Journal of Technology Research (JTR)
Volume 4, Issue 1, (2026), pp 041-050, ISSN 3005-639X

Optimization of Process Parameters in Fused Deposition Modelling to Enhance Tensile Strength

Abduladim S. Bala*[1], Mustfa M. Abuzriba[2], Abdusalam A. Fkereen[3]

[1] Dept. of Manufacturing Engineering, College of Industrial Technology, Misurata, Libya,
[2] Dept. of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Misurata, Libya,
[3] Libyan Polymer Research center, Tripoli, Libya,

*Corresponding author email: Abduladim.bala@cit.edu.ly

Received: 05-11-2025 | Accepted: 20-03-2025 | Available online: 25-03-2026 | DOI:10.26629/jtr.2026.**

Abstract

Additive manufacturing is considered one of the most prominent technologies of the Fourth Industrial Revolution. It is used to produce three-dimensional models through the successive deposition of semi-molten material layers. This technology is characterized by reduced material waste and high design flexibility, enabling the fabrication of complex geometries that are difficult to achieve Using conventional manufacturing methods. Fused Deposition Modeling (FDM) is among the most widely used techniques due to its low cost and ease of implementation.This study aims to analyze the effect of key process parameters—layer thickness, printing speed, and extrusion temperature—on the tensile strength of FDM-manufactured parts. A statistical approach was adopted for experimental design and data analysis, allowing the evaluation of both individual and interaction effects of these parameters and the determination of optimal values. A mathematical model was also developed to predict process behavior.The results indicate that layer thickness and extrusion temperature have the most significant influence on tensile strength, while printing speed shows a relatively smaller effect, though it remains important in improving interlayer bonding.

Keywords: (FDM) Process Parameters, Optimization, Taguchi Method, Regression Model, Minitab 18.

الضبط الأمثل لمعلمات عملية النمذجة بالترسيب المنصهر بهدف تعزيز مقاومة الشد

عبد العظيم سالم باله[1], مصطفى محمد أبو زريبة[2], عبد السلام عبد المجيد فكيرين[3]

[1] كلية التقنية الصناعية، مصراته، ليبيا
[2] أكاديمية الليبية للدراسات العليا، مصراته، ليبيا
[3] المركز الليبي لبحوث اللدائن، طرابلس، ليبيا

ملخص البحث

تُعد تقنية التصنيع بالإضافة من أبرز تقنيات الثورة الصناعية الرابعة، حيث تُستخدم لإنتاج نماذج ثلاثية الأبعاد عبر ترسيب طبقات متتالية من مواد شبه منصهرة. تتميز هذه التقنية بتقليل هدر المواد وتوفير مرونة عالية في التصميم، مما يتيح تصنيع أشكال معقدة يصعب تحقيقها بالطرق التقليدية. وتُعد تقنية النمذجة بالصهر والترسيب (FDM) من أكثر التقنيات استخدامًا نظرًا لانخفاض تكلفتها وسهولة تطبيقها؛ تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير أهم معلمات العملية، وهي: سمك الطبقة، وسرعة الطباعة، ودرجة حرارة البثق، على مقاومة الشد للمنتجات المصنعة بتقنية FDM. تم اعتماد منهج إحصائي لتصميم التجارب وتحليل النتائج، مما أتاح تقييم التأثيرات الفردية والمتداخلة لهذه المعلمات وتحديد القيم المثلى.

"Articles published in *J Technol Res* are licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License."

كما تم تطوير نموذج رياضي للتنبؤ بسلوك العملية. أظهرت النتائج أن سمك الطبقة ودرجة حرارة البثق هما الأكثر تأثيرًا على مقاومة الشد، بينما كان تأثير سرعة الطباعة أقل نسبيًا، مع أهميتها في تحسين ترابط الطبقات.

الكلمات الدالة: معايير عملية النمذجة بالصهر والترسيب، الأمثلة، طريقة تاقوشي، نموذج الانحدار MiniTab-18.,

1. المقدمة

تعد تقنية النمذجة بالصهر والترسيب (FDM) إحدى أكثر تقنيات التصنيع بالإضافة استخداماً لمختلف التطبيقات الهندسية؛ لقدراتها العالية وانخفاض تكلفتها الأساسية والتشغيلية مقارنةً بطرق التصنيع بالإضافة الأخرى. تم تطوير هذه التقنية في ثمانينات القرن العشرين وتسويقها في سنة 1990 كتكنولوجيا لتصنيع النماذج السريعة من قبل شركة (Stratsys Lnc) الأمريكية، ونظراً لسهولة استخدامها وصيانتها وانخفاض تكلفتها، انتشر استخدامها على جميع المستويات من المتخصصين والهواة أيضاً. ونظراً لكونها صديقة للبيئة ولا تنتج أي انبعاثات صارت من ضمن المعدات المكتبية لدى أصحاب التخصصات الهندسية. تُعد البوليمرات الحرارية من أكثر المواد استخداماً لهذه التقنية فهي تستخدم بكثرة في إنتاج النماذج الأولية وبعض المنتجات النهائية. لقد أدت التطورات الحديثة للرفع من كفاءة هذه التقنية لتصبح قادرة على تصنيع الكثير من المنتجات النهائية في مختلف القطاعات الصناعية، التي من أهمها صناعة المركبات، الطائرات والمعدات الإلكترونية والطبية. ولكن مع ذلك لا تزال هناك بعض أوجه القصور في منتجاتها لاسيما في خواصها الميكانيكية، مما جعل المهتمين بهذه التقنية يسعون لتعزيز الخصائص الميكانيكية والفزيائية وذلك من خلال ثلاثة محاور مختلفة. أول هذه المحاور تعزيز الخصائص الميكانيكية للمواد المستخدمة عن طريق دعمها بمواد تقوية تضاف بنسب محددة تعمل على تقوية الترابط بين جزيئات المادة؛ مثل إضافة ألياف الكربون التي تُسهم بشكل كبير في زيادة قوة ومثانة منتجاتها. أما المحور الثاني فركز فيه الباحثون على تقوية الترابط بين الألياف المتجاورة في الطبقة الواحدة، وبين الطبقات بعضها ببعض، وذلك من خلال الضبط الأمثل لمعلمات عملية النمذجة لتحقيق أقوى ترابط بين جزيئات المادة، وهذا المحور هو محل دراسة هذا البحث. أما المحور الثالث وهو الأحدث، فهو يدور حول تسليط مؤثرات خارجية مثل الاهتزازات الميكانيكية لتعزيز الترابط بين الألياف والطبقات المتجاورة.

