وجود إختلاف في طبيعة تأثير المعاملات بالنسبة للمخرجات الثلاثة (الشد، الإنحناء، الضغط) فالمستوى المثالي لأي من المعاملات يتغير بتغير المخرج، فعلى سبيل المثال يحقق المستوى الأدنى لسمك الطبقة أكبر قيمة لمقاومة الشد بينما يكون تحقيق أقصى قيمة لمقاومة الإنحناء و الصدم عند المستوى الأعلى لسمك الطبقة و ليس الأدنى. لقد حدد الباحثون القيم المثالية للمعاملات التي تحقق تعظيم قيم المخرجات كلاً على حده باستخدام (S/N Ratio) فكانت أقصى قوة لمقاومة الشد عند المستوى الأدنى لسمك الطبقة و المسافة البيئية و نمط التعبئة بالزاوية 0°. لقد سجلت أعلى قيمة لمقاومة الإنحناء عند المستوى الأعلى لسمك الطبقة و عرض المسار و المستوى الأدنى لباقي المعاملات. أما مقاومة الصدم فكانت أقصاها عند المستوى الأعلى لكلاً من سمك الطبقة و عرض المسار، و المستوى المتوسط للمسافة البيئية، 45°/45°- لنمط التعبئة. بالإضافة إلي ذلك أوجد الباحثون القيم المثالية للمتغيرات التي تحقق تعظيم الأقصى الممكن لكل المعاملات في نفس الوقت و ذلك باستخدام (gray relational analysis).

Alvarez وزملائه [26] قدموا دراسة سنة 2016 عن تأثير نسبة التعبئة على الخصائص لميكانيكية (مقاومة الشد، مقاومة الصدم) للعينات المصنعة من مادة (ABS) باستخدام تقنية (FDM). أشارت نتائج الدراسة إلي العلاقة الطردية بين نسبة التعبئة وكلا الخاصيتان حيث رُصدت أعلى قيم لمقاومة الشد و الصدم عند نسبة التعبئة 100%. و بمقارنة القيم القصوي التي تم التحصل عليها من هذه الدراسة مع قيم دراسات سابقة؛ استنتج الباحثون أن نوع و إمكانيات الطباعة المستخدمة، جودة المادة الخام و خلوها من الرطوبة التأثير المهم على نتائج الإختبار؛ لذلك أكد الباحثون على أهمية اعتبار هذه المتغيرات و أثرها على النتائج.

Fernandez-Vicente و زملائه [27] درسوا سنة 2016 تأثير نوع نمط التعبئة و نسبة التعبئة على خصائص الشد للعينات المصنوعة من مادة (ABS) باستخدام تقنية (FDM). لقد أوضحت نتائج الدراسة إلي أن مدى التغيير في نتائج خصائص الشد بسبب تغيير نمط التعبئة يقع ضمن نسبة لا تتجاوز 5% من أقصى إجهاد سُجل، وأن أعلى قيمة لمقاومة الشد سُجلت عند استخدام النمط الخطي (rectilinear pattern) بالإشتراك مع نسبة التعبئة 100%. بينما كان نمط بيوت النحل (honeycomb pattern) هو النمط الأقوى في حالة استخدام نسبة التعبئة أقل من 100%. كما علق

Dong و زملائه [35] سنة 2018 قدموا بحثاً درسوا فيه تأثير درجة حرارة البثق، سرعة التعبئة، سمك الطبقة و أضافوا إليهن سرعة مروحة التبريد على جودة بناء الهياكل الشعيرية (lattice structures) والتي تتكون من أذرع أفقية و أخرى مائلة، مستخدمين طريقة (Taguchi) لتحديد المعاملات المؤثرة في العملية. أشارت نتائج البحث إلى إختلاف القيم المثالية لمعاملات عملية الطباعة بين الحالتين (الأذرع الأفقية و المائلة)، ومن أبرز ما أثبتته النتائج إن استخدام التبريد في حالة الأذرع المائلة يحسن من جودة العملية، بينما لوحظت أحسن النتائج في حالة الأذرع الأفقية تكون عند عدم استخدام مراوح التبريد. كما أشارت النتائج أيضاً إلى أن القيم المثالية التي حسنت من جودة طباعة الهياكل قد عززت في الوقت نفسه الخصائص الميكانيكية لها؛ وذلك من خلال ما توصلت إليه نتائج اختبار الضغط الذي نفذه الباحثون لبحث هذه النقطة.

Cho و زملائه [36] أجروا دراسة معملية سنة 2019 على تأثير نوع نمط التعبئة و سمك طبقة البناء على مقاومة الشد للعينات المصنوعة من مادة (PLA) باستخدام تقنية (FDM). استخدم الباحثون طريقة Taguchi لتصميم مواصفات عينات الإختبار بما يحقق إختبار جميع مستويات المعاملات في أقل عدد ممكن من الإختبارات. كما استخدم الباحثون طريقة (ANOVA) و S/N ratio لتوضيح و قياس تأثير المعاملات على مخرجات العملية (خصائص الشد)، استنباط النموذج الرياضي الممثل للعلاقة بين المعاملات ومخرجات العملية و تحديد القيم المثالية للمعاملات التي تحقق تعظيم قيم المخرجات. لقد أشارت نتائج الدراسة إلى أن تأثير سمك الطبقة يفوق تأثير نمط التعبئة و أن القيم المثالية لهذه المعاملات حددت عند المستوى الأعلى لسمك الطبقة و النمط المثالي المستخدم لتعبئة لب العينات.

Zaman و زملائه [37] سنة 2019 تناولوا دراسة تأثير كلاً من سمك الطبقة، عدد الإطارات، نمط التعبئة و نسبة التعبئة على مقاومة الضغط، لمادتين مختلفتين (PLA، PETG). لقد اعتمد الباحثون في تقييمهم لتأثير هذه المتغيرات على حالة دراسية واقعية (مثبت مقاب يستخدم لتنفيذ ثقب دقيقة جداً على جناح طائرة) وليست معملية. لقد قام الباحثون بتحديد المعاملات للدراسة و المتوقع أن يكون لها التأثير الأكبر على عملية الطباعة اعتماداً على ما ورد من نتائج في بحوث سابقة. استخدم الباحثون طريقة Taguchi's orthogonal array وحددوا مستويين فقط لكل متغير من المتغيرات الأربعة مع إهمال التأثير المشترك للمتغيرات و الإقتصار على التأثير المنفرد لكل متغير فإنحصر عدد مرات الإختبار إلى ثمانية (L8). أشارت نتائج التحليل الإحصائي ANOVA إلى أن نسبة التعبئة هي المعامل المسيطر (بعلاقة طردية) على العملية في كلا الحالتين (PLA، PETG) ، يليها عدد الإطارات ثم سمك الطبقة بتأثير ضعيف جداً و لا يوجد أي تأثير لنمط التعبئة بالنسبة للإختبارات التي أجريت على (PLA)، كما لوحظ عدم وجود أي تأثير لعدد الإطارات و سمك الطبقة في حالة (PETG).

