



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة التصميم الميكانيكي والإنتاج

ماجستير هندسة أتمتة الإنتاج

تحسين متانة منتجات الطباعة ثلاثية الأبعاد

دراسة حالة (شكل البنية الداخلية)

رسالة أعدت لنيل درجة الماجستير في هندسة أتمتة الإنتاج

إعداد المهندسة:

يمامة محمد ربيع قصيدة

إشراف:

الأستاذ الدكتور المهندس

محمود بني المرجة

أستاذ في جامعة دمشق

2024

قرار لجنة الحكم

الشكر والتقدير

فهرس المحتويات

5.....	فهرس المحتويات
8.....	فهرس الأشكال التوضيحية
12.....	فهرس الجداول
12.....	قائمة المصطلحات والاختصارات باللغتين العربية والإنكليزية
14.....	الملخص
15.....	الفصل الأول: الإطار العام للبحث
16	1.1. المقدمة (introduction):
16	2.1. الإشكالية البحثية (Research Problem):
16	3.1. فرضيات البحث (Research hypotheses):
17	4.1. هدف البحث (Research Objective):
17	5.1. أهمية البحث (Research Importance):
18	6.1. مسوّغات البحث (Research justifications):
18	7.1. حدود البحث (Research Limitations):
18	8.1. منهج البحث، وأدواته (Research Methodology):
18	9.1. مكونات البحث (Research components):
20.....	2 الفصل الثاني: الإطار النظري للبحث
21	1.2. تمهيد (Preface):
21	2.2. الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D Printing): (1؛ 2؛ 3؛ 4؛ 5)
23	1.2.2. لمحة عن تاريخ الطباعة ثلاثية الأبعاد (A brief History of 3D Printing)

2.2.2. تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D Printing Technologies):	27
3.2. أهم المواد المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D Printing Materials):	32
1.3.2. مادة PLA (عديد حمض اللبنيك) (Polylactic Acid):	32
4.2. التصوير بالأشعة تحت الحمراء:	34
1.4.2. تاريخ التصوير بالأشعة تحت الحمراء:	34
2.4.2. مستشعر الأشعة تحت الحمراء:	35
5.2. الخلاصة (conclusion):	36
3. الفصل الثالث: الدراسات المرجعية	37
1.3. تمهيد (preface):	38
❖ الدراسة المرجعية الأولى: "التحليل بطريقة العناصر المنتهية للنموذج الفرعي للهياكل المصنعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد"	39
❖ الدراسة المرجعية الثانية "دراسة تأثير تصميم بنية الملء الداخلية على زمن وكلفة الإنتاج لأجزاء من مادة ABS مصنعة بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد"	42
❖ الدراسة المرجعية الثالثة: "تحليل خصائص الشد، الضغط، والانحناء لأجزاء بلاستيكية من مادة ABS P430 مصنعة بالطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية البناء بالترسيب المنصهر تبعاً لاتجاه الطباعة"	45
❖ الدراسة المرجعية الرابعة: "مقارنة بوليمير إيزوتروبي مع بوليمير مطبوع بتقنية الترسيب المنصهر وتحليل الإجهادات باستخدام العناصر المنتهية"	49
❖ الدراسة المرجعية الخامسة: "الفحص التجريبي لعملية البناء بالترسيب المنصهر لتحسين الخصائص الميكانيكية وتكلفة الإنتاج"	50
2.3. الخلاصة (conclusion):	53
4. الفصل الرابع: الإجراء العملي	57
1.4. تمهيد (Preface):	58
2.4. المواد المستخدمة (Used Materials):	58
3.4. التجهيزات المستخدمة (The Used Equipment):	60

60	 جهاز اختبار الشد للمواد البلاستيكية: 1-3-4
61	 2-3-4- طباعة ثلاثية الأبعاد 3D printer من النوع FDM: 61
61	 4.4. المراحل الأولى من الدراسة: 61
64	 5.4. محورا الإجراء العملي: 64
64	 1-5-4- الاختبارات التجريبية: 64
64	 1-1-5-4- اختيار عينة الشد: 64
65	 2-1-5-4- تحضير عينات الشد 1 ASTM D638 type للطباعة ثلاثية الأبعاد: 65
66	 3-1-5-4- طباعة عينات الاختبار: 66
68	 4-1-5-4- اختبار العينات: 68
69	 5-1-5-4- نتائج الاختبارات التجريبية: 69
73	 1-5-4- النمذجة الحاسوبية بطريقة العناصر المنتهية FEA: 73
76	 6.4. نتائج الدراسة (Results): 76
78	 5 الفصل الخامس: التوصيات والمقترحات 78
81	 6 الفصل السادس: المراجع العلمية References 81
82	 المراجع 82

فهرس الأشكال التوضيحية

الفصل الأول:

الشكل 1-1 تحقيق التوازن بين الجودة المطلوبة والزمن وكلفة الإنتاج. 17

الفصل الثاني:

الشكل 1-2 العلاقة بين تكلفة الإنتاج وحجم الإنتاج. 22

الشكل 2-2 الأصناف البحرية هي نتاج "الطباعة ثلاثية الأبعاد" الطبيعية. 23

الشكل 3-2 تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد. 27

الشكل 4-2 تقنية التليد الانتقائي بالليزر SLS 29

الشكل 5-2 تقنية الطباعة الحجرية المجسمة (Stereo Lithography, SLA) 30

الشكل 6-2 تقنية المعالجة الرقمية بالضوء (Digital Light Projection, DLP) 30

الشكل 7-2 تقنية البناء بالترسيب المنصهر (FDM) 31

الشكل 8-2 دورة حياة مادة PLA 33

الشكل 9-2 التركيب الكيميائي لمادة PLA 33

الفصل الثالث:

الشكل 1-3 عينة الشد القياسية ASTM E8 39

الشكل 2-3 أنماط التعبئة الداخلية المدروسة. 40

الشكل 3-3 الإجهاد الأعظمي في النموذج الفرعي. 40

الشكل 4-3 الإجهاد الأعظمي في النموذج العام 41

الشكل 5-3 الخصائص الميكانيكية للعينات المختبرة 43

- الشكل 3-6 تكلفة الإنتاج 43
- الشكل 3-7 مخطط الشد 44
- الشكل 3-8 العينات المطبوعة باتجاهات وزوايا مختلفة. 46
- الشكل 3-9 نتائج الاختبارات للعينات 47
- الشكل 3-10 نتائج الاختبارات للعينات 48
- الشكل 3-11 مقارنة الإجهاد في صفيحة ايزوتروبية وعينة منتجة بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد.... 49
- الشكل 3-12 الأوضاع الزاوية المختلفة للعينات المختبرة 51
- الشكل 3-13 نتائج اختبارات الشد..... 52
- الشكل 3-14 نتائج اختبارات الانحناء..... 52

الفصل الرابع:

- الشكل 4-1 مادة PLA المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية FDM..... 59
- الشكل 4-2 عينة اختبار الشد ASTM D638 type 1..... 59
- الشكل 4-3 جهاز اختبار الشد للمواد البلاستيكية..... 60
- الشكل 4-4 طابعة ثلاثية الأبعاد 3D printer من النوع FDM..... 61
- الشكل 4-5 العينة المعيارية ASTM D638 type 4..... 62
- الشكل 4-6 المقطع العرضي للعينة المعيارية المفرغة ASTM D638 type 4..... 62
- الشكل 4-7 نسبة الملء إلى مساحة المقطع العرضي في العينة المعيارية ASTM D638 type 4..... 63
- الشكل 4-8 نسبة الملء إلى مساحة المقطع العرضي في العينة المعيارية ASTM D638 type 1..... 63

- الشكل 4-9 عينة الشد المعيارية ASTM D638 type 1.....64
- الشكل 4-10 أنماط ونسب كثافة infill المطبقة.....66
- الشكل 4-11 بعض العينات المطبوعة قبل الاختبار.....67
- الشكل 4-12 زمن الطباعة ووزن العينات المطبوعة.....67
- الشكل 4-13 بعض العينات بعد الاختبار.....68
- الشكل 4-14 نتائج الاختبارات.....69
- الشكل 4-15 كاميرا التصوير الحراري.....70
- الشكل 4-16 التصوير بالأشعة تحت الحمراء.....71
- الشكل 4-17 اختبارات النمذجة الأولية.....73
- الشكل 4-18 تطبيق أنماط وكثافات الملء حاسوبياً.....74
- الشكل 4-19 نتائج النمذجة الحاسوبية.....75
- الشكل 4-20 قيم الإجهادات الحاصلة في العينات باختلاف كثافة الملء.....76
- الشكل 4-21 مقارنة قيم الإجهادات الأعظمية الحاصلة في العينات بين الاختبارات التجريبية والنمذجة الحاسوبية.....77
- الشكل 4-22 مقارنة قيم الاستطالات الأعظمية الحاصلة في العينات بين الاختبارات التجريبية والنمذجة الحاسوبية.....77

فهرس الجداول

جدول 1-2 نشأة مفهوم الطباعة ثلاثية الأبعاد ومراحل تطورها.....	26
جدول 1-3 ملخص لأهم ما ورد في الدراسات المرجعية.....	55

قائمة المصطلحات والاختصارات

باللغتين العربية والإنكليزية

المصطلح باللغة العربية	مقابلته باللغة الإنكليزية
الطباعة ثلاثية الأبعاد	3D Printing
التصنيع بالإضافة	Additive Manufacturing (AM)
التحليل بالعناصر المنتهية	Finite Element Analysis
الملء (البنية الداخلية)	Infill
نمط الملء	infill pattern
كثافة الملء / نسبة الملء	infill density
خيوط الطباعة ثلاثية الأبعاد	3D filament
الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد	ASTM – American Society for Testing and Materials

الملخص

أصبحت الطباعة ثلاثية الأبعاد من أهم طرق التصنيع المستخدمة بمجالات مختلفة، وكذلك فإن متانة القطع المنتجة بهذه الطريقة تتأثر بشكل أو بآخر بعدة عوامل منها شكل وكثافة البنية الداخلية (الملء) **infill** مما ينعكس على زمن وكلفة الإنتاج.

يهدف البحث إلى الوصول إلى الحد الأدنى من الزمن والمواد المستهلكة، وذلك من خلال الاختيار الأمثل لشكل ونسبة (كثافة) البنية الداخلية (الملء) **infill** الذي يحقق المتانة الكافية للعناصر المصنعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد.

قد تم في هذا البحث دراسة متانة عينات معيارية مصنعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد وتحديدًا تقنية البناء بالترسيب المنصهر FDM ودراسة تأثير شكل ونسبة (كثافة) البنية الداخلية (الملء) **infill** في المتانة وذلك من خلال تطبيق أنماط ونسب ملء مختلفة واختبار العينات تجريبياً وكذلك نمذجتها حاسوبياً باستخدام طريقة التحليل بالعناصر المنتهية FEA، وتم مقارنة النتائج التجريبية والحاسوبية، وبيان مدى إمكانية اعتماد نتائج النمذجة الحاسوبية -والتي تسبق عمليات التصنيع- في الدراسات التصميمية، والاستعاضة بها إلى حد ما عن الاختبارات التجريبية. كما تم تحديد أنماط ونسب الملء المناسبة لبعض التطبيقات التي تستخدم الطباعة ثلاثية الأبعاد في الإنتاج.

الكلمات المفتاحية:

الطباعة ثلاثية الأبعاد، البناء بالترسيب المنصهر، نمط الملء، كثافة الملء، متانة، حمض اللبنيك، خيوط الطباعة ثلاثية الأبعاد.