سنة 2017 قدم Coogan & Kazmer دراسة حول تأثير المعلمات الحاكمة في عملية النمذجة بالصهر والترسيب، المتمثلة في درجة حرارة منصة العمل (Platform Temperature)، درجة حرارة الباثق (Extrusion Temperature)، سرعة التعبئة (Infill Speed)، سمك الطبقة (Layer Thickness) في مستويين، على مقاومة إجهاد الشد للعينات من خلال المقارنة مع خصائص المادة الخام المستخدمة، مع الأخذ بعين الاعتبار اتجاه نسيج المطبوعة بالنسبة لاتجاه الشد عند الاختبار. لقد اعتمد الباحثان في تجربتهما على نظام الاختبار البسيط المبني على اختبار أحد المعلمات عند مستوياتها مع تثبيت المعلمات الأخرى عند المستوى المتوسط. كما اعتمد الباحثان بناء العينات على هيئة صناديق مجوفة سمك جدرانها مكون من ليف واحد فقط، وذلك لاختبار قوة الترابط بين الألياف، ثم تقطيع عينات من جدران هذه الصناديق باستخدام قواطع مصممة على هيئة شكل عينة الشد، وأخرى باستخدام تقنية الليزر، ولكن لم تظهر نتائج اختبار العينات المقطوعة بالطرقتين المختلفتين أي فرق يذكر في مقاومة إجهاد الشد. أشارت نتائج الاختبار إلى أن مقاومة إجهاد العينات المقطوعة على طول المحور الطولي للألياف اقتربت كثيراً من نتيجة مقاومة السلك الخام، غير أنها قليلة الانفعال مقارنة بالسلك الخام. في حين أن مقاومة إجهاد العينات المقطوعة عمودياً على المحور الطولي للألياف انهارت

بشكل أسرع، ولم تسجل أي انفعال يذكر. كما استخلص الباحثان عدة نقاط مهمة لها تأثير على مقاومة الإجهاد للعينات المختبرة [1].

سنة 2019 قدم Boesch وآخرون دراسة حول تأثير سمك الطبقة، عدد الإطارات، نسبة التعبئة في مستويين على مقاومة الانضغاط. استخدم الباحثون منتج نهائي (عُدة توجيه مثقاب تستخدم في صناعة الطيران) بدلاً من عينات الاختبار القياسية. كما نفذ الباحثون جميع التجارب على نوعين مختلفين من المواد (PLA, PETG) كتقييم ثانٍ لجودة المنتج النهائي. تهدف الدراسة إلى تعظيم مقاومة الانضغاط للمنتج (الحالة الدراسية) وتقليل زمن الطباعة من خلال إيجاد أفضل توليفة اعدادات لمعلمات العملية المتحكمة في جودة العملية، وذلك باستخدام طريقة تاقوشي لتصميم مفردات التجربة وإجراء تحليلات نسبة الإشارة إلى التشويش وتحليل التباين لتحديد المعلمات المؤثرة وتحديد قيمها المثالية. أشارت نتائج تحليل مؤشر نسبة الإشارة للتشويش إلى أن أهم معلمة تأثيراً في مقاومة الانضغاط بالنسبة للمادتين كانت نسبة التعبئة، تلتها عدد الإطارات، وسمك الطبقة، ونمط التعبئة بالنسبة لـ(PLA). ونمط التعبئة ثم عدد الإطارات، وسمك الطبقة لـ(PETG). كما أشارت النتائج إلى أن تقليل سمك الطبقة، وزيادة كلٍ من عدد الإطارات ونسبة التعبئة يعزز من مقاومة الانضغاط. كذلك أشارت النتائج إلى أن نمط التعبئة ليس له تأثير على مقاومة الانضغاط بالنسبة لـ(PLA)، بينما نمط ونسبة التعبئة فقط لهما تأثير ذو قيمة إحصائية معتبرة لما يخص الـ(PETG)؛ حيث علل الباحثون السبب في ذلك لكون المادة أكثر لزوجة مما يعزز الترابط بين الطبقات مقارنة بما هو عليه في الـ(PLA)، وهذا مما يقلل من أهمية سمك الطبقة في تعزيز قوة الترابط بينها فهي أكثر تجانساً فلا يضيف سمك الطبقة قيمة إضافية للقوة بينها. وفي نفس الوقت تؤثر لزوجة المادة العالية سلباً على جودة طباعة هذه المادة لما تسببه في إعاقة المادة لتعبئة الفراغات بين الأنسجة والطبقات أثناء عملية الطباعة وخاصة عند استخدام المستوى الأعلى لسمك الطبقة [2].