Mutyala و زملائه [38] سنة 2019 قدموا بحثاً تناولوا فيه دراسة تأثير سمك طبقة البناء، إحداثيات البناء، سرعة التعبئة على الخصائص الميكانيكية المتمثلة في مقاومة الشد و مقاومة الضغط للعينات المطبوعة بتقنية (FDM) من المادة الطبية CFR- PEEK. استخدم الباحثون طريقة full factorial design لتحديد قيم المتغيرات لكل عينة و تحديد العدد الأقل و الكافي من العينات لاختبار تأثير المعاملات (بشكل مستقل و مشترك) قيد الدراسة. لقد أثبتت الدراسة أن للمعاملات الثلاثة تأثير فعال مستقل وتأثيرات مشتركة لنواتج تفاعل تأثيراتها على مقاومة الشد للعينات، و كانت القيم المثالية للمعاملات المدروسة في حالة مقاومة الشد عند المستوى الأدنى لكلاً من سمك الطبقة و سرعة التعبئة و الزاوية 0° لموضع طباعة العينة. أما بالنسبة لمقاومة الضغط فلم يكن لسرعة التعبئة و لا لتفاعلات تأثير المعاملات الثلاثة أي أثر يذكر، وهذا يشير إلى أن تأثير كلاً من سمك الطبقة و إحداثيات الطباعة تأثير مستقل عن الآخر. وسجلت أقصى مقاومة للضغط عند المستوى الأدنى لسمك الطبقة، المستوى المتوسط لسرعة التعبئة و الزاوية 90° لإحداثيات موضع طباعة العينة. كما أشارت النتائج إلى ظهور تأثير ملحوظ لسرعة التعبئة على مقاومة الشد ولكن بالمقابل لم يظهر تأثير يذكر للسرعة على مقاومة الضغط.

وذلك تم اختبار تأثير زاوية مسارات التعبئة عند نسبة التعبئة 100% و باستخدام نمط (rectilinear) فأشارت النتائج إلى أن الزاوية 0° هي الزاوية التي حققت أعلى قيمة بنسبة تحسن تقدر بـ 31% لمتانة الشد مقارنة بأقل قيمة سجلت عند الزاوية 45°، وبنسبة تحسن في أقصى إنفعال يقدر بنسبة 12% مقارنة بأقل قيمة سجلت عند الزاوية 90°، ولم يسجل أي تأثير لزاوية المسارات على معامل المرونة وهذا راجع إلى أن معامل المرونة يعتمد على متانة المادة وقوة الترابط بين حبيبات النسيج وليس على اتجاهات النسيج التي تتحكم فيه زاوية مسارات التعبئة.

Raney و زملائه [32] سنة 2017 درسوا تأثير كلاً من نسبة التعبئة و اتجاه إحداثيات بناء العينة على مقاومة الشد للمادة ABS المستخدمة لبناء عينات الشد باستخدام تقنية (FDM)، ومن خلال معرفة سلوك و تأثير هذه العوامل سعي الباحثون إلى تحقيق أعلى قيمة لنسبة مقاومة الشد إلى الوزن. كما درس الباحثون مدي التدني في مقاومة الشد للمادة عند معالجتها باستخدام هذه التقنية بالمقارنة بموصفات المادة المنصوص عليها من الجهة المصنعة لها. أكدت نتائج الدراسة وبقوة 5% إلى حدوث تدني مقاومة المادة إلى نسبة 92% من قوتها الأصلية عند تشكيلها باستخدام تقنية (FDM). كما أشارت نتائج البحث إلى أن قوة مقاومة العينات المختبرة بأحمال عمودية على نسيج الطبقات تعادل من 74% إلى 79% من قوة مقاومة العينات المختبرة بأحمال موازية لنسيج طبقات العينات؛ وهذا يثبت التأثير الواضح لاتجاه إحداثيات بناء العينات على قوة مقاومة المادة. أما بالنسبة لتأثير نسبة التعبئة فقد أشارت نتائج البحث إلى التأثير الإيجابي الطردي لنسبة التعبئة وهي من النتائج المثبتة في كل البحوث السابقة.

Li و زملائه [33] سنة 2017 قدموا دراسة عن تأثير سمك الطبقة، سرعة التعبئة، نسبة التعبئة على قوة الترابط بين الأنسجة و مقاومة الشد للعينات المصنوعة من مادة PLA باستخدام تقنية (FDM). لقد استخدم الباحثون نموذج (bilinear elastic-softening cohesion zone) لتمثيل منطقة التداخل بين ألياف النسيج و الطبقات. أشارت نتائج الدراسة إلى أن لسمك الطبقة التأثير الأقوى من بين المعاملات المقاسة، يليها في التأثير سرعة التعبئة؛ و تأتي نسبة التعبئة في المرتبة الثالثة و الأخيرة؛ وهي نتيجة غريبة؛ أن تكون سرعة التعبئة أكبر تأثيراً من نسبة التعبئة. كما أشارت نتائج اختبار النموذج الرياضي من موثقية النموذج في تحديد أقصى إجهاد يمكن للعينة تحمله مبنية على ضوء حالة قوة الترابط بين الأنسجة الناتجة عن تغير معاملات عملية الطباعة المقاسة. كما أشار الباحثون إلى إمكانية استخدام النموذج في توقع قيمة مقاومة الشد في ظل متغيرات معاملات عملية الطباعة، و تمثيل سلوكها في التأثير على مقاومة إجهاد الشد للعينات.

Deng و زملائه [34] سنة 2018 أنجزوا دراسة تناولت تأثير أربعة من العوامل المؤثرة في عملية النمذجة (FDM) و باستخدام مادة (polyether-ether-ketone (PEEK) وهي سمك طبقة البناء، سرعة التعبئة، درجة حرارة البثق و نسبة التعبئة على ثلاثة مخرجات من الخصائص الميكانيكية لمنتجات التقنية وهي مقاومة الشد، معدل الاستطالة، و معامل المرونة. استخدم الباحثون طريقة (orthogonal array design) لتحديد قيم المتغيرات لكل عينة وهي من ضمن الطرق البسيطة لتصميم التجارب Design of Experiment يعيها أنها لا تأخذ بعين الاعتبار تأثير تفاعل المعاملات وهذا يُعد قصور في البحث كما تم الإشارة إليه سابقاً. لقد دلت نتائج البحث إلى أن أعلى قيمة لخصائص الشد تم رصدها عند أعلى مستوى لسرعة الطباعة و درجة حرارة البثق، بينما كان سمك الطبقة عند أدنى مستوى له، و نسبة التعبئة عند المستوى المتوسط. رغم أن نتائج البحث أشارت إلى أن أعلى قيم لمقاومة الشد سُجلت عند المستوى الأعلى للقيم التي تم اختبارها إلا أنه يجب الإنتباه إلى أن أعلى قيمة في مدى قيم السرعة التي تم اختبارها تعتبر سرعة متوسطة وليست عالية كما اعتبرها الباحث وذلك بالمقارنة بالبحوث الأخرى، لذلك حققت نتائج جيدة. كما أجري الباحثون اختبار الصدم و الإنحناء عند القيم المثالية التي تم رصدها في حالة اختبار الشد و أشارت الأختبارات إلى نتائج مرضية جداً مقارنة بالمواد البلاستيكية عالية الأداء.