3D printing, Fused Deposition Modeling, FDM, infill, infill pattern, infill density,

3D filament, polylactic acid, PLA



الفصل الأول: الإطار العام للبحث

Research Overview



1.1. المقدمة (INTRODUCTION):

لم تعد الطباعة ثلاثية الأبعاد مقتصرة على تصنيع النماذج الأولية، بل أصبحت واحدة من أهم طرق التصنيع الميكانيكي. حيث تعتبر أحد أهم المحركات الرئيسة للثورة الصناعية المعروفة باسم "الصناعة 4.0" لذلك كان لا بد من دراسة الخصائص الميكانيكية والمتانة للمنتجات المصنعة بهذه التقنية.

2.1. الإشكالية البحثية (RESEARCH PROBLEM):

- * دراسة المتانة في العناصر المنتجة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، واستكشاف طرق تحسينها
- * البحث في تطوير خوارزمية لتنفيذ عملية infill في الطباعة ثلاثية الأبعاد لتخفيض تكاليف الإنتاج مع الحفاظ على الخصائص الميكانيكية المطلوبة قدر الإمكان، وذلك من خلال تخفيض كمية المواد المستهلكة وتخفيض زمن الإنتاج.

3.1. فرضيات البحث (RESEARCH HYPOTHESES):

1. يستغرق تصنيع المنتجات بواسطة تقنيات التصنيع بالإضافة (AM) زمناً كبيراً، مما يشكل تحدياً كبيراً في نجاح عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد للمنتجات الكبيرة، ولا سيما عند استخدام تقنية النمذجة بالترسيب المنصهر FDM والتي تتطلب استمرارية عملية الطباعة دون توقف وذلك للحفاظ على جودة المنتجات.
2. يلعب زمن التصنيع دوراً هاماً ورئيساً في تحديد تكلفة المنتج.
3. ضرورة الحفاظ على الخصائص الميكانيكية المطلوبة للمنتج.

فكان لابد من البحث في حلول تساهم في تقليل زمن تنفيذ المنتج على الآلة -مما يؤثر إيجاباً على تكلفة المنتج- بما يحقق شروط استخدام المنتج وخصائصه الميكانيكية اللازمة لسلامة أدائه الوظيفي.

4.1. هدف البحث (RESEARCH OBJECTIVE):

يهدف هذا البحث إلى:

- * دراسة طرق تأمين المتانة الكافية للعناصر المطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد
- * الوصول إلى الحد الأدنى من الزمن والمواد المستخدمة، وذلك من خلال خوارزمية مناسبة



الشكل 1-1 تحقيق التوازن بين الجودة المطلوبة والزمن وكلفة الإنتاج.

5.1. أهمية البحث (RESEARCH IMPORTANCE):

تكمن أهمية البحث بما يلي:

- * إمكانية التحكم بأسلوب ملء المنتج من خلال التحكم بشكل مادة الملء أو بطريقة ترابط المواد الرابطة

- * تقليل زمن التنفيذ على الآلة من خلال التعديلات المقترحة.

6.1. مسوّغات البحث (RESEARCH JUSTIFICATIONS):

إن مسوّغات البحث الحالي تتلخص في الحاجة إلى إيجاد خوارزمية للاختيار الأمثل لبارامترات عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية البناء بالترسيب المنصهر وتحديدًا البارامترات المتعلقة بشكل وكثافة الملء (infill) لما له من دور كبير في تقليل أو زيادة زمن التنفيذ على الآلة وكذلك كمية المواد اللازمة بما يحقق المتانة الكافية للعناصر المنتجة بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية البناء بالترسيب المنصهر، وذلك من خلال إجراء الاختبارات التجريبية اللازمة بالإضافة لاستخدام النمذجة الحاسوبية بطريقة التحليل بالعناصر المنتهية FEA ومقارنة نتائج الطريقتين وتحليلها ومناقشتها.

7.1. حدود البحث: (RESEARCH LIMITATIONS):

تمثلت حدود البحث في دراسة عينات من مادة PLA المنتجة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد بطريقة البناء بالترسيب المنصهر FDM واختبارها تجريبياً ونمذجتها حاسوبياً بطريقة التحليل بالعناصر المنتهية FEA

8.1. منهج البحث، وأدواته (RESEARCH METHODOLOGY):

في هذا البحث اعتمد المنهج التجريبي والمنهج التحليلي المقارن

9.1. مكونات البحث : (RESEARCH COMPONENTS):

تُقسم البحث إلى خمسة فصول اشتملت على كل مايتعلق بالبحث.

فقد أُشير في الفصل الأول إلى الإطار العام المتضمن مقدمة عامة، والإشكالية البحثية، والفرضيات، والأهداف، والأهمية، ومسوّغات البحث وحدوده، وأُشير أيضاً إلى المنهج المتبع، والأدوات المستعملة.

أما الفصل الثاني، فقد تناول الإطار النظري للبحث ففي هذا الفصل تم التركيز على شرح عام الطباعة ثلاثية الأبعاد (نشأتها، تطورها، تقنياتها) وأهم المواد المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد والمتعلقة بالبحث.

أما الفصل الثالث، فقد استعرض الدراسات المرجعية العلميّة التي تناولت الطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية FDM، وتحديدًا متانة الأجزاء المطبوعة ومجموعة العوامل المؤثرة فيها وقُسمت الدراسات حسب الموضوع إلى

ثلاث مجموعات

أما الفصل الرابع، فقد خصص للجانب التطبيقي الذي تضمن المواد الأولية والأجهزة المستعملة، والاختبارات التي طُبقت على عينات معيارية والنمذجة الحاسوبية لهذه العينات، وتحليل نتائج البحث ومناقشتها.

ثم جرى استعراض خاتمة البحث، والتوصيات، والمقترحات في الفصل الخامس والأخير من البحث.



الفصل الثاني: الإطار النظري للبحث

Theoretical Framework



1.2. تمهيد (PREFACE):

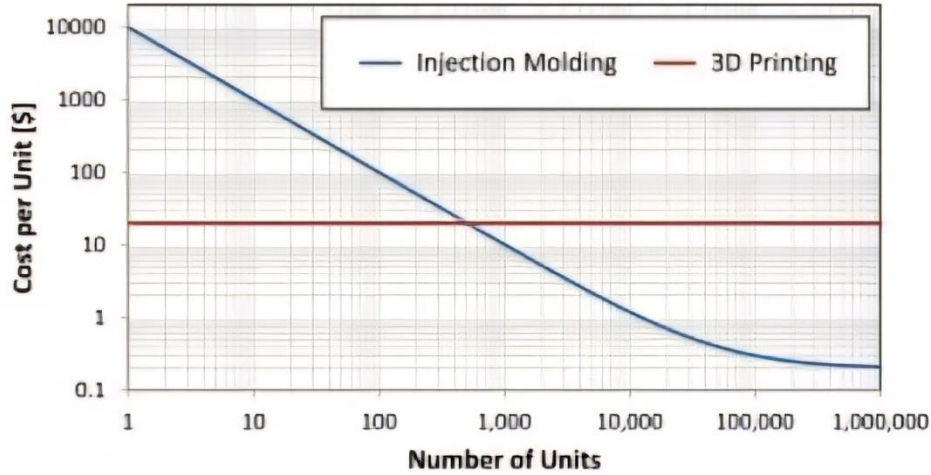
أصبحت الطباعة ثلاثية الأبعاد من أهم طرق التصنيع المستخدمة في الوقت الحالي، ولم تعد مقتصرة على تصنيع النماذج الأولية، فقد أصبح لها تطبيقات محتملة في مجالات متعددة التخصصات كالهندسة والطب والالكترونيات والهندسة المعمارية وغيرها من التخصصات، وفيما يلي سنستعرض الطباعة ثلاثية الأبعاد (نشأتها، تطورها، تقنياتها) وأهم المواد المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد والمتعلقة بالبحث.

2.2. الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D PRINTING): (1؛ 2؛ 3؛ 4؛ 5)

هي إحدى تقنيات التصنيع بالإضافة -على عكس عمليات التصنيع الأخرى التشغيلية الطرحية التي تعتمد مبدأ إزالة المادة- حيث يتم تصنيع القطع عن طريق تقسيم التصميم ثلاثية الأبعاد الخاصة بها إلى طبقات رقيقة جداً باستخدام برامج حاسوبية و من ثم يتم تصنيعها باستخدام الطابعات ثلاثية الأبعاد عن طريق طباعة طبقة فوق الأخرى حتى يتكون الشكل النهائي. وتعد الطابعات ثلاثية الأبعاد في العادة أسرع وأوفر وأسهل في الاستعمال من طرق التصنيع الأخرى في حالات الإنتاج الفردي، حيث توفر الطباعة ثلاثية الأبعاد إمكانية الإنتاج منخفض الحجم والتكلفة. كما هو موضح في (الشكل 1-2)، حيث يبين مثالاً بسيطاً عن العلاقة بين تكلفة الإنتاج وحجم الإنتاج، لنفترض أن لدينا تصميمًا جديدًا ومعقدًا نسبياً للبطة المطاطية. ولتصنيعه بالطريقة التقليدية، سنحتاج إلى استثمار ما لا يقل عن 10000 دولار في الأدوات اللازمة لقالب الحقن. وبعد ذلك، تبلغ تكلفة الوحدة الواحدة عشرين سنناً فقط. إذا كانت لدينا طابعة ثلاثية الأبعاد مثالية، فلن يكون لدينا استثمار في الأدوات، ولكن تكلفة الوحدة تبلغ حوالي 20 دولاراً للقطعة الواحدة. وبالتالي سيكون لدينا نقطة توقف محددة. إذا كان العدد الإجمالي للوحدات التي سيتم بيعها أقل من 500 وحدة، فمن الأكثر اقتصادية اختيار الطباعة ثلاثية الأبعاد. ولكن من الناحية

22 تحسين متانة منتجات الطباعة ثلاثية الأبعاد، قصيدة، بني المراجعة الفصل الثاني: الإطار النظري للبحث

العملية، تتمتع معظم الطابعات ثلاثية الأبعاد بفترة حياة محدودة ويمكن اعتبار تكلفة صيانتها بمثابة تكلفة الأدوات. ولذلك فإن نقطة التوقف تقع في مكان ما بين 50 و 1000 وحدة. (2).



الشكل 1-2 العلاقة بين تكلفة الإنتاج وحجم الإنتاج

كما تتيح الطابعات ثلاثية الأبعاد للمطورين القدرة على طباعة الأجزاء المتداخلة معقدة التركيب، الأجزاء المجوفة خفيفة الوزن وتصنيع الهياكل المعقدة والتي لا يمكن تحقيقها باستخدام تقنيات التصنيع التقليدية الطرحية، كما يمكن صناعة أجزاء من مواد مختلفة وبمواصفات ميكانيكية وفيزيائية مختلفة - كما هو الحال في تقنيات التصنيع الأخرى - ثم تركيبها مع بعضها البعض.