سنة 2020 أجرى (Heidari-Rarani) وآخرون دراسة حول تأثير سرعة البثق وسمك الطبقة في مستويين، بالإضافة إلى نسبة التعبئة في أربعة مستويات، عند استخدام مادة (PLA)، مستخدمين طريقة تاقوشي لتحديد طبيعة تأثير هذه المعلمات على معامل المرونة بالنسبة للوزن، وأقصى إجهاد شد بالنسبة للوزن أيضاً. علل الباحثون اختيارهم لمستويات معلمات قيد الدراسة إلى أنها أول المعلمات المستهدفة من المهندسين عندما يكون هدفهم هو تقليل التكلفة وزمن النمذجة مع تحقيق أعلى خصائص ميكانيكية ممكنة بالنسبة لوزن المادة. أشارت نتائج الدراسة إلى اختلاف في قيمة سمك الطبقة (عند تحديد توليفة القيم المثالية للمعلمات) مع اختلاف الهدف من التوليفة. غير أنه يلاحظ ضيق مدى سرعة التعبئة وسمك الطبقة الأمر الذي يؤثر سلباً على دقة النتائج من الناحية العملية؛ فبالمقارنة مع نتائج البحوث الأخرى يمكن ملاحظة خروج القيم المثالية للدراسات الأخرى عن قيم مدى معلمات هذه الدراسة [3].

من خلال ما تقدم ذكره من بحوث يمكن القول، محاولة تعزيز الخصائص الميكانيكية لمنتجات هذه التقنية تدور حول إيجاد السُبل التي تعزز من الترابط بين الأنسجة المتجاورة في الطبقة الواحدة، بالإضافة إلى تحسين الترابط بين الطبقات المتراكبة بعضها فوق بعض.

2. طريقة البحث

اعتمدت الدراسة بشكل أساسي في تصميم جولات التجربة لاختبار تأثر معلمات عملية النمذجة بالصهر والترسيب على أُسس ومفاهيم أنظمة تصميم التجارب (DOE)، وتحديداً تم استخدام طريقة تاقوشي (Taguchi) البرنامج الاحصائي المني تاب (MiniTab-18) [4].

تم تحديد قيم مستويات المعلمات قيد الدراسة بمراعاة أمرين أساسيين؛ الأول متعلق بالخصائص الفيزيائية للمادة المستخدمة (PLA) وهي متمثلة في درجة حرارة الانصهار للمادة والموصي بها من الشركة المصنعة. أما

الثاني فهو مرتبط بمراعاة إمكانيات الناســـخة المخطط اســـتخدامها، حيث أخذت بعين الاعتبار في تحديد مســـتويات درجة حرارة البثق، وســـرعات النمذجة، ومستويات سمك الطبقة وذلك حسب الجدول (1).

جدول 1: مستويات معلمات النمذجة قيد الدراسة

المعلمة	المستوى الأول	المستوى الثاني	المستوى الثالث
سمك الطبقة (ملم)	0.1	0.2	0.3
سرعة النمذجة(ملم/ث)	50	100	150
درجة حرارة الباثق (°م)	205	215	225

لقد اعتمد تصميم التجربة L27 الذي يتضمن تنفيذ 27 جولة، كل جولة تتضمن تشكيلة من مستويات معلمات العملية محل الدراسة وحسب مقترح برنامج تصميم التجارب MinTab، لكي يمكن الكشف عن التأثيرات المشتركة للمعلمات [5]. الجدول (2) يوضح تفاصيل التصميم.

3. التجربة

تم تصـــميم وطباعة العينات وفقاً للمواصـــفة الدولية (ASTM D638) الخاصـــة بتحديد شـــكل ومقاســـات العينات وظروف ومواصـفات اختبار الشـد. كما تم تنفيذ الاختبـارات بمركز بحوث اللـدائن/طرابلس بمراعـاة المحددات المذكورة بالمواصـفة. الجدول (2) يسـتعرض نتائج اختبار الشد.

جدول 2: نتائج اختبار الشد للعينات

رقم الجولة Number	سمك الطبقة (mm)	سرعة النمذجة (mm/s)	درجة حرارة البثق (c°)	مقاومة الشد (n/mm^2)
1	0.1	50	205	42.9
2	0.1	50	215	41.9
3	0.1	50	225	50.8
4	0.1	100	205	48.2
5	0.1	100	215	48.5
6	0.1	100	225	47.6
7	0.1	150	205	46.6
8	0.1	150	215	46.5
9	0.1	150	225	49.4
10	0.2	50	205	45.7
11	0.2	50	215	47.3
12	0.2	50	225	47.5
13	0.2	100	205	45.3
14	0.2	100	215	48.5
15	0.2	100	225	49.0
16	0.2	150	205	46.2
17	0.2	150	215	47.8
18	0.2	150	225	48.943
19	0.3	50	205	46.167
20	0.3	50	215	46.1
21	0.3	50	225	47.1
22	0.3	100	205	40.8
23	0.3	100	215	44.2
24	0.3	100	225	46.1
25	0.3	150	205	40.9
26	0.3	150	215	43.9
27	0.3	150	225	43.3

4. تحليل النتائج

سيتضمن هذا البند استعراض ومناقشة وتفسير نتائج اختبار الشد للعينات من خلال استعراض المؤشرات التي يتيحها التحليل ضمن طريقة تاقوشي ثم تحليل الانحدار.

أولاً: تحليل تاقوشي

تقدم هذه الطريقة مجموعة من المؤشرات التي يمكن من خلالها فهم التأثير المستقل والمشترك للمعلمات وترتيب أهمية تأثير معلماتها على مخرج العملية (مقاومة الشد). كل المؤشرات المستنبطة تمت وفق استراتيجية تعظيم النتيجة.