في جميع الأنسجة المكونة للطبقات، هذا الانفصال يعرف (intra-layer fracture). أما عند الطباعة بالزاوية 45° تحديداً فإن كلا النوعين يحدثان بشكل متزامن. في مثل هذه الحالة تكون قيمة مقاومة الكسر وسط بين القيمتين السابقتين. يتعلق تأثير زاوية البناء بمدى توافق محور تحميل القوى المسلطة مع المحور الطولي لأنسجة الطبقات. أما تأثير سمك الطبقة فأشار الباحثون إلى أهمية هذا العامل وأن تأثيره لا يقتصر على زمن التشغيل فقط، بل يتعداه إلى التأثير على الخصائص الميكانيكية وبشكل فعال. حيث أشارت النتائج إلى أن الخصائص الميكانيكية لمقاومة الشد تتعزز بانخفاض مستوى سمك الطبقة المستخدم، و أرجعوا السبب في ذلك إلى أن إزدياد سمك الطبقة يُعد الباق أكثر عن سطح الطبقة السابقة، الأمر الذي يؤدي إلى تقليل الضغط على المادة المثقبة أثناء عملية البثق، وبالتالي يبقى فراغ دقيق فاصل بين الطبقات ينتج عنه انخفاض قوة الترابط بينهما. كما أشارت نتائج البحث إلى وجود علاقة طردية لنسبة التبعية مع كل الخصائص الميكانيكية لمقاومة الشد لأنها مرتبطة ارتباط مباشر بكمية المادة الموجودة في وحدة الحجم لمقطع العينة؛ فكلما إزدادت كمية المادة كلما إزدادت قوة المقاومة. إضافة إلى ذلك أشارت نتائج البحث إلى أن لدرجة حرارة البثق تأثير طردي تزداد معها خصائص مقاومة الشد إلى حد معين بعدها يحدث إنخفاض تدريجي في كلاً من مقاومة الشد و معامل المرونة، وإنخفاض حاد في مقدار الإنفعال عند نقطة الكسر. فرفع درجة الحرارة إلى المستوى المتوسط يزيد من سيولة المادة مما يساعد في إندماج الأنسجة المتجاورة و كذلك الطبقات وهذا يعزز قوة الترابط بينها. أما الإرتفاع المفرط للحرارة عادةً ما يؤدي إلى تدهور خصائص المادة بسبب الحرارة الزائدة والذي يعرف (Thermal degradation).

Abeykoon وزملائه [42] قدموا بحث سنة 2020 لدراسة تأثير نسبة التبعية، سرعة التبعية، نمط التبعية على الخصائص الميكانيكية (معامل المرونة للشد، معامل المرونة للإحناء، معامل المرونة للضغط) لعينات طبعة من عدة مواد (Acrylonitrile، Polylactic acid (PLA)، Carbon fiber reinforced، butadiene styrene (ABS)، Carbon fiber reinforced ABS (CFR-،PLA (CFR-PLA) ABS) and Carbon nanotube reinforced ABS (CNT-ABS) باستخدام تقنية (FDM) مع إضافة جديدة لأسلوب البحث في هذه المساحة حيث أضاف الباحثون اختبارات أخرى Thermal Morphological Differential، gravimetry analysis (TGA) (DSC) testing، scanning calorimeter (DSC) ، التي من شأنها أن تساعد في تحليل نتائج الاختبارات الميكانيكية الاعتيادية لدراسة تأثير متغيرات عملية النمذجة. لقد سجل الباحثون مجموعة من النقاط كنتائج لاختبارات هذا البحث تتفق مع ما سبقها من أبحاث أجريت على مواد أخرى أو بطرق مختلفة، ومن جملة هذه النتائج أن الخصائص الميكانيكية للمواد المستخدمة في الاختبار كلها تتعزز مع زيادة نسبة التبعية. اختيار المستوى المتوسط لسرعة التبعية يحقق انتظام في طرح المادة و يقلل من تكون الجيوب والفجوات التي من شأنها أن تضعف الخصائص الميكانيكية بشكل عام. أما فيما يخص نمط التبعية وجدوا أن النمط الخطي (Liner Pattern) هو أفضل نمط، فهو يحقق أكثر نقاط اتصال بين الأنسجة و الطبقات المتجاورة. ومن خلال المقارنة بين خمسة مواد مختلفة تم استخدامها لطباعتها بنفس التقنية (FDM) اتضح أن طبيعة المادة هي المسيطرة على متانة المنتجات، فتأثير متغيرات العملية لم يتغير بتغير نوع المادة. ومن أهم ما لاحظته الباحثون من خلال الاختبارات الحرارية (DSC) أن ليس لعملية التبلور (crystallization) (أثناء عملية التصلب) دخل في ما حدث من تحسن في الخصائص الميكانيكية دليل أن درجة حرارة التبلور لم تتغير بتغير معاملات العملية، فالتحسن الناتج في الخصائص الميكانيكية للعينات كان بسبب تأثير التغيير في معاملات العملية.

#### 4. تحليل النتائج

لكي يكون التحليل شامل وتفصيلي لكل ما توصل إليه الباحثون من نتائج تم تلخيص كل النتائج في الجدول (1) بحيث يمكن حصر كل معالم مدخلات ومخرجات العملية و القيم المثالية لمعاملات العملية التي توصلت إليها نتائج

Dey وزملائه [39] أنجزوا بحث سنة 2020 درسوا فيه تأثير كلاً من سمك طبقة البناء، إحدثيات البناء، نسبة التبعية و درجة حرارة البثق على عينات مصنعة من مادة PLA و باستخدام تقنية النمذجة بالصهر والترسيب على كلاً من مقاومة الضغط وزمن الطباعة. لقد استخدم الباحثون Faced Centered Central Composite Design (FCCCD) لتحديد عدد العينات و قيم معاملات عملية الطباعة (ثلاثة مستويات) لكل عينة اختبار، فهذه الطريقة هي أحد طرق (DOE) التي تستخدم عند الحاجة لتقليل عدد العينات بسبب إرتفاع كلفة إنتاجها أو طول زمن طباعتها. بعد تحديد قيم المخرجات لكل عينة استخدم الباحثون طريقة (Multi-objective particle swarm optimization) لتحسين مخرجات العملية من خلال تحديد القيم المثالية الضرورية لتعظيم قيمة المخرج الأول (مقاومة الضغط) وتصغير قيمة المخرج الثاني (زمن الطباعة). ونظراً لطبيعة العلاقة (عكسية) بين المخرجات بات من الصعب تحقيق المبتغي فيهما معاً، لذلك لجأ الباحثون إلى استخدام Pareto pointer الذي يوضح العلاقة بين المخرجات وبذلك يمكن معرفة قيم زمن الطباعة المناظرة لقيم مقاومة الضغط أو العكس، وبالتالي يمكن تحقيق توازن بين هذه المخرجات. أثبتت نتائج الدراسة أن ليس لدرجة حرارة البثق أي تأثير لا على مقاومة الضغط ولا على زمن الطباعة، فمقاومة الضغط تعتمد على قوة المادة لا على قوة الترابط بين الأنسجة في الطبقة الواحدة أو بين الطبقات المتجاورة، بينما يبرز و بوضوح تأثير درجة الحرارة على قوة الترابط بين الأنسجة والطبقات؛ من خلال زيادة سيولة الماد و تسهيل عملية الإندماج. كما سجلت الدراسة أفضل نتائج لكلا المخرجين باستخدام الزاوية 0° لوضعية بناء العينة. الزيادة في نسبة التبعية يعزز كثيراً من مقاومة الضغط بينما يكون تأثيرها سلبي على زمن الطباعة فهي تستهلك زمن طباعة أطول. كما أشارت الدراسة إلى أن الطباعة باستخدام أعلى مستويات سمك الطبقة تعزز و بشكل ملحوظ كلا المخرجين. غير أنه تجدر الإشارة إلى أن الدراسة لم تشير لنتائج التأثير المشترك للمعاملات محل الدراسة.