وفيما يلي لمحة عن تاريخ الطباعة ثلاثية الأبعاد وأهم التقنيات والمواد المستخدمة في الوقت الحالي:

1.2.2. لمحة عن تاريخ الطباعة ثلاثية الأبعاد

(A BRIEF HISTORY OF 3D PRINTING)

1.1.2.2. الطباعة ثلاثية الأبعاد في الطبيعة: (6)

تبدو الطباعة ثلاثية الأبعاد وكأنها تقنية متقدمة، لكن العديد من الكائنات الحية كانت تفعل الشيء ذاته منذ دهور. تمثل الرخويات أحد أنواع الطابعات ثلاثية الأبعاد العديدة في الطبيعة والتي تعطينا عندما تكبر الأصداف البحرية كما في (الشكل 2-2)، تبدأ الرخويات بإضافة كربونات الكالسيوم إلى قشرتها الخارجية، مما يمنح الحيوان المتنامي مساحة أكبر في الداخل -وعند النظر بعناية إلى الأصداف البحرية يمكن رؤية خطوط النمو- وكلما ازداد طول القشرة واتساعها، أصبحت أكثر سمكاً أيضاً، حتى لا تصبح هشة، ويتم إفراز القشرة وتكثيفها من المواد الموجودة في بيئة المخلوق بدلاً من وضعها بفوهة مثل الطابعات ثلاثية الأبعاد المعروفة.



الشكل 2-2 الأصداف البحرية هي نتاج "الطباعة ثلاثية الأبعاد" الطبيعية

فلربما تكون مشاهدة الناس لمثل هذه العمليات الطبيعية قد ألهم البعض لإنشاء عمليات تصنيع تعمل بالطريقة ذاتها.

2.1.2.2. نشأة وتطور الطباعة ثلاثية الأبعاد صناعياً:

كغيرها من التقنيات مرت الطباعة ثلاثية الأبعاد من نشأتها بمراحل متعددة - (الجدول 2-1) - حتى وصلت إلى التقنيات المعروفة في يومنا هذا. فقد ظهر وصف المفهوم العام والإجراءات المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد لأول مرة بواسطة موراي لينستر في قصته القصيرة عام 1945 بعنوان "الأشياء تمر"، وأطلق عليها اسم المواد البلاستيكية المغناطيسية حيث أن المواد البلاستيكية تخرج من نهاية ذراع الرسم الذي يتحرك تبعاً لرسومات معينة وتتصلب (7).

كما وصفها ريموند إف جونز في قصته "أدوات التجارة" التي نُشرت في عدد نوفمبر 1950 من مجلة الخيال العلمي المذهل (8). وأشار إليه باسم "الرذاذ الجزيئي".

أما البداية الفعلية وبدء ظهور براءات الاختراع في الطباعة ثلاثية الأبعاد فكان في السبعينات حيث حصل يوهانس إف جوتوالد على براءة اختراع في المعادن السائلة (9)، حيث اخترع جهازاً لنفث المواد المعدنية بشكل مستمر لتشكيل جسم معدني قابل للإزالة عن سطح قابل لإعادة الاستخدام بشكل فوري عن طريق إعادة الصهر. وكانت هذه أول براءة اختراع تصف الطباعة ثلاثية الأبعاد في إنتاج النماذج الأولية السريعة والتحكم بتصنيع النماذج حسب الطلب. فأصبحت تدعى بالنمذجة السريعة **Rapid**

Prototyping (RP)

أما تطوير أول طابعة روبوتية ثلاثية الأبعاد فكان عام 1984 من قبل تشارلز ديليو، والتي تم تسويقها تجارياً بواسطة 3D Systems عام 1989. وكانت هذه الطابعة تستخدم تقنية SLA (والتي سيتم شرحها لاحقاً)، ولا تزال العديد من الآلات التجارية الكبيرة تستخدم هذه التقنية. كما تم إجراء أعمال مبكرة أخرى في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT) وجامعة تكساس.

تتبع ذلك موجة من براءات الاختراع في أوائل التسعينيات لأنظمة مختلفة، حيث تعمل بعض هذه الأنظمة بضخ مادة رابطة بدقة شديدة على سطح وعاء المسحوق لإنشاء الطبقات وذلك بوجود منصة تتحرك نحو الأسفل.

ويستخدم بعضها الآخر الليزر لدمج المسحوق كما هو الحال في تقنية SLS (والتي سيتم شرحها لاحقاً) حيث أصبحت براءات الاختراع المتعلقة بهذه التقنية الأساس لشركة Corp Z - وهي شركة طباعة مبكرة أخرى قامت بإنشاء طابعات صناعية كبيرة- وأصبحت الآن جزءاً من 3D Systems.

وفي الوقت نفسه، حصل كل من س. سكوت وليزا كرامب على براءة اختراع في النمذجة بالترسيب المنصهر (FDM) عام 1989 وشاركا في تأسيس شركة تصنيع الطابعات Stratasys.Ltd. كما تعرف هذه التقنية أيضاً باسم تصنيع الخيوط المنصهرة (fused filament fabrication FFF) والتي يتم فيها تغذية الباثق الساخن بخيوط بلاستيكية والذي يقوم بدوره بوضع المادة بدقة في المكان المناسب.

وفي عام 2005، عندما انتهت صلاحية بعض براءات الاختراع الرئيسية المتعلقة بالطباعة ثلاثية الأبعاد بشكل خاص بتقنية FDM أصبحت هذه التقنية مفتوحة المصدر open source، وبدأ ظهور بعض الشركات الداعمة لذلك. كانت وتيرة التطور سريعة للغاية في هذا المجال، وتم اختراع منهجيات جديدة أكاديمياً وكذلك عن طريق التجارة والشركات، إلى أن أصبح من التحدي بمكان مواكبة كل جديد فيها حيث بدأ نشر التصميمات المختلفة والتشجيع على تحسينها وساعدت في ذلك عوامل كثيرة.

وبحلول عام 2009، انقسم تطوير الطابعات ثلاثية الأبعاد إلى فريقين:

الأول: أولئك الذين يدعمون الطابعات الصناعية الكبيرة (عادة مع بعض التقنيات مسجلة الملكية).

الثاني: هو شبكة كبيرة وغير رسمية من الأشخاص الذين يعملون على الطابعات الاستهلاكية التجارية

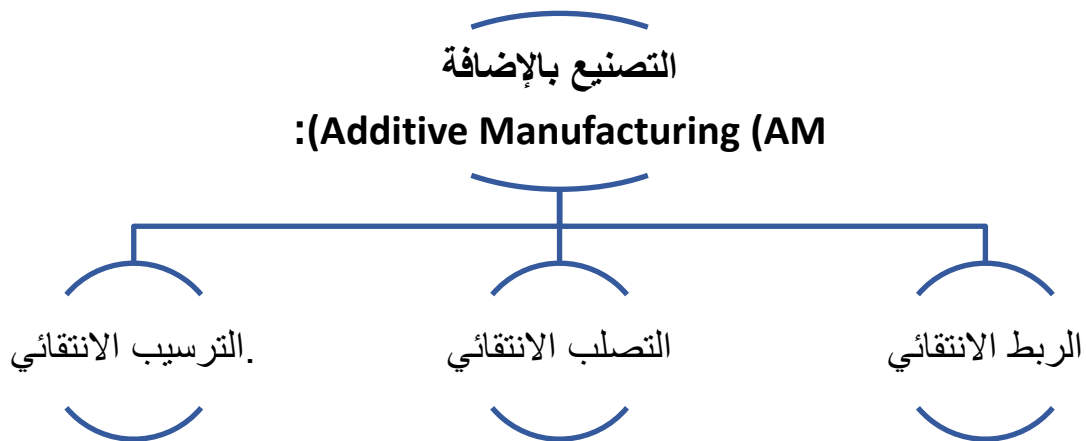
مفتوحة المصدر (1) .

جدول 1-2 نشأة مفهوم الطباعة ثلاثية الأبعاد ومراحل تطورها.

1945	المواد البلاستيكية المغناطيسية، موري لينستر في قصته القصيرة «الأشياء تمر» (7)
1950	«الرداذ الجزيئي» - ريموند إف جونز في قصته «أدوات التجارة» - مجلة الخيال العلمي المذهل (8).
السبعينات	البداية الفعلية وبدء ظهور براءات الاختراع في الطباعة ثلاثية الأبعاد حصل يوهانس إف جوتوالد على براءة اختراع في المعادن السائلة (9) النمذجة السريعة (RP) Rapid Prototyping
1984	تطوير أول طابعة روبوتية ثلاثية الأبعاد SLA
1989	تسويقها تجارياً بواسطة 3D Systems حصل كل من س. سكوت وليزا كرامب على براءة اختراع في النمذجة بالترسيب المنصهر (FDM) وشارك في تأسيس Stratasys.Ltd
	إجراء أعمال مبكرة أخرى في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT) وجامعة تكساس.
التسعينيات	موجة من براءات الاختراع في أوائل التسعينيات لأنظمة مختلفة
2005	انتهت صلاحية بعض براءات الاختراع الرئيسية. أصبحت تقنية FDM مفتوحة المصدر open source
2009	انقسم تطوير الطابعات ثلاثية الأبعاد إلى فريقين: <u>الأول:</u> يدعم الطابعات الصناعية الكبيرة (عادة مع بعض التقنيات مسجلة الملكية) <u>الثاني:</u> شبكة كبيرة من الأشخاص الذين يعملون على الطابعات مفتوحة المصدر (1)

2.2.2. تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D PRINTING TECHNOLOGIES):

من الناحية النظرية، تعمل الطابعات ثلاثية الأبعاد بشكل مشابه لتشكيل جدار من اللبّينات إلا أنها أكثر مرونة فيما يمكن بناؤه. فبطريقة أو بأخرى، تبدأ عمليات الطباعة ثلاثية الأبعاد بنموذج حاسوبي لجسم ما، ثم تستخدم هذا النموذج للتحكم في جهاز روبوتي يستخدم إحدى تقنيات الطباعة الرئيسة الثلاث لتشكيل جسم ما. بشكل عام، هناك ثلاث فئات من التصنيع بالإضافة (AM) **Additive Manufacturing**: الربط الانتقائي، والتصلب الانتقائي، والترسيب الانتقائي. (الشكل 2-3).



الشكل 2-3 تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد

1.2.2.2. تقنيات الربط الانتقائي:

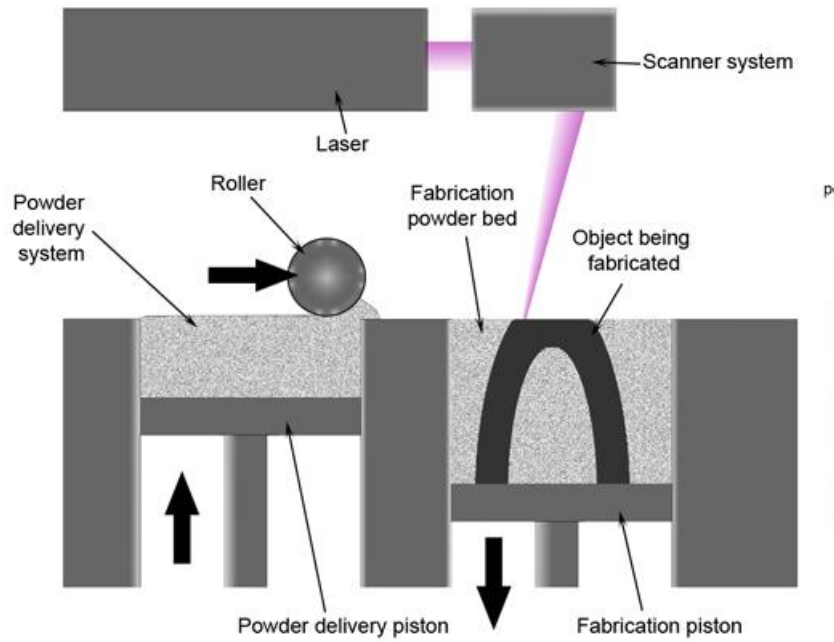
تُصنع الأجسام من مسحوق (يعتبر المعدن والجبس من المواد شائعة الاستخدام) عن طريق تطبيق عوامل ربط أو حرارة لدمج جزيئات المسحوق معاً. يمكن باستخدام هذه التقنية تصنيع عناصر معقدة وحساسة للغاية، إلا أنه قديكون من الصعب التعامل مع المسحوق الناعم، وتكون طابعات هذه الفئة باهظة الثمن

وتتدرج في هذه الفئة تقنية التلييد الانتقائي بالليزر (Selective laser sintering SLS).