أ. جدول الاستجابة (Response Table):

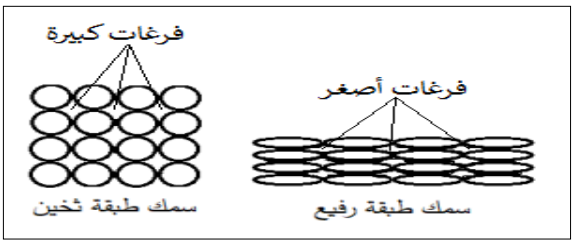
يقدم المتوسطات للاستجابة المبينة بالجدول (3) عرضاً مفصـــلاً لترتيب أهمية معلمات العملية المقابلة لصـــف (Rank). حيث يتم ترتيب هذه المعلمات حســـب قوة تأثيرها، وذلك بالاســـتناد إلى الفرق بين أعلى وأقل قيمة لمتوسطات الاستجابة (النتيجة) المقابلة لكل مستوى من مســـتويات المعلمات، فالمعلمة التي تحقق أعلى فرق (Delta) تكون هي المعلمة الأكثر تأثيراً.

ومن خلال مراجعة نتائج الجدول يتضح أن سمك الطبقة هي المعلمة الأقوى تأثيراً على مقاومة المادة للشد، تليها وبفارق بسيط درجة حرارة البثق، بينما يظهر بوضح ضعف تأثير سرعة البثق على خاصية مقاومة الشد. هذه النتيجة لترتيب تأثير المعلمات تتفق مع ما تم التوصل إليه في الكثير من الدراسات السابقة [2] [3]. حيث يمكن ملاحظة انخفاض مقاومة الشد عند الانتقال من المستوى الأول إلى المستوى الثالث، بالرغم من تسجيل بعض الارتفاع البسيط في مقاومة الشد عند المستوى الثاني لسمك الطبقة، والذي يمكن ملاحظته بوضوح أكثر عند مراجعة مخططات التأثير المستقل للمعلمات لاحقاً.

جدول 3. ترتيب الاستجابة لمقاومة الشد

Temperature	Speed	Layer Thickness	Level
44.76	46.16	46.94	1
46.07	46.47	47.36	2
47.76	45.96	44.29	3
3.00	0.51	3.06	Delta
2	3	1	Rank

من الممكن تفسير هذا التحول في مقاومة الشد المرتبط بالتغير في سمك الطبقة بسبب زيادة نسبة اندماج الأنسجة المتجاورة في الطبقة الواحدة في حالة النمذجة بسمك طبقة رفيع، وذلك نتيجةً لضغط رأس البثق المادة في اتجاه منصة العمل، مما يدعم اندماج الأنسجة المتجاورة ويقلل الفراغات بينها. الشكل (1) يوضح فكرة تأثير سمك الطبقة على اندماج الأنسجة وتعزيز مقاومة الشد للمادة. وبالمقابل فإن ارتفاع سمك الطبقة يزيد من حجم الفجوات بينها مما يقلل من فرصة اندماجها، وبالتالي ستفتقر إلى الترابط فيما بينها مما يضعف مقاومة المادة بشكل عام [6].



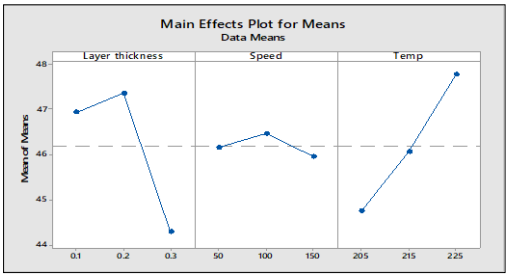
شكل 1. تأثير سمك الطبقة على مقاومة المادة للشد [6]

ب. مخططات التأثيرات المستقلة لمعلمات العملية على مقاومة الشد للعينات

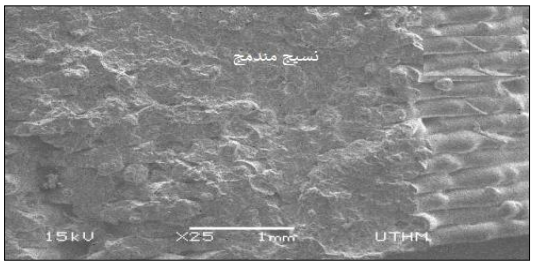
تختص هذه المخططات بالتمثيل البياني للتأثير المستقل لمعلمات العملية على مقاومة الشد للمادة، فهي تعرض على التوالي سمك الطبقة، سرعة النمذجة، ودرجة حرارة البثق. فكما هو ملاحظ من مخطط التأثير المستقل الموضح في الشكل (2) أن لتأثير سمك الطبقة ارتفاع نسبي لمقاومة الشد عند الانتقال من المستوى الأول لسمك الطبقة إلى المستوى الثاني (الأكثر سُمكاً)، يليه انهيار كبير في مقاومة المادة بسبب النمذجة بسمك طبقة أكبر. هذا السلوك المبين في هذا المخطط يتفق مع ما سبق ذكره عند الحديث على جدول متوسطات النتيجة. فالمستوى الثاني لسمك الطبقة حقق أفضل فرصة لرفع نسبة الاندماج بين الأنسجة المتجاورة وكذلك الطبقات المتجاورة، الأمر الذي ينتج مادة متحدة ومتجانسة وأقل نسبة ممكنة من الفراغات والتجاويف الهوائية. بينما يُظهر مخطط تأثير سرعة النمذجة تأثيراً ضعيفاً وغير مؤثر على مقاومة الشد للمادة، فنتيجة مقاومة الشد للمادة متقاربة عند مستويات السرعة الثلاثة، وبالتالي يمكن القول بأنه لا يوجد تأثير ذو معنى إحصائي على مقاومة الشد للمادة.