Heidari-Rarani وزملائه [40] قاموا بدراسة (2020) تأثير كلاً من سمك طبقة البناء، سرعة التبعية، نسبة التبعية (اختيرت لكونها أول المعاملات التي يغيرها المستخدمون لتخفيف وزن النماذج وتقليل زمن الطباعة) على خصائص الشد (معامل المرونة، أقصى مقاومة للشد، إنفعال الكسر) لعينات مطبوعة من مادة (PLA) و باستخدام تقنية النمذجة السريعة (FDM)، كما استخدموا طريقة Taguchi لتصميم مفردات تجربة الإختبار بهدف التقليل من عدد العينات الضرورية لدراسة طبيعة العلاقة بين معاملات العملية و مخرجاتها، لإيجاد أفضل قيم للمعاملات. كما استخدم الباحثون جدول ANOVA لتحديد المعاملات المستقلة و المشتركة المؤثرة و S/N ratio لتحديد طبيعة و قوة تأثير المعاملات و تفاعلاتها. ومن النقاط التي تحسب على الدراسة ضيق مدى قيم المعاملات سمك الطبقة و سرعة التبعية، فقد كانت في مستويين فقط، وهذا لا يعطي الثقة الكاملة في نتائج الدراسة. لقد خُص البحث إلى تحديد القيم المثلى للمعاملات الثلاثة، و أشارت إلى أن تأثير كلاً من سرعة التبعية و نسبة التبعية كان بعلاقة طردية لكل المخرجات (أقصى مقاومة للشد، معامل المرونة و إنفعال الكسر)، مع ملاحظة أن قيمة معامل سرعة البناء مصنفة حسب الدراسة بالمستوى الأعلى وهي في الواقع تصنف بالمستوى المتوسط حسب ما ورد في أغلب الدراسات الأخرى. بينما يظهر تأثير عكسي لسمك الطبقة على مقاومة الشد و معامل المرونة و العكس بالنسبة لإنفعال الكسر (تأثير طردي).

Wang وزملائه [41] قدموا بحثاً سنة 2020 قاموا فيه بدراسة تأثير سمك طبقة البناء، إحدثيات النموذج عند الطباعة، نسبة التبعية و درجة حرارة البثق على كلاً من خصائص مقاومة الشد (Elongation at break (%), Elastic Tensile modulus, Tensile strength) و الخصائص الديناميكية للنماذج المصنعة من مادة (PLA) باستخدام تقنية النمذجة بالصهر و الترسيب. لقد أشارت نتائج الإختبارات إلى أن لزاوية إحدثيات موضع النموذج عند الطباعة تأثير قوى على كل خصائص الشد للعينات، فعند الطباعة بزاوية أقل من 45° يحدث الكسر بسبب انفصال في قوى الترابط بين الطبقات والذي يعرف (interlayer fracture)، هذا الانفصال يشير إلى أن قوة الترابط بين الطبقات أضعف من مقاومة الشد للمادة. أما إذا كانت الزاوية أكبر من 45° فإن الكسر يحدث بسبب انفصال

هو إختلاف طبيعة المادة المرتبطة بدرجة سيولتها، فمن المهم جداً خلق توازن بين معدل تدفق المادة و سرعة التعبئة؛ فعدم التوافق بينهما يحدث عيوب كثيرة منها تغير وعدم انتظام قطر المادة المطروحة، الأمر الذي يولد نسيج غير متجانس الهيئة وبالتالي؛ ضعف قوى الترابط بين أنسجته. لهذا السبب أختلف مقدار سرعة التعبئة المثالي بين البحوث بإختلاف نوع المادة. ومن المهم الإشارة إليه أيضاً الإختلاف بين تأثير السرعة على مقاومة الشد ومقاومة الضغط، فهي إيجابية في الأولي و غير مؤثرة في الحالة الثانية. والسبب في ذلك يرجع إلي أن مقاومة الضغط تعتمد على درجة تعقيد تصميم نمط التعبئة والتي تلعب دور مهم في توزيع الأحمال [28].

● **تأثير نسبة التعبئة.** إتفقت كل البحوث وبكل وضوح على أن ارتفاع نسبة التعبئة يعزز بشكل عام الخصائص الميكانيكية للنموذج [23-31]. هذا السلوك يرجع إلي اعتماد قوى المقاومة على كتلة المادة الموجودة في وحدة الحجم.

● **تأثير نمط التعبئة.** أشارت كل البحوث التي تناولت دراسة تأثير هذا المعامل؛ أن له تأثير ملحوظ على الخصائص الميكانيكية بشكل عام وعلى مقاومة الضغط بشكل خاص. أشارت الأبحاث إلي أن مقاومة الضغط المتولدة تزداد مع إزدياد درجة تعقيد نمط التعبئة [19]. كما أرجعت أغلب البحوث إلي أن السبب في تأثير نوع نمط التعبئة راجع إلي مقدار ما يحققه من نقاط تماس بين الأنسجة و الطبقات المتجاورة وكذلك إلي درجة توزيع الأحمال المسلطة عن أضلاع الشكل الهندسي للنمط [32]، غير أن بعض الأبحاث أشارت إلي أن تأثيره يقل عن كلاً من تأثير سمك الطبقة و نسبة التعبئة [26]. كما سجلت بعض الأبحاث إختلاف ملحوظ في مقدار الإنفعال مع تغيير شكل النمط المستخدم، ويلاحظ أن أقصى إنفعال يكون مع الأنماط التي توفر حرية حركة أكبر لأضلاع الشكل الهندسي المستخدم. ويبدو ذلك واضحاً مما سجله Cristian [24] الذي اشار في بحثه إلي أن أقصى إنفعال يكون مع النمط Full honeycomb فهذا الشكل الهندسي يؤمن حرية حركة أكبر لأضلاعه من الشكل المربع مثلاً. أما في حالة اختيار مقاومة الشد فإن المصلح الذي يؤمن أكبر نسبة تماس مع الأشكال المجاورة له في النسيج هو الذي يحقق أعلى مقاومة للشد.