1.1.2.2.2. تقنية التلييد الانتقائي بالليزر (Selective laser sintering SLS):

تم اختراع وتطوير تقنية SLS على يد د.كارل ديكارد-Dr. Carl Deckard بجامعة تكساس في منتصف الثمانينيات وتحت رعاية وكالة المشاريع البحثية المتقدمة التابعة لوزارة الدفاع الأمريكية DARPA.

تستخدم هذه التقنية ليزر عالي القدرة للحام جزيئات صغيرة من بلاستيك أو معدن أو خزف أو زجاج في كتلة صلبة لتشكيل الجسم المطلوب، حيث يتم استخدام الليزر لدمج طبقة واحدة من المسحوق في المرة الواحدة. يتم دمج الطبقة الأولى بالمنصة، ثم يتم إضافة طبقة رقيقة أخرى من المسحوق فوق الطبقة الأولى، وهكذا حتى يكتمل بناء الجسم المطلوب، (الشكل 2-4).



الشكل 2-4 تقنية التلييد الانتقائي بالليزر SLS (4)

2.2.2.2. تقنيات التصلب الانتقائي:

يقوم التصلب الانتقائي بتشكيل جسم صلب في وعاء من السائل عن طريق تطبيق الطاقة بشكل انتقائي لتصلب السائل طبقة تلو الأخرى، عادة يتم تشكيل الطبقة الأولى على منصة البناء، والتي تتحرك بعد ذلك إلى الأسفل داخل السائل أو يتم سحبها لأعلى من السائل). من الأمثلة على ذلك.

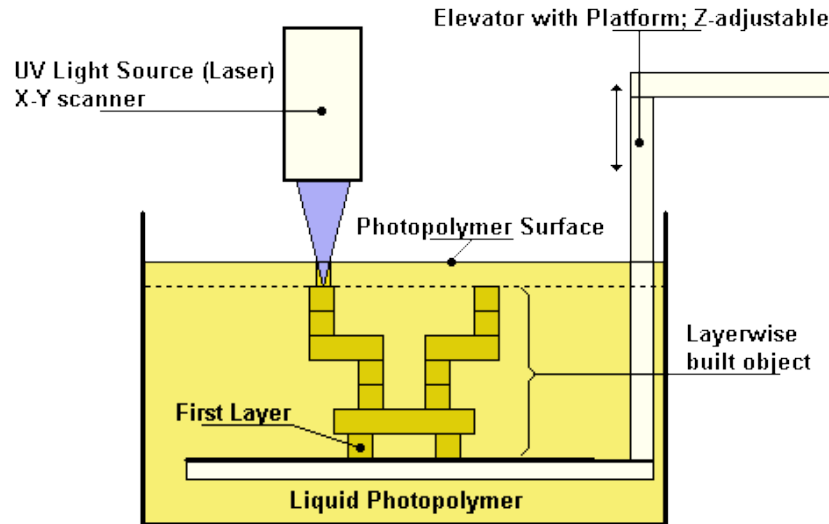
➤ تقنية الطباعة الحجرية المجسمة (Stereo Lithography, SLA)

➤ تقنية المعالجة الرقمية بالضوء (Digital Light Projection, DLP)

1.2.2.2.2. تقنية الطباعة الحجرية المجسمة (Stereo Lithography, SLA):

تم تطوير هذه التقنية عام 1986 على يد تشارلز هال Charles Hull. تستخدم هذه التقنية البلمرة الضوئي باستخدام الأشعة فوق البنفسجية UV لصنع مجسمات صلبة من السوائل.

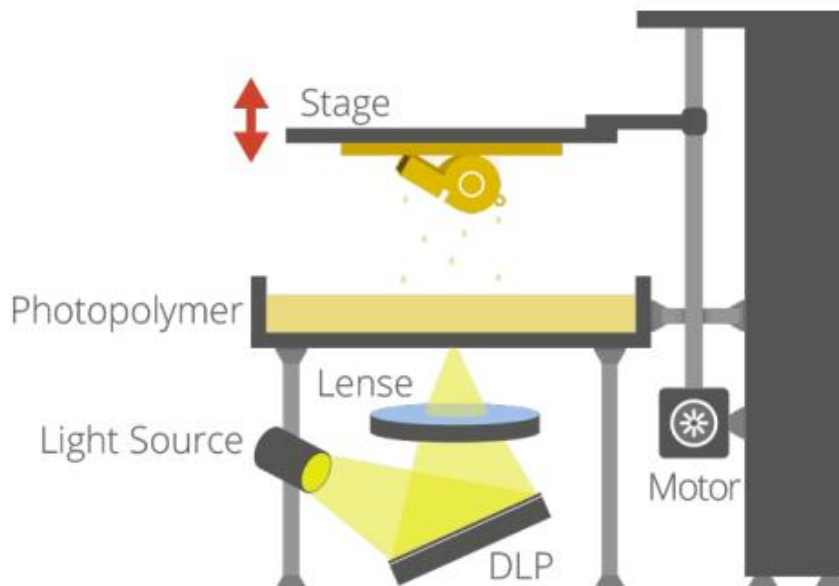
تمتاز بجودة مرتفعة ووقت إنتاج قصير نسبياً مهما كان المنتج المطلوب معقداً، (الشكل 2-5).



الشكل 5-2 تقنية الطباعة الحجرية المجسمة (Stereolithography, SLA)

2.2.2.2.2. تقنية المعالجة الرقمية بالضوء (Digital Light Projection, DLP):

تشبه إلى حد كبير تقنية SLA إلا أنها تستخدم الضوء التقليدي. تم تطوير هذه التقنية بواسطة د. لاري هورنبيك-Dr. Larry Hornbeck لشركة تكساس للأجهزة Texas. تستخدم هذه التقنية في الطابعات المكتبية وتمتاز بالدقة العالية والجودة الممتازة والسرعة، (الشكل 6-2).



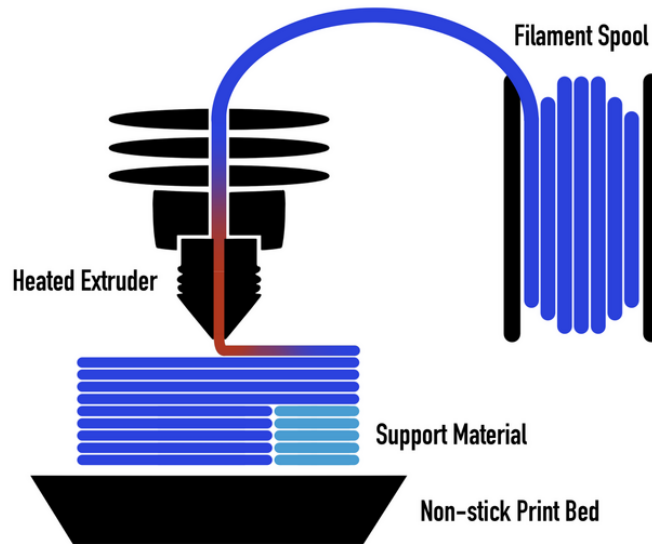
الشكل 6-2 تقنية المعالجة الرقمية بالضوء (Digital Light Projection, DLP)

3.2.2.2. تقنيات الترسيب الانتقائي:

تقوم تقنيات الترسيب الانتقائي بوضع المواد في المكان اللازم فقط. لتكوين الجسم بدقة، عن طريق صهر خيط من البلاستيك (filament) ثم وضع البلاستيك المنصهر في المكان المناسب، وينتمي لهذه التقنيات تقنية البناء بالترسيب المنصهر (Fused Deposition Modeling FDM) (10) والتي يقوم عليها هذا البحث.

1.3.2.2.2 . تقنية البناء بالترسيب المنصهر (Fused Deposition Modeling FDM)

تعتبر أشهر طريقة للطباعة ثلاثية الأبعاد وتستخدم هذه الطريقة لطباعة أنواع مختلفة من اللدائن الحرارية (Thermoplastic) مثل ABS, PLA, PVA, PETG، حيث يتم فيها تسخين المادة البلاستيكية إلى درجة حرارة مناسبة ثم بثق هذه المادة في إحداثيات محددة لتشكيل الطبقة تلو الأخرى لبناء الجسم المطلوب وفقاً للأوامر البرمجية المتضمنة في ملف G-code، (الشكل 2-7). تستخدم هذه التقنية بشكل شائع في الطابعات المكتبية لصنع المجسمات المختلفة.



الشكل 2-7 تقنية البناء بالترسيب المنصهر (FDM) (11)

3.2. أهم المواد المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد

:(3D PRINTING MATERIALS)

هناك العديد من الخامات والمواد البوليميرية (Materials) المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية

البناء الترسيب المنصهر FDM، والتي تأتي بشكل خيوط (filament).

وفيما يلي أهم المواد المستخدمة في البحث:

1.3.2. مادة PLA (عديد حمض اللبنيك) (POLYLACTIC ACID):

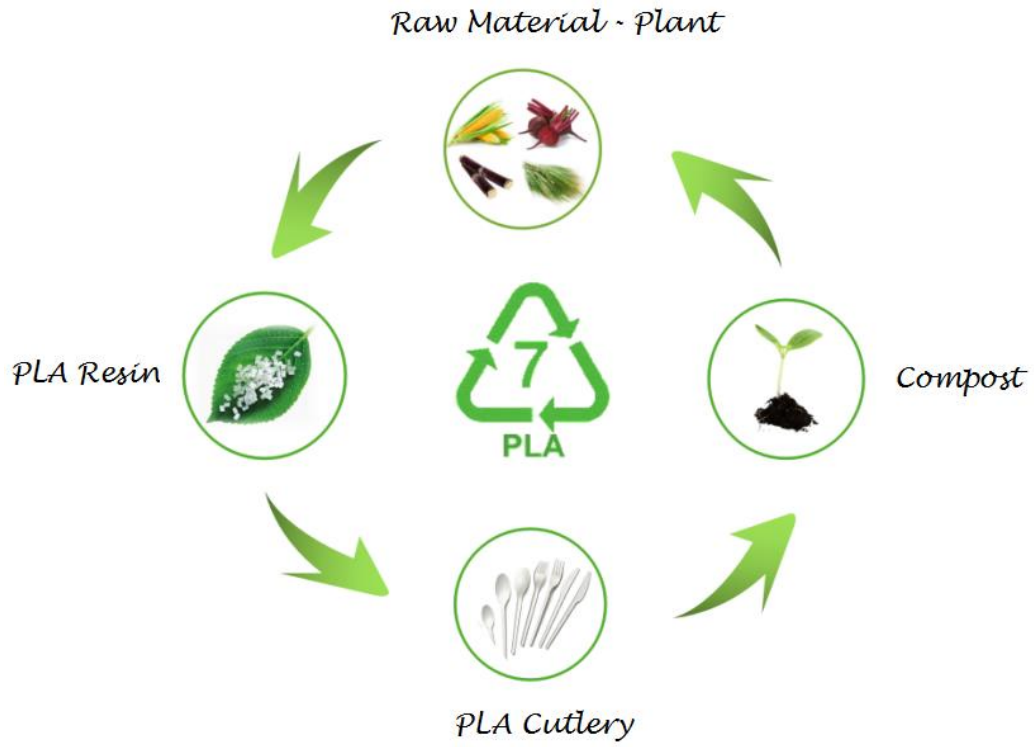
تعد خيوط PLA من أشهر المواد المستخدمة فهو عصب الحياة في الطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية البناء

الترسيب المنصهر FDM.