وبالمقال يُظهر مخطط تأثير درجة الحرارة تأثير طردي قوي لدرجة حرارة البثق على مقاومة الشد. والأمر في ذلك يرجع للمساهمة الكبيرة لدرجة الحرارة في تعزيز نسبة الاندماج بين الأنسجة والطبقات، فارتفاع درجة حرارة البثق يزيد من سيولة المادة مما يسهل عملية الاندماج، وبالتالي إنتاج مادة أكثر تجانسا، بالإضافة إلى إطالة فترة بقاء المادة المبثوقة في حالة عجينية مما يزيد من فرصة اندماج الأنسجة والطبقات قبل تجمدها.

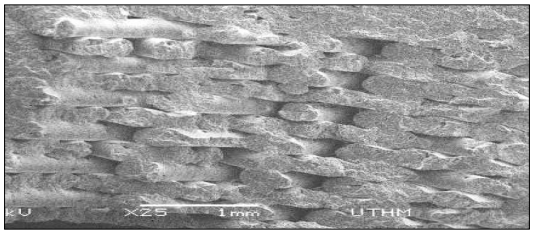
الشكل (3) يوضح النسيج الداخلي لعينتين منتجتين بمعلمات مختلفة ملتقطة باستخدام المجهر الإلكتروني (SEM) [7].



شكل 2. مقاومة الشد مقابل مستويات معلمات العملية



(أ) نسيج مندمج وقليل الفراغات

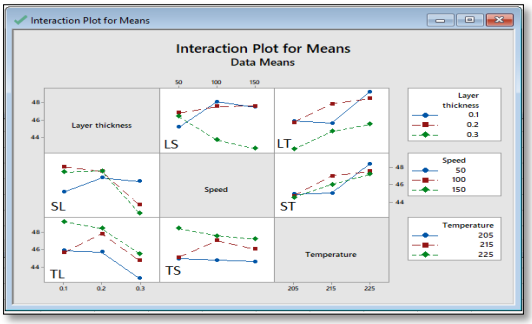


(ب) نسيج غير مندمج وكثير الفراغات

شكل 3. طبيعة المادة الناتجة بسبب نسبة اندماج الأنسجة

ت. مخططات التأثيرات المشتركة للمعلمات على مقاومة الشد للعينات

تُلخص مخططات التأثيرات المشتركة للمتوسطات الموضحة بالشكل (4) كم كبير من المعلومات التي يمكن للمستخدم رصدها. فكل شكل من الأشكال المجمعة في إطار واحد تمثل التأثير المشترك لمعلمتين على متوسط مقاومة الشد.



شكل 4. التأثيرات المشتركة للمعلمات على مقاومة الشد

المخطط (LS) يمثل التأثير المشترك لسمك الطبقة وسرعة النمذجة على مقاومة المادة للشد. عند المستوى الأول لسمك الطبقة تحقق الزيادة في سرعة النمذجة تحسن نسبي في مقاومة الشد، ناتجة عن وجود توافق بين مستوى السرعة وسمك الطبقة ينتج عنه انتظام في رص أنسجة الطبقة (Raster) وبالتالي زيادة فرصة الاندماج بينها، وعندها تتحسن مقاومة المادة لقوى الشد. ومع صعود السرعة للمستوى الثالث حدث انخفاض بسبب تجاوز سرعة النمذجة معدل بثق المادة فينتج عنه سحب للمادة المبثوقة، مما يزيد من نحافة النسيج فتتجمد المادة بسرعة فتقل فرصة اندماجها مع ما سبقها من مادة في النسيج السابق، فينتج عنها ضعف في مقاومة المادة. أما عند المستوى الثاني لسمك الطبقة يمكن ملاحظة ضعف التأثير المشترك بين المعلمتين، ويرجح السبب في ذلك إلى حدوث توازن بين تأثير المعلمتين فلم ينتج عنهما تأثير ذو قيمة. بينما يظهر تأثير مشترك عكسي على مقاومة الشد للمادة عند المستوى الثالث لسمك الطبقة، فعند هذا المستوى تؤدي الزيادة في سرعة النمذجة إلى تدهور واضح في مقاومة المادة؛ والسبب في ذلك يرجع إلى أن ارتفاع السرعة مع زيادة كتلة المادة المبثوقة بسبب زيادة سمك الطبقة يقلل من كمية الحرارة التي يمكن للباثق أن يمدها للمادة المبثوقة، وبالتالي تنخفض سيولتها الأمر الذي يعرقل اندماجها مع ما جاورها من أنسجة وطبقات. بالإضافة إلى أن ارتفاع السرعة يُنتج اهتزازات إضافية تُحدث فوضى نسبية في مسار النسيج المبثوق، وبالتالي تنشأ فجوات وفرغات تقلل من مساحة الاندماج بينها مما يضعف مقاومة المادة بشكل عام [8].

المخطط (SL) يرصد تدهور واضح في مقاومة الشد مع زيادة سمك الطبقة عند الطباعة بسرعات نمذجة عالية؛ ويمكن تفسير هذا السلوك بأن زيادة سمك الطبقة مع ارتفاع السرعة يقلل من فرصة حصول المادة المبثوقة على كمية الحرارة المناسبة لتجعلها قابلة للاندماج بشكل سريع، بينما يعرض المخطط نفس السلوك السابق عند مستويات

السرعة المنخفضة. وهذا يشير إلى أن العمل بالمستويات المنخفضة لأي من المعلمتين يضعف من تأثيرهما المشترك، بينما يشتد هذا التأثير ويكون عكسياً عند المستويات العليا لكلٍ منهما [9].