● **تأثير درجة حرارة البثق.** أجمعت كل البحوث التي تناولت تأثير درجة حرارة البثق على العلاقة الطردية بين درجة حرارة البثق و الخصائص الميكانيكية لقوى الشد. إن الإرتفاع الغير المفرط لدرجة الحرارة يزيد من سيولة المادة؛ وبالتالي يعزز عملية الإندماج بين مادة الأنسجة و الطبقات المتجاورة [21, 23, 25, 31]، بينما يؤدي الإرتفاع المفرط في درجة الحرارة إلي الدخول في حالة التحلل أو التذني الحراري وهذا من شأنه أن يضعف مقاومة المادة و بشكل ملحوظ [31]. كما أشارت بعض الأبحاث إلي انعدام تأثير درجة الحرارة على مقاومة الضغط، وذلك لكون هذه الخاصية تعتمد على قوة المادة وعلى الشكل الهندسي للنسيج أكثر من اعتمادها على قوة الترابط بين الأنسجة [29].

● **تأثير إحداثيات الموضع.** يترتب على وضعية إحداثيات النموذج بالنسبة لإحداثيات منصة العمل في الطباعة تحديد اتجاه نسيج الطبقات كما هو موضح بالشكل (2). ويترتب على هذا اتفاق أو تقاطع اتجاه تحميل القوى مع اتجاه النسيج كما هو موضح بالشكل (3). في حالة قوى الضغط إذا تعامدت قوى التحميل على اتجاه النسيج ينتج عنه أقصى مقاومة للضغط، والعكس بالعكس. أما في حالة قوى الشد إذا اتفق اتجاه التحميل مع اتجاه النسيج تكون المقاومة أقصى ما يمكن وإلا فيكون العكس أيضاً [31].

● **مؤثرات أخرى.** مع التأكيد التام على تأثير معاملات النمذجة التي تم التعرض إليها، يجب عدم إهمال مؤثرات أخرى قد تضيق الشئ القيم لمئاته النماذج المصنعة بهذه التقنية. ومن أمثلة هذه المؤثرات؛ التي أشار إليها Alvarez [26]: إمكانيات الطباعة المستخدمة. جودة وخلو المادة الخام المستخدمة من الرطوبة. يكمن تأثير مثل هذه المؤثرات في إعاقته لتفعيل تأثير الضبط الرشيد لمعاملات الطباعة موضوع الدراسة. فمن المهم النظر لهذه المؤثرات قبل الشروع في ضبط معاملات العملية.

البحوث ومن ثم يمكن تحليل النتائج بموضوعية و الوصول إلي استنتاجات تضع القارئ أمام الصورة الكاملة لسلوك تأثير هذه المعاملات وبالتالي يمكن الاعتماد عليها في انجاز بحوث مستقبلية أو الإستفادة منها عملياً في الوصول إلي أفضل النتائج بكل سهولة ويسر. ومن خلال مراجعة ملخص نتائج البحوث المعروضة بالجدول تم استنباط الاستنتاجات التالية:

أ. تناولت الدراسة خمسة وعشرون بحثاً متعلقة بشكل مباشر بموضوع البحث ابتداءً من سنة 2015 و حتى 2020. رُتبت أولوية المعاملات حسب عدد البحوث التي تناولتها كما هو معروض بالجدول (2)، الأمر الذي يعطي انطباع واضح على مدى أهمية هذه المعاملات و توقع الباحثون فاعلة تأثيرها على مخرجات العملية.

ب. أشارت نتائج البحوث إلي أنه لا يوجد تأثير لطبيعة المادة الخام المستخدمة على سلوك و تأثير معاملات عملية النمذجة، فتأثيرها منفصل تماماً عن طبيعة المادة. فالتعزيز الناتج من الضبط الرشيد لهذه المعاملات يُحسن خصائص النموذج المنتج مهما كانت نوع المادة الخام المستخدمة [21]. وهذا السلوك أكد عليه Abeykoon و زملائه [32] عندما توصلوا إلي أن درجة حرارة التبلور للمادة لم تتغير بتغير قيم معاملات العملية وهذا يدل على أن التحسن الحاصل في نتائج العملية كان بسبب تأثير المعاملات على قوة الترابط بين مسارات المادة وليس على خصائص المادة.

ج. من خلال تتبع القيم المثالية التي توصل إليها الباحثون للمعاملات التي قاموا بدراسة تأثيرها على خصائص ميكانيكية معينة، يمكن استنباط السلوك العام لتأثير معاملات عملية النمذجة على النحو التالي:

● **تأثير سمك الطبقة.** يختلف تأثير سمك الطبقة بإختلاف الخاصية الواقعة تحت تأثيره. فمن الملاحظ أن خصائص الشد تتعزز بإنخفاض مستوى سمك الطبقة؛ ويرجع السبب في ذلك إلي إقتراب فوهة الباتق من مستوى الطبقة السابقة مما يولد قوة ضغط على المادة المطروح يدفعها إلي التفلطح، الأمر الذي يقلل من وجود فراغات بين مسارات المادة و إزدياد مساحة التماس مع المسارات المتجاورة [22, 25, 30, 31]. و من المعلوم أن مقاومة الشد تعتمد على قوة الترابط بين الأنسجة المتجاورة في الطبقة الواحدة وبين الطبقات بعضها مع بعض. ومن خلال مراجعة القيم المثالية لسمك الطبقة التي تم رصدها بالجدول (1) للعديد من البحوث يمكن القول بأن القيمة المثالية لهذا المعامل تتراوح بين 0.2—0.3 ملم. أما بالنسبة لخاصية مقاومة الضغط فإن تأثير سمك الطبقة على مقاومة الضغط يصنف من الضعيف إلي المتوسط وإنه يرتبط بعلاقة طردية مع مقاومة الضغط [27, 29]. بالإضافة إلي ذلك فإن لسمك الطبقة تأثير طردي على خاصيتي الإنحناء و الصدم وبمستوى يتراوح بين المتوسط إلي القوي.

● **تأثير عدد الطبقات.** من الطبيعي أن زيادة عدد الطبقات يزيد من سمك مقطع النموذج المنتج؛ وبالتالي يزيد من متانته، ولكن ليس من الضروري أن تظل هذه العلاقة ثابتة و بنفس المعدل. فمن المتوقع أن إزدياد عدد الطبقات عن حد معين قد يحول العلاقة إلي علاقة عكسية، أو على الأقل لا يضيف متانة إلي النموذج بقدر ما يضيف إليه من تكلفة إضافية غير ضرورية؛ وهذا ما أثبتته Letcher [20]. ومن المهم الإشارة هنا إلي أن إزدياد عدد الطبقات يزيد من التذبذب الحراري الناتج عن ارتفاع حرارة مقطع النموذج بسبب بناء طبقة جديدة ثم انخفاضها بحكم تسرب الحرارة للمحيط، فيتولد عن ذلك إجهادات داخلية قد تؤدي إلي تشققات صغيرة جداً تتوسع مع الإستعمال؛ وذلك في حالة طباعة منتجات نهائية تستخدم في تطبيقات تتعرض فيها لأحمال مختلفة.