حمض البوليللاكتيك عبارة عن بوليمير لدن حراري يصنع من الذرة والمواد النشوية بشكل عام.[8]

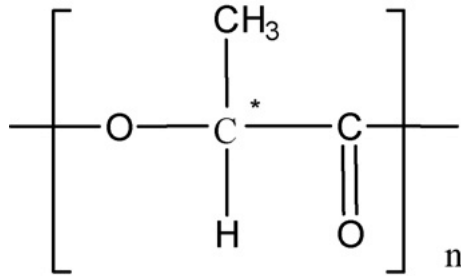
تعتبر مادة PLA الأسهل في الطباعة حيث يتم طباعتها بدرجات حرارة منخفضة نسبياً. وهي مادة

صديقة للبيئة ويمكن أن تتحلل في التربة، (الشكل 2-8).



الشكل 2-8 دورة حياة مادة PLA

التركيب الكيميائي لمادة PLA هو $(C_3H_4O_2)_n$ ، كما في (الشكل 2-9).



الشكل 2-9 التركيب الكيميائي لمادة PLA

4.2. التصوير بالأشعة تحت الحمراء :

تُصوّر الكاميرات العادية الأضواء المرئية كتلك التي تراها عيوننا، أما فن التصوير بالأشعة تحت الحمراء فهو تقنية تعني استخدام فلاتر وتجهيزات معينة للكاميرا بحيث تستطيع تصوير المدى الذي لا تستطيع عيوننا أن تراه. وعندها تكون النتائج غير مألوفة بالنسبة إلى التصوير العادي، فالسمااء التي نراها زرقاء مثلاً تكون غامقة والأشجار والعناصر ذات المكونات الغامقة تكون فاتحة، وقد يضيف المصور بعض التعديلات على الصور لإضفاء مزيد من الإضافات.

أطوال الموجة المستخدمة للتصوير الفوتوغرافي تتراوح من حوالي 700 نانومتر إلى حوالي 900 نانومتر. الفيلم عادة ما يكون حساساً للضوء المرئي جداً، لذلك يتم استخدام فلتر الأشعة تحت الحمراء؛ وهذا يتيح ضوء تمرير الأشعة تحت الحمراء من خلال الكاميرا.

1.4.2. تاريخ التصوير بالأشعة تحت الحمراء :

حتى أوائل القرن العشرين، لم يكن التصوير بالأشعة تحت الحمراء متاحاً بسبب عدم توفر الحساسية في معطيات التصوير لأطوال الموجة. حدث التصوير بالأشعة تحت الحمراء لأول مرة في 1910 عبر مجلة أمريكية تُدعى مجلة القرن.

تم تطوير لوحات التصوير الحساسة للأشعة تحت الحمراء في الولايات المتحدة خلال الحرب العالمية الأولى للتحليل الطيفي، وتم التحقيق في أصباغ توعية بالأشعة تحت الحمراء لتحسين اختراق الضباب في التصوير الجوي.

أصبح التصوير بالأشعة تحت الحمراء رائجاً عند هواة التصوير في الثلاثينات عندما عرض فيلم تجاري بطريقة هذه التقنية. ونشرت صحيفة التايمز بانتظام صور طبيعية وصور جوية التقطها مصورو طاقمها

باستخدام فيلم إلفورد بالأشعة تحت الحمراء. وبحلول عام 1937 كان هناك 33 نوعاً من الأفلام بالتصوير بالأشعة تحت الحمراء متاح في خمس شركات مصنعة.

2.4.2. مستشعر الأشعة تحت الحمراء :

المستشعر هو الجزء الأساسي المسؤول عن التصوير في داخل الكاميرا ولذلك فهو المعني الأول عند التحدث عن تصوير الأشعة تحت الحمراء. يقوم بعض المختصين والمحترفين بتعديل المستشعر في داخل الكاميرا ليقوم بتصوير الأشعة تحت الحمراء بسهولة ويسر، وذلك لأن المستشعر محمي بمرشح خاص يقوم بصد الأشعة تحت الحمراء والسماح للطيف المرئي بالعبور إلى المستشعر، ويسمى هذا المرشح عادة بـ المرآة الساخنة. يقوم المختصون في هذا المجال برفع هذا المرشح للسماح للأشعة تحت الحمراء بالعبور بسهولة إلى المستشعر وبهذه الطريقة يكون تصوير الأشعة ميسوراً كالتصوير الاعتيادي، حيث تكون مدة التعريض مقاربة لمدة التعريض عند التصوير الطبيعي. يمكن تنقيح الصورة أكثر من خلال استخدام مرشح آخر على العدسة هذه المرة (ويُسمى بالمرآة الباردة) حيث يقوم بالسماح للأشعة بالعبور ويصد أمواج الطيف الأخرى. على أن عملية إزاحة هذا المرشح من على المستشعر هي عملية خطيرة وحساسة، وعند القيام بها لا يمكن إرجاع المستشعر كما كان عليه. لهذا السبب يقوم البعض باقتناء بعض الكاميرات الرخيصة نسبياً والتي يقومون بتحويلها (أي رفع المرشح فيها) وتخصيصها لهذا النوع من التصوير بجانب الكاميرات الأكثر تقدماً والتي تستخدم للتصوير العادي.

5.2. الخلاصة (CONCLUSION):

إن المعرفة المسبقة للتقنيات والمواد المستخدمة وتطورها عبر الزمن بداية و بارامترات تشغيلها في أثناء المراحل التكنولوجية من قبل المهندس التكنولوجي يساعد في الحصول على منتجات ذات جودة عالية و تفادي أي مشكلات غير متوقعة قد يتم الوقوع بها، وكذلك ملاحظة الثغرات وإيجاد الحلول لها.



3. الفصل الثالث: الدراسات المرجعية

Literature Review



1.2. تمهيد (PREFACE) :

هناك عددٌ من الدراسات المرجعية العلميّة التي درست المتغيرات (البارامترات) المختلفة في عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد وتأثيراتها على زمن وكلفة عملية الطباعة وكذلك على متانة وجودة الأجزاء المطبوعة. قامت معظم الأبحاث السابقة في هذا المجال على منهجين رئيسيين، هما الاختبارات التجريبية والمحاكاة الحاسوبية، حيث اعتمدت أحد هذين المنهجين أو كليهما. وبالتالي يمكن تصنيف الدراسات السابقة إلى ثلاثة أقسام، وهي:

➤ دراسات اعتمدت المنهج التجريبي

➤ دراسات اعتمدت منهج المحاكاة الحاسوبية

➤ دراسات اعتمدت المنهجين معاً

❖ الدراسة المرجعية الأولى بعنوان: (2)

"التحليل بطريقة العناصر المنتهية للنموذج الفرعي للهياكل المصنعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد"

Sub-modeling Finite Element Analysis of 3D Printed Structures.

(Javad Zarbakhsh, Armin Iravani, Zeinab Amin-Akhlaghi, 2015)

قام الباحثون جافاد زارباخش، آرمن إيرفاني، وزينب أمين أخلاحي بدراسة لتحليل الخواص الميكانيكية للجزء المطبوع ثلاثي الأبعاد باستخدام النمذجة الفرعية المتداخلة وطريقة العناصر المنتهية، في حين أن تفاصيل الطباعة ثلاثية الأبعاد مضمنة في النموذج الفرعي.

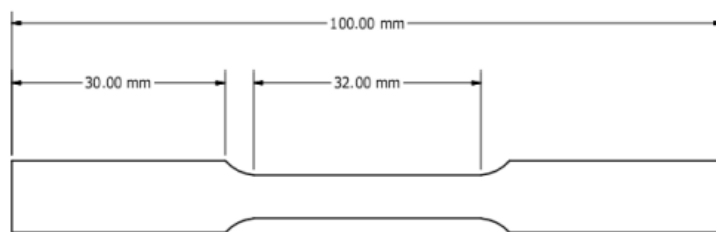
اعتمدت الدراسة عينات اختبار الشد القياسية وفق المعيار ASTM E8 (الشكل 1-3)، وتم اختبار عينة الشد تحت التحميل أحادي المحور في الاتجاه x بتطبيق قوة قدرها $F = 1000N$ على كلي الجانبين.

تمت محاكاة اختبار الشد باستخدام طريقة العناصر المنتهية والنمذجة الفرعية في بيئة ANSYS Workbench، حيث تموضع النموذج الفرعي في منتصف عينة الشد.

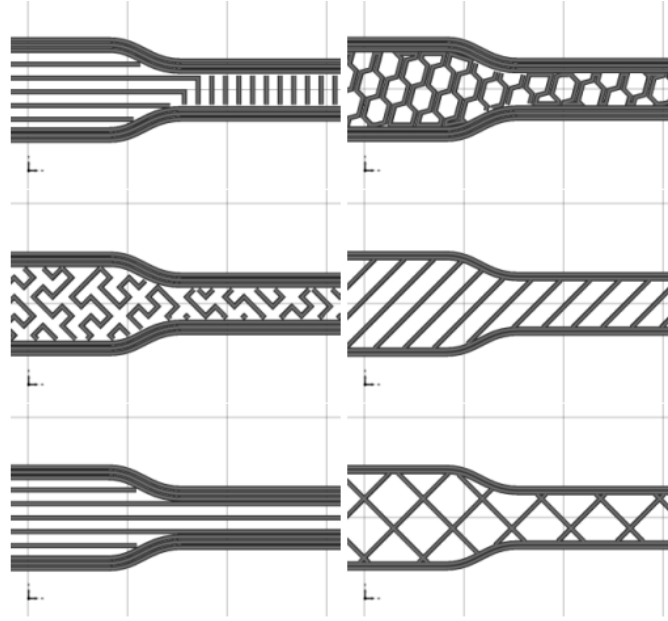
وقدمت الدراسة أداة عامة يمكنها تحسين جودة الأجزاء المطبوعة ثلاثية الأبعاد، وتمت مناقشة النتائج نظرياً

وتجريبياً وحاسوبياً من خلال النمذجة والمحاكاة باستخدام طريقة العناصر المنتهية FEA والنمذجة الفرعية

.Sub-modeling



الشكل 1-3 عينة الشد القياسية ASTM E8



الشكل 2-3 أنماط التعبئة الداخلية المدروسة

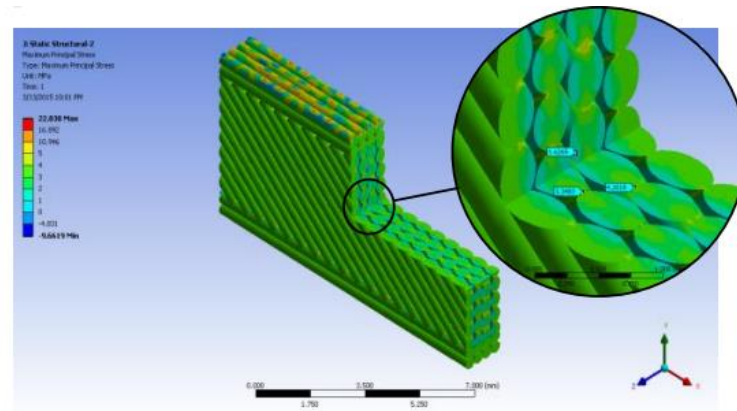


Figure 9 Contour plot of maximum principle stress in sub-model region shows higher stress than in the global model.