المخطط (LT) يوضح التأثير المشترك لسمك الطبقة ودرجة حرارة البثق على مقاومة المادة للشد. بشكل عام يؤدي الارتفاع في درجة حرارة البثق عند أي مستوى من مستويات سمك الطبقة إلى سيولة المادة ومن ثم يحقق اندماجاً أكثر وينتج عن ذلك تعزيز مقاومة المادة، غير أن أكبر تأثير مشترك للمعلمتين يظهر عند المستوى الأدنى لسمك الطبقة عندما يشترك مع المستوى الأعلى لدرجة حرارة البثق، وهذا الاشتراك ينتج أعلى مستوى لكمية الحرارة للوحدة الواحدة من المادة مما يزيد من سيولتها ويدفعها هذا إلى مزيد من الاندماج فيما بينها [8].

المخطط (TL) يعرض المخطط سلوك مختلف تماماً على ما عرضه نظيره، فالزيادة في سمك الطبقة عند جميع مستويات درجة الحرارة يؤدي إلى انخفاض مقاومة المادة؛ وهذا سلوك منطقي فعند زيادة كتلة المادة عند مستوى معين من درجة الحرارة سيقلل من كمية الحرارة للوحدة الواحدة من المادة، وبالتالي يقلل من سيولتها ومن ثم يقلل من نسبة اندماجها الأمر الذي يضعف من مقاومتها للشد [10].

المخطط (ST) يعرض التأثير المشترك لسرعة النمذجة ودرجة الحرارة على مقاومة المادة للشد. تشير المنحنيات في هذا الاشتراك إلى تأثر واضح لمقاومة الشد للمادة بالتغير الإيجابي لدرجة الحرارة عند جميع مستويات سرعة النمذجة ولكنها تكون على أشدها عند مستوى السرعة المنخفض. ويرجع السبب في ذلك إلى أن انخفاض مستوى السرعة يعطي الفرصة لتزويد المادة بأكبر كمية من الحرارة، فكما هو مبين بالمخطط أعلى قيمة لمقاومة المادة سُجلت عند أعلى مستوى لدرجة حرارة البثق بالاشتراك مع أقل مستوى لسرعة النمذجة.

المخطط (TS) يشير إلى ضعف تأثير التغير في سرعة النمذجة على تأثير حرارة البثق، وأن اعلى قيمة لمقاومة المادة سُجلت عند المستوى الأول لسرعة النمذجة مقابل المستوى الأعلى لحرارة البثق، وهذه النتيجة تعزز مفهوم اعتماد عملية الاندماج وبشكل مباشر على كمية الحرارة التي يزودها الباثق للوحدة الواحدة من المادة المبثوقة [10].

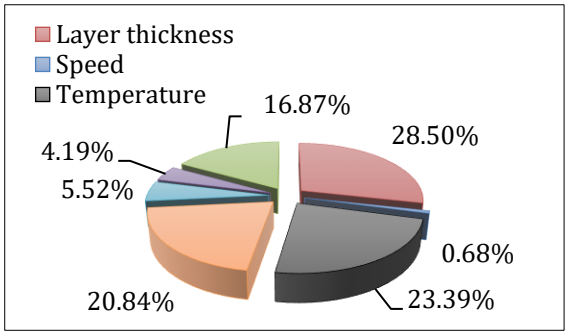
من الممكن تلخيص السلوك العام للتأثيرات المشتركة للمعلمات على مقاومة المادة لقوى الشد في مفهوم أن مقاومة المادة معتمدة بشكل مباشر على نسبة الاندماج بين الأنسجة المتجاورة في الطبقة الواحدة وبين الطبقات بعضها ببعض، وإن عملية الاندماج تعتمد هي الأخرى على تأثير المعلمات في تعزيزها أو عرقلتها. فالمعلمات التي تعزز من هذه العملية يكون تأثيرها طردياً والعكس بالعكس.

ث. جدول تحليل التباين لمتوسط مقاومة المادة للشد

تشير نتائج تحليل التباين الموضحة بالجدول (4) ضمن عمود قيمة (P-Value)، إلى وجود تأثير ذو قيمة إحصائية معتبرة لكلٍ من سمك الطبقة ودرجة الحرارة على مقاومة المادة لقوى الشد. أما سرعة النمذجة والتأثيرات المشتركة للمعلمات لا يوجد لها تأثير يمكن اعتباره، وبالرغم من أن التأثير المشترك لسرعة النمذجة مع سمك الطبقة (0.13) قريب نسبياً من الحد المعياري الإحصائي (0.05) لتقييم تأثير المعلمات لكن لا يمكن اعتباره ذا تأثير احصائي. وبالاستعانة بنتائج هذا التحليل يمكن حساب نسبة مشاركة كل معلمة من هذه المعلمات في تحديد قيمة مقاومة المادة للشد كما هي مبينة بالشكل (5) وبالنظر للشكل نجد أن سمك الطبقة يسيطر على أكبر نسبة لمقاومة المادة للشد، تليه بتفاوت بسيط درجة حرارة البثق، وفي المرتبة والأخيرة يأتي التأثير المشترك لسمك الطبقة مع سرعة البثق، أما باقي التأثيرات فهي صغيرة جداً بالمقارنة مع ما تم الإشارة إليه أنفاً.