● **تأثير سرعة التعبئة.** تؤثر سرعة التعبئة على الخصائص الميكانيكية للمطبوعات لما لها من تأثير على إنتظام طرح المادة فعند التعبئة باستخدام سرعة تعبئة عالية تقل فرصة تليدين المادة المطروحة وهذا يؤثر على اندماج المادة المطروحة مع ما سبقها من نسيج، وبالتالي ينتج عنها انفصال في الأنسجة المتجاورة مما يُضعف الترابط بين الأنسجة وتدهور متانة النسيج [21, 32]. أما استخدام سرعة تعبئة منخفضة يعرض المادة المبتوكة لحمل حراري لمدة أطول مما يعرضه إلي ظاهرة التذني الحراري [33] (Thermal Degradation). لذلك يفضل عموماً البحث عن المنطقة المتوسطة للسرعة مع مراعاة خصوصية المادة الخام المستخدمة. كما تجدر الإشارة إلي التباين الكبير في قيم سرعة التعبئة المثالية بين مختلف البحوث وهو مرتبط بإختلاف نوع المادة الخام المستخدمة، و السبب الأرجح في ذلك

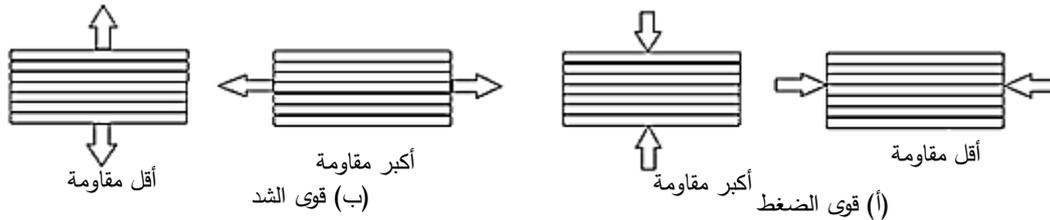
جدول (1) ملخص البحوث السابقة و القيم المثالية لتعزيز الخصائص الميكانيكية لمنتجاتها

القيم المثالية للمعاملات التي حققت أعلى قيم للخصائص الميكانيكية					قيم الإختبار	المعاملات المقاسة	المادة	المرجع		
مقاومة الصدم	مقاومة الضغط	مقاومة الإنحناء	الإستطالة	معامل المرونة						
		0.5			0.5، 0.7، 0.9، 1.1 ملم	المسافة البينية	ABS	Guan[18]2015		
	D4			D4	D1 D2 D3 D4	نمط التعبئة	ABSplus-P430	2015 Baich[19]		
				12	35--1	عدد الطبقات	ABS	Letcher [20] 2015		
				°0	°90 °45 °0	زاوية المسار				
			1.5	0.18	1.0 1.2 1.5 1.8 2.0 ملم	سمك الطبقة	PLA	Lanzotti [21] 2015		
				°0	°90 °72 °45 °18 °0	زاوية المسار				
		6	6		2 3 4 5 6	عدد الإطارات				
	0.3	0.3		0.3	0.2 0.3 0.4 ملم	سمك الطبقة	PEEK	Wu [22] 2015		
	°0	°0		°0	°45 °30 °0	زاوية المسار				
			D	H	H	S O H R D	PLA	Harpool[23]2016		
Max Load [N] at PLA					TPU 95، Nylon، PET، PLA، ABS			، PLA، ABS ، PET ، Nylon TPU 95	Johansson [24] 2016	
Max Load [N] at 0.1					0.1 0.2 0.3 0.4 ملم					
Max Load [N] at 10					10 50 90 130 ملم/ث					
Max Load [N] at 1.1					0.9 1.0 1.1% of default extrusion rate					
Max Load [N] at Closed design					Closed، Normal، Open			تهوية محيط الطباعة	PLA	Liu [25] 2016
°0		°0		°0	0° 30° 60°	احداثيات موضع البناء				
0.3		0.3		0.1	0.1 0.2 0.3 ملم	سمك الطبقة				
-45°/+45°		0°		0°	0° 0°/90° -45°/+45°	نمط التعبئة				
0.5		0.5		0.5	0.4 0.45 0.5 ملم	عرض مسار التعبئة				
0		-0.1		-0.1	0.1 0 0.1 ملم	المسافة البينية				
100				100	0، 5، 10، 15، ...، 100%	نسبة التعبئة	ABS	Alvarez [26] 2016		
			FUH	RL	RL	RL FUH L	نمط التعبئة	ABS	Fernandez-Vicente [27] 2016	
			%100	%100	%100	% 100 50 20	نسبة التعبئة			
				0.2	0.2	0.2 0.4 ملم	سمك الطبقة	ABS	Rankouhi [28] 2016	
				°0	°0	°90 °45 °0	إحداثيات البناء			
				4	4 6 8 ملم	سمك المقطع	ABS	Mahmood [29] 2107		
				15	10 15 20 ملم	عرض المقطع				
				2	1 2 3	عدد الإطارات				
				75	25 50 75 %	نسبة التعبئة				
			0.3	0.3	0.4 0.3 0.25 0.1 ملم	سمك الطبقة	PLA	Qattawi [30] 2017		
			Z	Z	X Y Z Z	إحداثيات البناء				
			185	185	175 180 185 205 C°	درجة الحرارة				
			غير مؤثر	90	70 90 120 170 [ملم/ث]	سرعة التعبئة				
			100%	100%	20 [%] 50 80 100	نسبة التعبئة				
			DF	DF	L H D FD	نمط التعبئة				
				100 %	20 40 60 80 100 [%]	نسبة التعبئة	ABS	Dudescu [31] 2017		
			FUH	W	RL(0°-90°) G(0°-90°)&(45°-45°) FAH FUH T W	نمط التعبئة				
			°0	90°	°0	0 30 45 90°			زاوية مسار التعبئة	