الشكل 3-3 الإجهاد الأعظمي في النموذج الفرعي

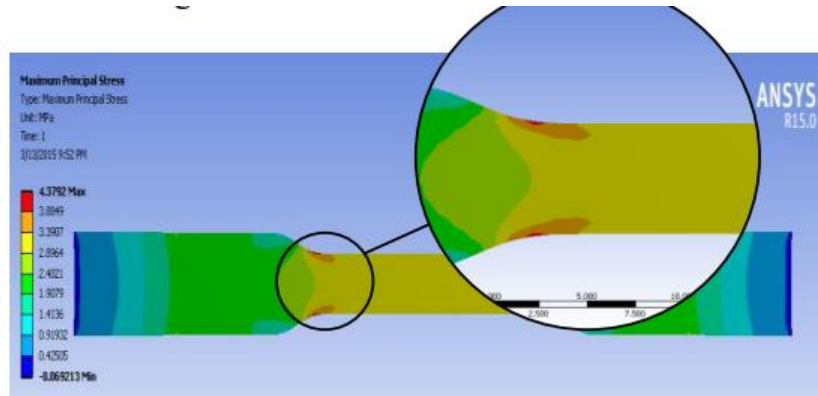


Figure 8 Contour plot of Principle stress in global model. Maximum value of principle stress is 4.3MPa.

الشكل 3-4 الإجهاد الأعظمي في النموذج العام

نتائج الدراسة:

- تم الحصول على القيمة العظمى للإجهاد المبدئي وقدرها 4.3 MPa في منطقة النموذج الفرعي. ووجد أن الإجهاد الناتج في هذه المنطقة يساوي 4 أضعاف الإجهاد في النموذج الكامل.
- ولكن يجب الأخذ بعين الاعتبار أن نتائج اختبارات الشد للعينات التي يتم تشكيلها وفقاً لأبعاد قياسية من أجزاء محددة من جزء أو مادة ما قد لا تمثل تماماً الخصائص الميكانيكية للمنتج النهائي بأكمله أو سلوكه أثناء الخدمة في بيئات مختلفة. و هذا ما ينطبق أيضاً على العينات المطبوعة ثلاثية الأبعاد.
- يتركز الإجهاد الأعظمي المبدئي بشكل كبير بين الطبقات.

❖ الدراسة المرجعية الثانية بعنوان: (12)

"دراسة تأثير تصميم بنية الملء الداخلية على زمن وكلفة الإنتاج لأجزاء من مادة ABS مصنعة بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد"

Study of infill print design on production cost–time of 3D printed ABS parts

(Liseli Baich, Hazel Marie, Guha P. Manogharan, 2015)

قام الباحثون ليزلي بايخ، غوها مانوغاران، وهاتسل ماري بدراسة تأثير تصميم بنية الملء الداخلية infill على زمن وتكلفة الإنتاج للأجزاء المصنعة بالطباعة ثلاثية الأبعاد من مادة ABS وكذلك على الخصائص الميكانيكية المختلفة، باستخدام العينات التالية:

* عينة الشد المعيارية للمواد البلاستيكية ASTM D638.

* عينة الضغط المعيارية للمواد البلاستيكية ASTM D695.

* عينة الانحناء المعيارية للمواد البلاستيكية ASTM D790.

تم اختيار عينات الاختبار بناءً على معايير اختبار ASTM وتم تصميم العينات مع مراعاة ظروف التحميل وتكلفة الإنتاج مقارنة مع العينات الصلبة المصمتة (المملوءة بنسبة 100%).

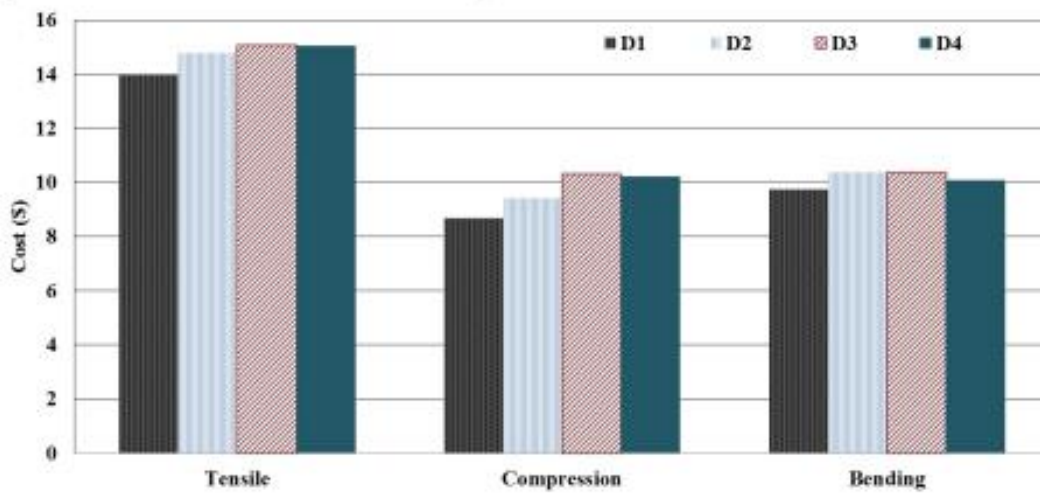
تمت طباعة عدة مجموعات من العينات لكل منها كثافة ملء مختلفة (منخفضة، عالية، مزدوجة الكثافة، صلبة)، وتم إجراء اختبارات الشد والضغط والانحناء لكل منها.

نتائج الدراسة:

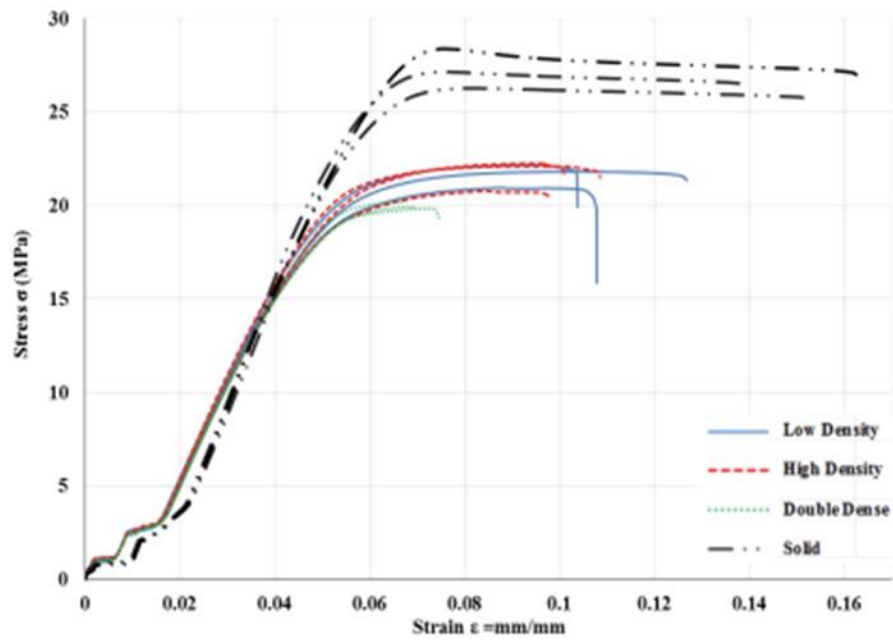
- كان لتكلفة الطباعة تأثير أكبر على تكلفة الإنتاج من تكلفة المواد المستخدمة.
- أظهرت العينات المصمتة أعلى متانة (الشكل 3-7) وبالمقابل تكلفة أعلى.
- بينما أبدت العينات منخفضة الكثافة وفر كبير في التكاليف مع انخفاض في المتانة المطلوبة لبعض التطبيقات، (الشكل 3-5) و(الشكل 3-6).

Density	Tensile		Compression		Bending	
	UTS (MPa)	Modulus, E (MPa)	Compressive strength (MPa)	Modulus, E (MPa)	Flexural strength (MPa)	Modulus, E (MPa)
Low (D1)	21.64	486.45	23.79	624.55	32.85	456.68
High (D2)	21.71	542.04	27.77	824.28	34.42	459.83
Double dense (D3)	20	511.68	31.09	850.52	36.9	554.41
Solid (D4)	27.27	638.79	56.76	1191.98	43.75	573.06
Average % Std. Dev	2.88	4.16	7.16	6.85	2.32	5.23

الشكل 3-5 الخصائص الميكانيكية للعينات المختبرة



الشكل 3-6 تكلفة الإنتاج



الشكل 7-3 مخطط الشد

❖ الدراسة المرجعية الثالثة بعنوان: (13)

"تحليل خصائص الشد، الضغط، والانحناء لأجزاء بلاستيكية من مادة ABS P430 مصنعة بالطباعة

ثلاثية الأبعاد بتقنية البناء بالترسيب المنصهر تبعاً لاتجاه الطباعة"

**ANALYZING THE TENSILE, COMPRESSIVE, AND FLEXURAL PROPERTIES
OF 3D PRINTED ABS P430 PLASTIC BASED ON PRINTING ORIENTATION
USING FUSED DEPOSITION MODELING**

(R. Hernandez, D. Slaughter, D. Whaley, J. Tate, and B. Asiabanpour, 2016)

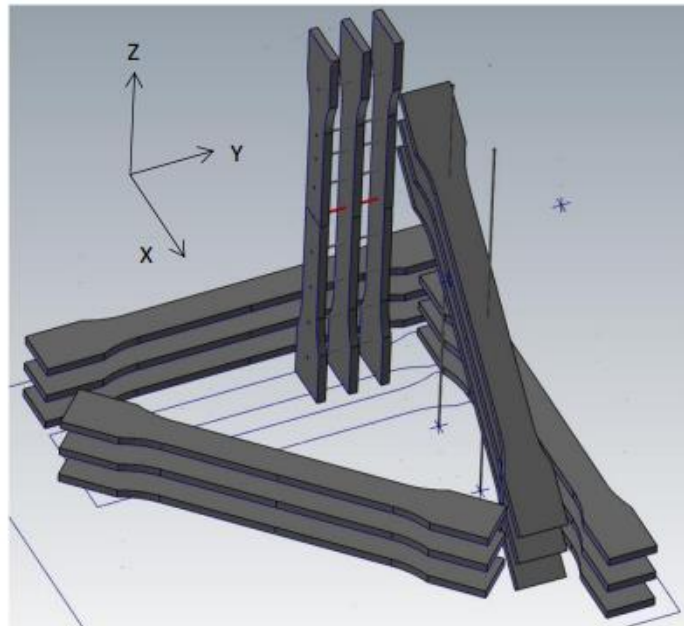
أجريت دراسة في جامعة تكساس لتحليل الخصائص الميكانيكية لعينات مطبوعة من مادة ABS ودراسة تأثير اتجاه الطباعة على هذه الخصائص.