جدول 4. تحليل التباين لتأثير معلمات النمذجة على مقاومة المادة للشد

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Layer thickness	2	49.6	49.6	24.8	6.8	0.02
Speed	2	1.2	1.2	0.6	0.2	0.85
Temperature	2	40.7	40.7	20.4	5.6	0.03
Layer thickness & Speed	4	36.3	36.3	9.1	2.5	0.13
Layer thickness & Temperature	4	9.6	9.6	2.4	0.7	0.64
Speed & Temperature	4	7.3	7.3	1.8	0.5	0.74
Residual Error	8	29.4	29.4	3.7		
Total	26	174.2				



شكل 5. نسب تأثير المعلمات على مقاومة الشد

ج. التمثيل الرياضي للعلاقة بين معلمات العملية ومقاومة المادة للشد باستخدام نموذج الانحدار

بالإضافة إلى ما يقدمه نموذج الانحدار الخطي (Regression model) من تحليلات إحصائية تقدم نفس المؤشرات السالفة الذكر، فهو يقدم التمثيل الرياضي الذي يحاكي العلاقة بين معلمات العملية ونتيجتها بشكل مباشر وذلك بالاستناد إلى نتائج التجربة المصممة باستخدام تصميم تاقوشي. عادة ما تستخدم هذه النماذج للتنبؤ بقيم النتيجة عند أي مستويات لقيم المعلمات بدون الحاجة إلى إجراء تجارب معملية، بالإضافة إلى ذلك يتم استخدامه في تحديد المستويات المثالية للمعلمات والتي تحقق أعلى قيمة لمقاومة الشد للمادة في عملية إحصائية تعرف بالأمثلة (Optimization) وهي متاحة على حزمة نموذج الانحدار.

في البداية تم ضبط اعدادات البرنامج باعتماد التأثيرات المستقلة لكل المعلمات بالإضافة إلى التأثيرات المشتركة لها، وعند اختبار النموذج اتضح تعارض بين نتائج النموذج والنتائج الفعلية التي تم تنفيذها معملياً، ولتحسين كفاءة النموذج تم استبعاد التأثيرات غير المعتبرة إحصائياً حسب ما أشارت إليه نتائج جدول التباين، فانتهى النموذج إلى صورته النهائية الموضحة بالمعادلة (1).

$$Tensile\ strength = 18.472 - 13.21\ Layer\ thickness - 0.00204\ Speed + 0.1500\ Temp \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

ومن خلال اختبار النموذج باستخدام النتائج المعملية التي تم تنفيذها في التجربة (الجدول 2) تبين أن متوسط نسبة الخطأ في استخدام النموذج كانت 2.24%. بالاستناد إلى النموذج الممثل للعملية المبين بالمعادلة (1) تم اجراء عملية الأمثلة وتحديد القيم المثلى للمعلمات والتي تحقق أعلى قيمة ممكنة لمقاومة الشد للمادة. أشارت نتائج تحليل (Response Optimizer) إلى أن المستويات المثلى للمعلمات هي:

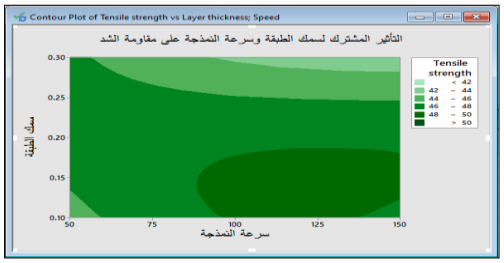
المعلمة	القيمة المثالية
سمك الطبقة ملم	0.1
سرعة النمذجة ملم/ث	50
حرارة البثق م°	225

ح. التمثيل الكنتوري للتأثير المشترك للمعلمات

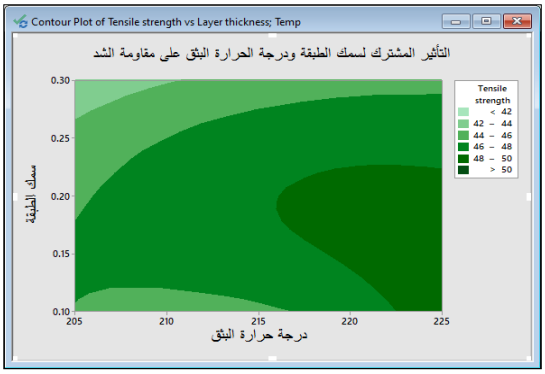
تكشف المخططات الكنتورية العلاقة المشتركة بين مختلف معلمات عملية النمذجة، وبالنظر للمخطط (6) شكل6 يمكن ملاحظة تعدد المساحات الكنتورية التي تدل على وجود تأثيرات مشتركة لها قيمة إحصائية عالية على مقاومة الشد، تشير المنطقة الغامقة للمعدل (48–50) لأعلى مستويات مقاومة المادة الممكنة لقوى الشد والناتجة من التأثير المشترك بين المستوى المتوسط إلى الأعلى لمستوى سرعة النمذجة والمستوى الأدنى إلى المتوسط لسمك الطبقة. هذه النتيجة

تتفق مع ما تم التوصل إليه في المؤشرات السابقة للتأثيرات المشتركة، وهو أن قوة الشد للمادة تصل لأعلى مستوياتها عند الطباعة بالمستوى الأول لسمك الطبقة مع المستوى الثاني والثالث لسرعة البثق. تنخفض مقاومة المادة عند تجاوز المستوى الثاني لسمك الطبقة، كما هو مبين بالمنطقة التي تليها (46–48). والملاحظ أن مقاومة المادة الناتجة تحافظ على مستوى جيد لجميع مستويات سمك الطبقة بشرط بقاء السرعة عند المستوى الأدنى. بينما تنخفض مقاومة المادة إذا اجتمعت المستويات العليا لكلا المعلمتين.