القيم المثالية للمعاملات التي حققت أعلى قيم للخصائص الميكانيكية						قيم الاختبار	المعاملات المقاسة	المادة	المرجع
مقاومة الصدم	مقاومة الضغط	مقاومة الإنحناء	الإستطالة	معامل المرونة	مقاومة الشد				
					Solid	Solid High Low	نسبة التعبئة	ABS	Raney [32] 2017
					Parallel	Parallel Diagonal vertical	إحداثيات البناء		
					0.5	0.35 0.3 0.25 0.2 0.15 0.1 0.5	سمك الطبقة	PLA	Li [33] 2017
					30	100 90 80 70 60 50 40 30	سرعة التعبئة		
					%100	% 100 90 80 70 60 50	نسبة التعبئة	polyether ether-ketone (PEEK)	Deng[34] 2018
			0.25	0.2	0.25	0.2 0.25 0.3	سمك الطبقة		
			20	60	60	20 40 60	سرعة التعبئة		
			370	360	370	350 360 370 C°	درجة الحرارة		
			40%	60%	60%	20 40 60 %	نسبة التعبئة		
			أذرع مائلة للهياكل		أذرع أفقية للهياكل			ABS	Dong [35] 2018
			°255	°245	°255 °245 °235 °225	حرارة البثق			
			1200	600	2400 1800 1200 600	سرعة التعبئة			
			0.1	0.2	0.2 0.1	سمك الطبقة			
			% 50	% 0	100 50 0	سرعة مروحة التبريد			
					T	ZZ T G	نمط التعبئة	PLA	Cho [36] 2019
					0.2	0.1 0.15 0.2	سمك الطبقة		
	0.2				0.2	0.2 0.3	سمك الطبقة	CFR-PEEK	Mutyala [37] 2019
	°90				°0	0° 90°	إحداثيات البناء		
	20				17	17 20 23.5	سرعة التعبئة		
	0.2					0.2 0.3	سمك الطبقة	PLA PETG	Zaman [38] 2019
	Diagonal					Leaner Diagonal	نمط التعبئة		
	70%					30 70 %	نسبة التعبئة		
	4					2 4	عدد الإطارات		
	0.34					0.1 0.22 0.34	سمك الطبقة	PLA	Dey [39] 2020
	0°					0° 45° 90°	إحداثيات البناء		
	80 %					20 50 80 %	نسبة التعبئة		
	230 C°					200 215 230 C°	درجة حرارة البثق		
				0.2	0.1	0.1 0.2	سمك الطبقة	PLA	Heidari-Rarani [40] 2020
					40	20 40	سرعة التعبئة		
					80 %	80 60 40 20 [%]	نسبة التعبئة		
			0.05	0.1		0.05 0.1 0.15 0.20	سمك الطبقة	PLA	Wang [41] 2020
				90		0° 15° 30° 45° 60° 75° 90°	إحداثيات النموذج		
			210	215		195 200 205 215 220 225 230 C°	درجة الحرارة		
				100		20 40 60 80 100 %	نسبة التعبئة		
				100%		100 90 70 50 40 30 25[%]	نسبة التعبئة	PLA· ABS CFR-PLA CFR-ABS CNT-ABS	Abeykoon [42] 2020
		90		90		110 100 90 80 70/s	سرعة التعبئة		
				Linear		L H M C S D Hi	نمط التعبئة		
				215		230 215 205 200 C°	درجة الحرارة		

### قائمة المختصرات و الرموز بالجدول

**L:** Linear, **H:** Hexagonal, **RL:** rectilinear, **G:** grid, **FAH:** fast honeycomb, **FUH:** full honeycomb, **R:** rectangular  
**T:** Triangular, **W:** wiggle, **M:** Moroccanstar, **C:** Catfill, **S:** Sharkfill, **Hi:** Hilbert, **D:** Diamond, **FD:** Diamond, **SO:** Solid, **ZZ:** Zig zag, **D1:** low infill patterns, **D2:** high infill patterns, **D3:** double dense infill patterns, **D4:** solid infill Patterns. **Open:** all printer windows are open and cooling fan is on, **Normal:** all printer windows are open and the fan is on, **closed:** all windows are closed and the fan is off. **PET :** polyethylene terephthalate glycol-modified



الشكل (3) العلاقة بين قوى التحميل واتجاه أنسجة المادة

الجدول (2) ملخص للمعاملات التي درست و عدد البحوث التي تناولت كل معامل

المعامل	سمك الطبقة	نسبة التعبئة	نمط التعبئة	سرعة التعبئة	احداثيات الموضع	درجة الحرارة	زاوية المسار	عرض المسار	عدد الإطارات	معدل البثق	نمط التهوية
عدد البحوث	10	8	8	6	5	5	1	1	1	1	1

ط. يكمن تأثير إحداثيات موضع بناء النموذج على مدى توافق محور تأثير القوة المسلطة مع الإتجاه الطولي لنسيج مجسم النموذج، فإذا كانا متوازيين كانت قيمة المقاومة للشد أقصى ما يمكن أما إذا تعامد كانت المقاومة أدنى ما يمكن، و العكس صحيح بالنسبة لقوى الضغط.

ي. يؤدي استخدام تقنية النمذجة (FDM) إلى تدني في الخصائص الميكانيكية للمادة الخام المستخدمة تقدر بنسبة 8%، يجب أخذها بعين الإعتبار عند اختيار التقنية لتصنيع منتج معين.

### 6. المراجع

- [1] Boparai, K. S., Singh, R., & Singh, H. (2016). Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review. *Rapid Prototyping Journal*.
- [2] Carneiro, O. S., Silva, A. F., & Gomes, R. (2015). Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design*, 83, 768-776.
- [3] Zhao, F., Li, D., & Jin, Z. (2018). Preliminary investigation of poly-ether-ether-ketone based on fused deposition modeling for medical applications. *Materials*, 11(2), 288.
- [4] Rahim, T. N. A. T., Abdullah, A. M., & Md Akil, H. (2019). Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites. *Polymer Reviews*, 59(4), 589-624.
- [5] Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369-378.
- [6] Deng, X., Zeng, Z., Peng, B., Yan, S., & Ke, W. (2018). Mechanical properties optimization of

### 5. الخلاصة

من خلال المراجعة الدقيقة لتفاصيل البحوث المتعلقة بموضوع الدراسة و عن طريق الربط بين نتائجها توصل الباحث إلى استنتاج النقاط التالية:

أ. أن الخصائص الميكانيكية لمنتجات تقنية النمذجة بالصهر و الترسيب تعتمد اعتماداً مباشراً و قوى على قيم معاملات (متغيرات) عملية النمذجة.

ب. لا يقتصر تأثير متغيرات عملية النمذجة (FDM) على الخصائص الميكانيكية للنماذج المنتجة باستخدام هذه التقنية، بل لها تأثيرات أخرى متزامنة مع تأثيرها على الخصائص الميكانيكية للنماذج، من أهمها تأثيرها على الخصائص الديناميكية، دقة المقاسات، جودة الأسطح للنماذج و زمن الطباعة.

ج. نتيجة لطبيعة و فكرة عمل التقنية و المتمثلة في بناء النماذج عن طريق نسج المادة على هيئة خيوط متجاورة لتكون طبقة، تندمج كل طبقة مع الطبقة التي تحتها و التي فوقها لتكون مجسم النموذج، فإن الخصائص الميكانيكية للنماذج المطبوعة بهذه التقنية تعتمد اعتماداً مباشراً على قوة الترابط بين الأنسجة المتجاورة و قوة الإندماج بين الطبقات المترابطة بعضها فوق بعض.

د. العمل بسمك طبقة رفيع يؤمن نقاط اتصال كثيرة بين الأنسجة تزيد من قوة الترابط بينها، غير أنه يزيد من زمن الطباعة. بالإضافة إلى ذلك يؤدي سمك طبقة الرفيع إلى اقتراب أكثر لفوهة الباتق من الطبقة المنجزة مما يولد ضغط أكثر على المادة يمنع تكون الجيوب و الفجوات داخل النسيج و التي تعد نقاط ضعف تسبب انهيار مبكر للمادة.