تمت طباعة 45 عينة في اتجاهات ووضعية زوايا مختلفة (0 درجة، 45 درجة، 90 درجة في المستوى XY، و 45 درجة، 90 درجة في المستوى Z)، كما في (الشكل 3-8)، وتم إجراء اختبارات الشد والضغط والانحناء باستخدام العينات المعيارية التالية:

* عينة الشد المعيارية للمواد البلاستيكية ASTM D638 Type I.

* عينة الضغط المعيارية للمواد البلاستيكية ASTM D695.

* عينة الانحناء المعيارية للمواد البلاستيكية ASTM D790.



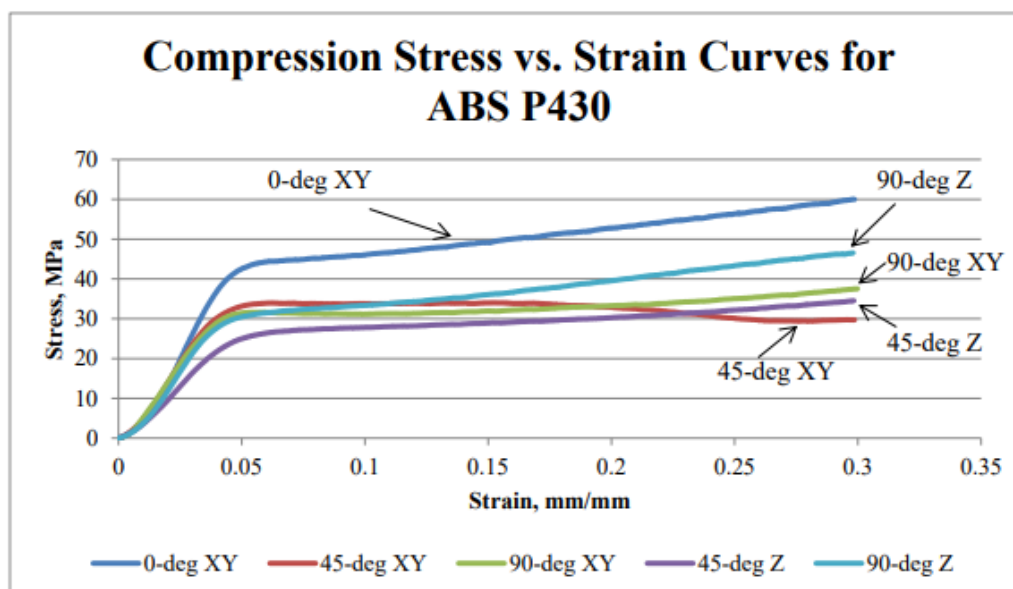
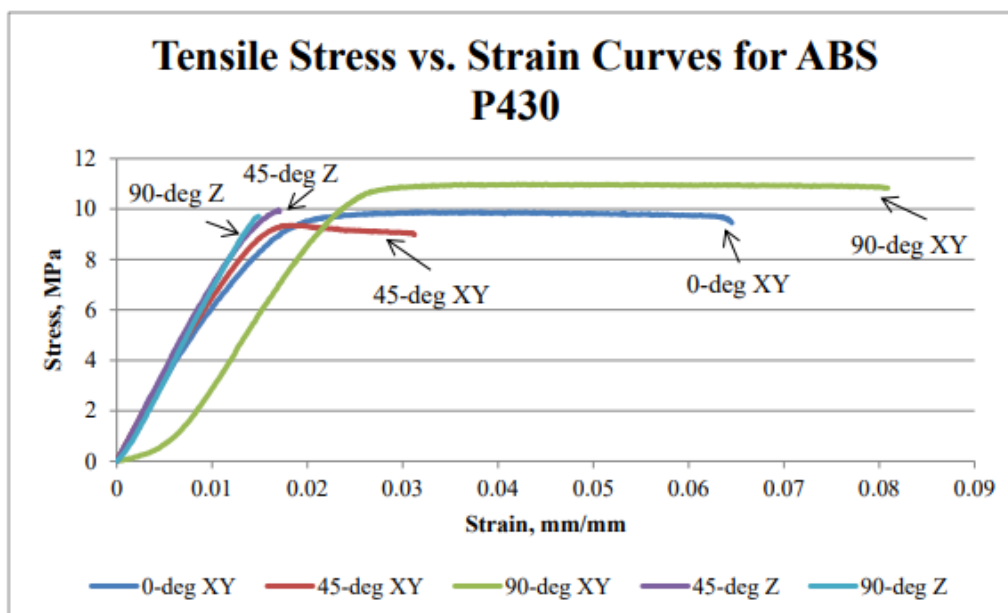
الشكل 3-8 العينات المطبوعة باتجاهات وزوايا مختلفة.

فرضيات الدراسة:

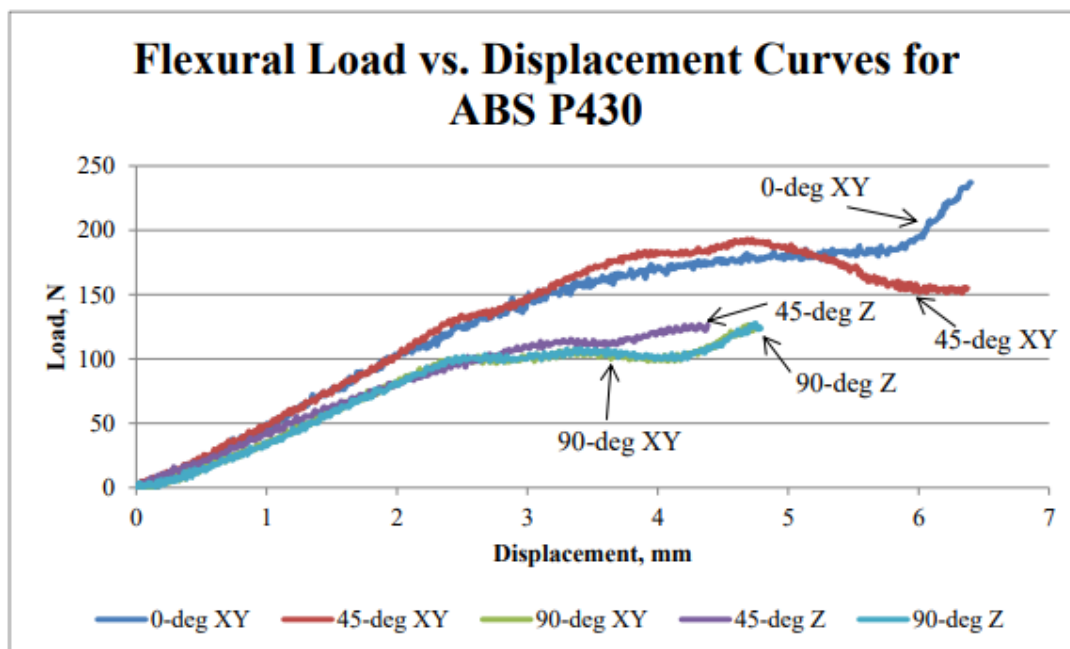
- سرعة البناء في المستوى XY أكبر منها في الاتجاه Z، وبالتالي فإن بناء النموذج في الوضعية الأفقية يتم بسرعة أكبر منها في الاتجاهات المختلفة الأخرى.
- تكون متانة النموذج في مستوى الطبقة أعلى من متانته بين الطبقات.

نتائج الدراسة:

- أبدت العينات المطبوعة بزاوية 90 درجة في المستوى XY أعلى مقاومة شد، بينما ساهمت الطباعة في الاتجاه (0 درجة في المستوى XY) في زيادة المتانة بشكل كبير على الضغط والانحناء، (الشكل 3-9) و (الشكل 3-10).
- يؤثر اتجاه البناء على الخصائص الميكانيكية لـ ABS P430، فيمكن أن توفر الطباعة باتجاهات محددة متانة وصلابة أفضل اعتماداً على التطبيق.



الشكل 3-9 نتائج الاختبارات للعينات



الشكل 10-3 نتائج الاختبارات للعينات

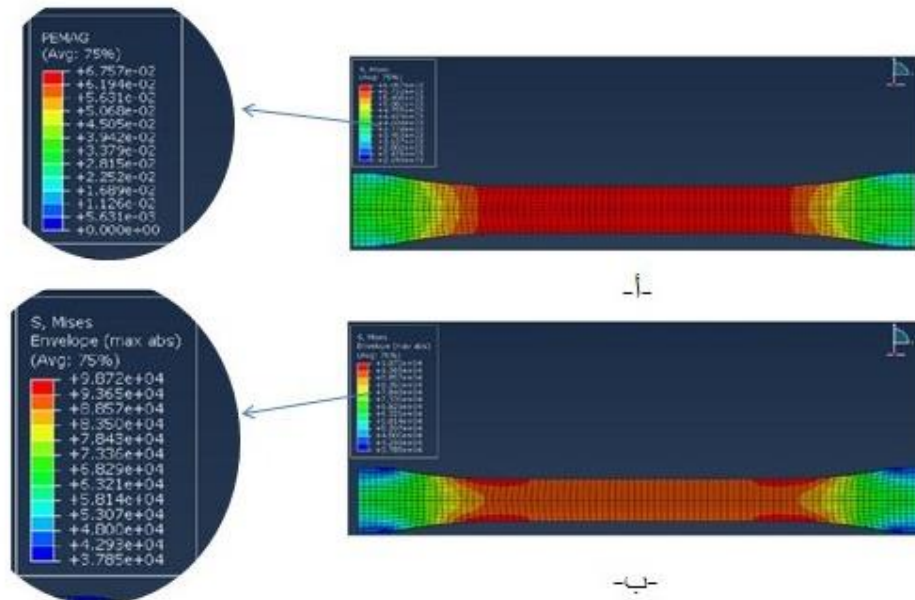
❖ الدراسة المرجعية الرابعة بعنوان: (14)

"مقارنة بوليمير إيزوتروبي مع بوليمير مطبوع بتقنية الترسيب المنصهر وتحليل الإجهادات باستخدام العناصر المنتهية"

A Comparative Finite Element Stress Analysis of Isotropic and Fusion Deposited 3D Printed Polymer.

(Robert Sayre, 2014)

أجريت دراسة في معهد Rensselaer Polytechnic Institute للمقارنة بين الخصائص الميكانيكية لصفحة ايزوتروبية الشكل أ- وعينة منتجة بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد الشكل ب- وذلك بالتحليل بطريقة العناصر المنتهية باعتماد العينة المعيارية ASTM D 638، (الشكل 3-11).



الشكل 3-11 مقارنة الإجهاد في صفية ايزوتروبية وعينة منتجة بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد.

نتائج الدراسة:

أظهرت الدراسة أن اتجاه الألياف المناسب ممكن أن يساهم في زيادة متانة العينة مقارنة بالعينة الايزوتروبية.

❖ الدراسة المرجعية الخامسة بعنوان:

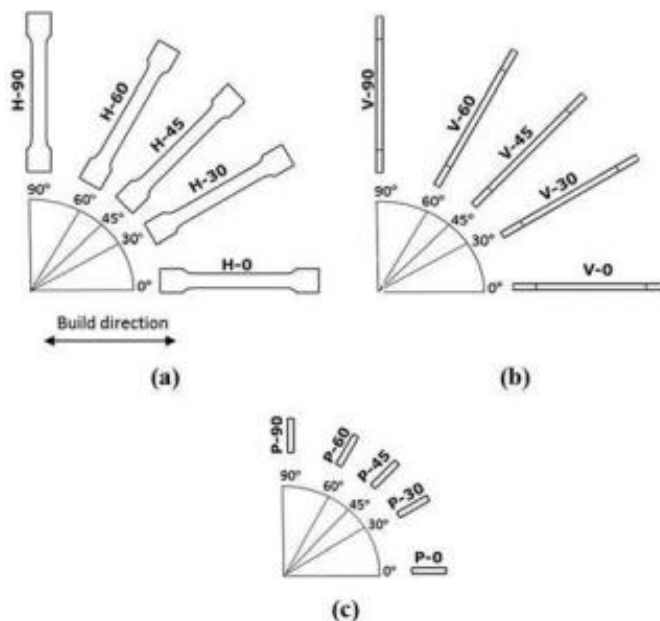
"الفحص التجريبي لعملية البناء بالترسيب المنصهر لتحسين الخصائص الميكانيكية وتكلفة الإنتاج"

Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost.