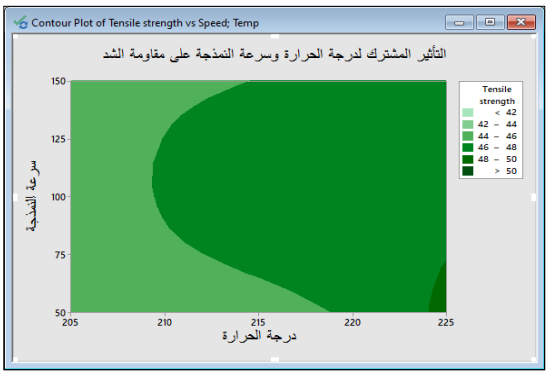
يشير مخطط التأثير المشترك لسمك الطبقة ودرجة حرارة البثق الموضح بالشكل (7) إلى اتساع منطقة المقاومة العالية وبشكل أكبر عند تجاوز درجة حرارة البثق المستوى المتوسط، وتكون أقصى قيمة لها في المنطقة المحددة بالمستوى ما دون المتوسط لسمك الطبقة مع المستوى الأعلى إلى المتوسط لدرجة الحرارة. بينما تكون مقاومة الشد أقل ما يمكن عند المستويات العليا لسمك الطبقة والتي تنخفض عندها كمية الحرارة الممنوحة لوحدة المادة، كما يشير المخطط الثالث الشكل (8) الموضح للتأثير المشترك لدرجة الحرارة مع سرعة النمذجة إلى قلة المساحات الكنتورية وهذا يشير إلى ضعف التأثير المشترك لهاتين المعلمتين. حيث يظهر اضمحلال كبير في المنطقة الممثلة للمقاومة القصوى (48–50)، وقابلها اتساع كبير في منطقة المقاومة المتوسطة (44–46) التي تبدأ بالظهور بعد المستوى الثاني لدرجة الحرارة وعند جميع مستويات سرعة النمذجة، وهذا يدل على سيطرة معلمة الحرارة على تأثير سرعة النمذجة.



شكل 6. التأثير المشترك لسمك الطبقة وسرعة البثق على **مقاومة الشد**



شكل 7. مخطط التأثير المشترك لسمك الطبقة ودرجة حرارة البثق على مقاومة الشد



شكل 8. مخطط التأثير المشترك لسرعة البثق ودرجة حرارة البثق على مقاومة الشد

5. الاستنتاجات:

من خلال التحليل الإحصائي للنتائج التي توصل إليها الباحثون في دراسة تأثير معلمات العملية المستقلة والمشتركة على مقاومة المادة لقوى الشد يمكن استنتاج النقاط التالية:

- أوضحت النتائج أن أعلى مقاومة شد (50 MPa) تحققت عند استخدام المستوى الأول لسمك الطبقة مع المستوى الثاني والثالث لسرعة البثق، مما يؤكد أن القيم المثالية للمعلمات حققت تحسيناً بنسبة 10.39% بالمقارنة مع القيمة المتوسطة للنتائج الشد لكل الجولات باستثناء القيمة القصوى. ملحوظًا في الخواص الميكانيكية.
- أظهرت التحليلات أن مقاومة المادة تبقى جيدة عند جميع مستويات سمك الطبقة إذا تم الحفاظ على أدنى مستوى لسرعة النمذجة، بينما تنخفض بشكل كبير عند اجتماع المستويات العليا لسمك الطبقة وسرعة النمذجة.

- بيّنت النتائج أن زيادة درجة حرارة البثق إلى المستوى المتوسط أو الأعلى مع سمك طبقة منخفض يعزز من مساحة المنطقة ذات المقاومة العالية، بينما تؤدي المستويات العليا لسمك الطبقة إلى انخفاض واضح في المقاومة.
- أظهرت دراسة التأثير المشترك بين درجة الحرارة وسرعة النمذجة أن درجة الحرارة تلعب الدور الأكبر، حيث سيطرت على التأثير الكلي للمعلمتين ولم يظهر معها تأثير يذكر لسرعة النمذجة.
- أظهرت نتائج عملية الأمثلة أن المستويات المثلى للمعلمات (سمك الطبقة:0.1 ملم، سرعة النمذجة 50 ملم/ث، درجة حرارة البثق: 225 م°) المستخلصة من النموذج الرياضي تحقق أقصى مقاومة شد ممكنة للمادة.

6. المراجع

[1] Coogan, T. J., & Kazmer, D. O. (2017). Bond and part strength in fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, *23*(2), 414-422.

[2] 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), 1215-1226.

[3] Heidari-Rarani, M., Ezati, N., Sadeghi, P., & Badrossamay, M. R. (2022). Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *35*(12), 2435-2452.

[4] Lazić, L. J. U. B. O. M. I. R. (2013). Use of orthogonal arrays and design of experiments via Taguchi methods in software testing. Recent Adv. Appl. Theor. Math., 23(2), 256-267.

[5] Issayev, G., Aitmaganbet, A., Shehab, E., & Ali, M. H. (2021). Bonding Strength Analysis of Multi-material and Multi-color Specimens Printed with Multi-extrusion Printer. Manufacturing Technology, 21(5), 627-633.

[6] بالة، عبدالعظيم سالم. (2023). الصناعة الذكية: الطابعات ثلاثية الأبعاد. كلية التقنية الصناعية، مصراتة-ليبيا.

[7] Shergill, K., Chen, Y., & Bull, S. (2023). An investigation into the layer thickness effect on the mechanical properties of additively manufactured polymers: PLA and ABS. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 126(7), 3651-3665

[8] Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núnez, 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

[9] 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, 24(1), 80-92.

[10] Syrlybayev, D., Zharylkassyn, B., Seisekulova, A., Akhmetov, M., Perveen, A., & Talamona, D. (2021). Optimisation of strength properties of FDM printed parts-A critical review. Polymers, 13(10), 1587.