هـ. العمل بمستوى متوسط من سرعة التعبئة يحقق طرح منتظم للمادة يعزز ترابط جزيئاتها، وفي نفس الوقت يحفظها من التعرض للتحلل الحراري. و زيادة نسبة التعبئة يزيد من كتلة المادة في وحدة الحجم الأمر الذي يعزز قوة المقاومة بشرط اختيار نمط التعبئة المناسب.

ز. يدعم زيادة تعقيد نمط التعبئة الخصائص الميكانيكية بشكل عام و مقاومة الضغط بشكل خاص. وينسب السبب في ذلك إلى تحقيق أكبر عدد من نقاط التماس بين أنسجة المادة.

ح. رفع درجة حرارة البثق يدعم الخصائص الميكانيكية للمادة عن طريق زيادة سيولة المادة المطروحة التي تسهل عملية الإندماج بين الأنسجة و الطبقات المتجاورة. غير أن التسخين المفرط يعرض المادة لخطر التدني الحراري.

- [17] Deng, X., Zeng, Z., Peng, B., Yan, S., & Ke, W. (2018). Mechanical properties optimization of poly-ether-ether-ketone via fused deposition modeling. *Materials*, 11(2), 216.
- [18] Guan, H. W., Savalani, M. M., Gibson, I., & Diegel, O. (2015). Influence of fill gap on flexural strength of parts fabricated by curved layer fused deposition modeling. *Procedia Technology*, 20, 243-8.
- [19] Baich, L., Manogharan, G., & Marie, H. (2015). Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts. *International Journal of Rapid Manufacturing*, 5(3-4), 308-319.
- [20] Letcher, T., Rankouhi, B., & Javadpour, S. (2015, November). Experimental study of mechanical properties of additively manufactured ABS plastic as a function of layer parameters. In *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- [21] Pei, E., Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G., & Martorelli, M. (2015). The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyping Journal*.
- [22] Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., & Zhao, J. (2015). Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS. *Materials*, 8(9), 5834-5846.
- [23] Harpool, T. D. (2016). *Observing the effect of infill shapes on the tensile characteristics of 3D printed plastic parts* (Doctoral dissertation, Wichita State University).
- [24] Johansson, F. (2016). Optimizing Fused Filament Fabrication 3D printing for durability: Tensile properties and layer bonding.
- [25] Liu, X., Zhang, M., Li, S., Si, L., Peng, J., & Hu, Y. (2017). Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5), 2387-2397.
- [26] Alvarez C, K. L., Lagos C, R. F., & Aizpun, M. (2016). Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. *Ingeniería e Investigación*, 36(3), 110-116.
- [27] Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D poly-ether-ether-ketone via fused deposition modeling. *Materials*, 11(2), 216.
- [7] Wang, J., Xie, H., Weng, Z., Senthil, T., & Wu, L. (2016). A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling. *Materials & Design*, 105, 152-159.
- [8] Torres, J., Cole, M., Owji, A., DeMastry, Z., & Gordon, A. P. (2016). An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments. *Rapid Prototyping Journal*.
- [9] Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017). Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791-803.
- [10] Dong, G., Wijaya, G., Tang, Y., & Zhao, Y. F. (2018). Optimizing process parameters of fused deposition modeling by Taguchi method for the fabrication of lattice structures. *Additive Manufacturing*, 19, 62-72.
- [11] Weissman, S. A., & Anderson, N. G. (2015). Design of experiments (DoE) and process optimization. A review of recent publications. *Organic Process Research & Development*, 19(11), 1605-1633.
- [12] uz Zaman, U. K., Boesch, E., Siadat, A., Rivette, M., & Baqai, A. A. (2019). Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi's design of experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5-8), 1215-1226.
- [13] Durão, L. F. C., Barkoczy, R., Zancul, E., Ho, L. L., & Bonnard, R. (2019). Optimizing additive manufacturing parameters for the fused deposition modeling technology using a design of experiments. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(3), 291-313.
- [14] Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, 143-157.
- [15] Li, H., Wang, T., Sun, J., & Yu, Z. (2018). The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties. *Rapid Prototyping Journal*.
- [16] Deng, X., Zeng, Z., Peng, B., Yan, S., & Ke, W. (2018). Mechanical properties optimization of poly-ether-ether-ketone via fused deposition modeling. *Materials*, 11(2), 216.

- [39] Dey, A., Hoffman, D., & Yodo, N. (2020). Optimizing multiple process parameters in fused deposition modeling with particle swarm optimization. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14(2), 393-405.
- [40] Heidari-Rarani, M., Ezati, N., Sadeghi, P., & Badrossamay, M. R. (2020). Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 0892705720964560.
- [41] Wang, S., Ma, Y., Deng, Z., Zhang, S., & Cai, J. (2020). Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed polylactic acid materials. *Polymer Testing*, 106483.
- [42] Abeykoon, C., Sri-Amphorn, P., & Fernando, A. (2020). Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3(3), 284-297.
- printing. *3D printing and additive manufacturing*, 3(3), 183-192.
- [28] Rankouhi, B., Javadpour, S., Delfanian, F., & Letcher, T. (2016). Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16(3), 467-481.
- [29] Mahmood, S., Qureshi, A. J., Goh, K. L., & Talamona, D. (2017). Tensile strength of partially filled FFF printed parts: experimental results. *Rapid Prototyping Journal*.
- [30] Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017). Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791-803.
- [31] Dudescu, C., & Racz, L. (2017). Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed materials. *ACTA Universitatis Cibiniensis*, 69(1), 23-30.
- [32] Raney, K., Lani, E., & Kalla, D. K. (2017). Experimental characterization of the tensile strength of ABS parts manufactured by fused deposition modeling process. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 7956-7961.
- [33] Li, H., Wang, T., Sun, J., & Yu, Z. (2018). The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties. *Rapid Prototyping Journal*.
- [34] Deng, X., Zeng, Z., Peng, B., Yan, S., & Ke, W. (2018). Mechanical properties optimization of poly-ether-ether-ketone via fused deposition modeling. *Materials*, 11(2), 216.
- [35] Dong, G., Wijaya, G., Tang, Y., & Zhao, Y. F. (2018). Optimizing process parameters of fused deposition modeling by Taguchi method for the fabrication of lattice structures. *Additive Manufacturing*, 19, 62-72.
- [36] Cho, E. E., Hein, H. H., Lynn, Z., Hla, S. J., & Tran, T. (2019). Investigation on Influence of Infill Pattern and Layer Thickness on Mechanical Strength of PLA Material in 3D Printing Technology. *J. Eng. Sci. Res.*, 3(2), 27-37.
- [37] Mutyala, R. S. (2019). Effect of FDM process parameters on the mechanical properties of CFR-PEEK.
- [38] uz Zaman, U. K., Boesch, E., Siadat, A., Rivette, M., & Baqai, A. A. (2019). Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi's design of experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5-8), 1215-1226.