(Ismail Durgun Rukiye Ertan, 2015)

نشرت دراسة في Rapid Prototyping Journal والتي أجريت لتحسين الخصائص الميكانيكية وتكاليف الإنتاج في عمليات الطباعة ثلاثية الأبعاد لمادة ABS، حيث كان الهدف من هذه الدراسة البحث في كيفية تأثير الزاوية النقطية واتجاه البناء في النمذجة بالترسيب المنصهر (FDM) على الخصائص الميكانيكية وخشونة السطح وتكاليف الإنتاج.

تمت الاختبارات باعتماد العينة المعيارية ISO 527: 1997، وتمت طباعة العينات بأوضاع زاوية مختلفة (الشكل 3-12)، حيث تم اختبار خمس زوايا نقطية مختلفة (0 درجة، 30 درجة، 45 درجة، 60 درجة، 90 درجة) وثلاثة اتجاهات (أفقي ، رأسي ، عمودي) باستخدام مادة ABS.

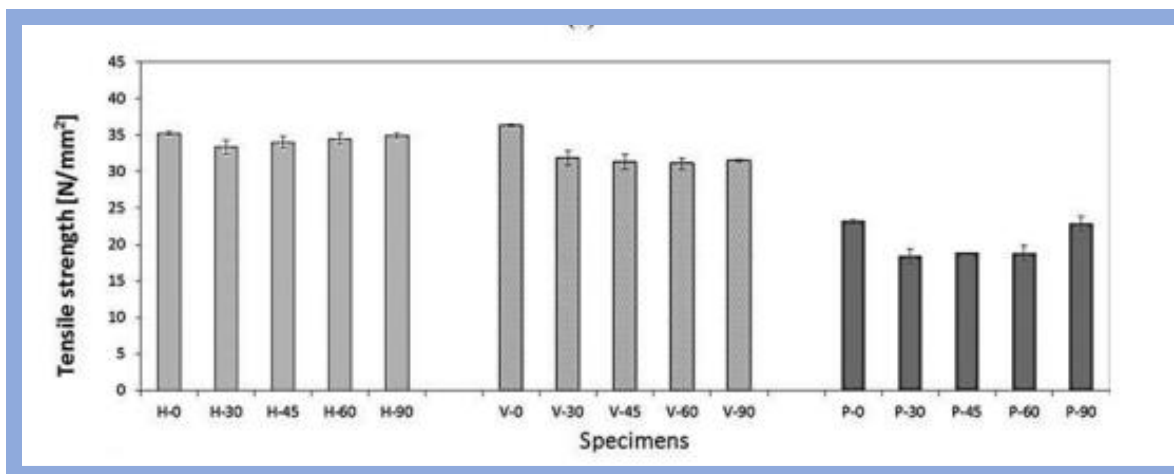


الشكل 12-3 الأوضاع الزاوية المختلفة للعينات المختبرة

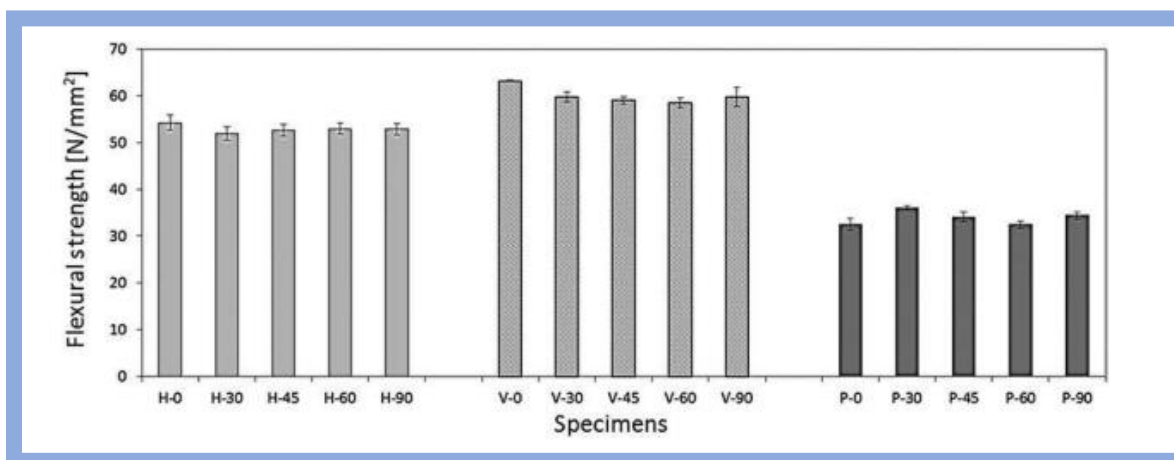
نتائج الدراسة:

أظهرت الدراسة النتائج التالية، (الشكل 13-3. Error! Reference source not found.) و(الشكل 14-).

- إن لاتجاه البناء تأثير أكثر أهمية من الزاوية النقطية على خشونة السطح والخصائص الميكانيكية.
- هناك علاقة وثيقة بين خشونة السطح والخصائص الميكانيكية.
- تم تحقيق الخواص الميكانيكية المثلى وخشونة السطح مع الحد الأدنى من تكلفة الإنتاج بزاوية نقطية (0 درجة) في الاتجاه الأفقي.



الشكل 3-13 نتائج اختبارات الشد



الشكل 3-14 نتائج اختبارات الانحناء

3-2- الخلاصة (CONCLUSION):

عُرِضَ في هذا الفصل أهم الدراسات المرجعية العلمية التي قامت بالبحث في متانة الأجزاء المطبوعة وتبين وجود بعض التوافقات وبعض الاختلافات في الدراسات المرجعية، حيث تناولت في الآونة الأخيرة بعض الدراسات الطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية **FDM** من عدة جوانب، ومنها دراسة تأثير عدد من بارامترات عملية الطباعة على الخصائص الميكانيكية للأجزاء المطبوعة واتخذت معظم هذه الدراسات منهجين أساسيين:

❖ المنهج الأول: يعتمد على **الاختبارات التجريبية**، وتحديدًا الاختبارات الإلتلافية كاختبارات الشد والضغط

والانحناء للتحقق من متانة الأجزاء المطبوعة باستخدام مواد طباعة مختلفة، منها **PLA, ABS, PETG**، ووضعيات زاوية مختلفة، وبارامترات برمجية وتنفيذية مختلفة.

توصلت هذه الدراسات إلى العديد من النتائج التي كان أبرزها ما يلي:

- يتركز الإجهاد بين طبقات الجسم المطبوع.
- يلعب اتجاه البناء في عملية الطباعة دوراً هاماً في تحديد الخواص الميكانيكية للعينات المطبوعة.
- يعتبر نمط وكثافة الملء **infill density** من العوامل الرئيسة المؤثرة في متانة الأجزاء المطبوعة.
- يؤثر نمط الملء **infill pattern** بشكل ملحوظ في طريقة ترابط الألياف في الأجزاء المطبوعة مما يؤثر في خصائصها الميكانيكية.
- يمكن أن يساهم توضع الألياف في الاتجاه المناسب محورياً في تعزيز متانة العينات المطبوعة مقارنة مع العينات الإيزوتروبية حيث أن حزمة الألياف الطولية في العينات المطبوعة تظهر متانة أعلى منها في مثيلاتها من العينات الإيزوتروبية عند شروط وبارامترات طباعة معينة.

❖ المنهج الثاني: يعتمد على النمذجة الحاسوبية بطريقة التحليل بالعناصر المنتهية **FEA** لتحليل البنية

والخصائص الميكانيكية للأجزاء المطبوعة سواء للنموذج العام **Global Model** أو للنموذج الفرعي

Sub-model. وأيضاً توصلت إلى نتائج مشابهة للاختبارات التجريبية حيث وجد أن الإجهاد يتركز

بين الطبقات، وأن لاتجاه الألياف دوراً بارزاً في تحديد الخواص الميكانيكية للأجزاء المطبوعة.

ومنها ما اعتمد المنهجين معاً ولجأ للمقارنة بين نتائجهما

كما أظهرت الدراسات أن لتكاليف عملية الطباعة تأثير أكبر على تكلفة الإنتاج من تكلفة مواد الطباعة

المستخدمة.

يبين (الجدول 3-1) ملخصاً لأهم ما ورد في الدراسات المرجعية.

جدول 1-3 ملخص لأهم ما ورد في الدراسات المرجعية

المرجع	الباحث	التاريخ	العنوان	الملخص	أهم النتائج	ملاحظات
(2)	جافاد زارباخش، آرمن إيرفاني، وزينب أمين أخلاجي	2014	التحليل بطريقة العناصر المنتهية للنموذج الفرعي للهياكل المصنّعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد	قام الباحثون بدراسة لتحليل الخواص الميكانيكية للجزء المطبوع ثلاثي الأبعاد باستخدام النمذجة الفرعية المتداخلة وطريقة العناصر المنتهية، في حين أن تفاصيل الطباعة ثلاثية الأبعاد مضمنة في النموذج الفرعي.	تم الحصول على القيمة العظمى للإجهاد المبدئي وقدرها 4.3 MPa في منطقة النموذج الفرعي	• قدمت الدراسة طريقة لدراسة الأجزاء المطبوعة بطريقة FEA
(12)	بايخ، مانوغاران، وماري	2015	دراسة تأثير تصميم بنية الملء الداخلية على زمن وكلفة الإنتاج لأجزاء من مادة ABS مصنّعة بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد	قام الباحثون بدراسة تأثير تصميم التعبئة الداخلية infill على زمن وتكلفة الإنتاج للأجزاء المطبوعة ثلاثية الأبعاد من مادة ABS وكذلك على الخصائص الميكانيكية المختلفة، باستخدام العينات المعيارية التالية للمواد البلاستيكية	تكلفة عملية الطباعة ذات تأثير أكبر على تكلفة الإنتاج من تكلفة مواد الطباعة	أغفلت الدراسة تحديد كثافة الملء بدقة.
				عينة الشد ASTM D638	تحقق الكثافة المنخفضة توفير مع أداء متانة مشابه للعالية	
				عينة الضغط ASTM D695	يحقق Solid متانة أعلى من double وكلفة مشابهة	درست نمط واحد للملء
				عينة الانحناء ASTM D790	لمتانة الضغط علاقة خطية بين المواد والمتانة والكلفة	

تم الاستفادة من الدراسة في تحديد اتجاه طباعة العينات.	يتركز الإجهاد بين الطبقات. تحقق الطباعة بالوضع الأفقي أعلى متانة.	أجريت دراسة في جامعة تكساس لتحليل الخصائص الميكانيكية لعينات مطبوعة من مادة ABS بالاعتماد على اتجاه الطباعة	تحليل خصائص الشد، الضغط، والانحناء لأجزاء بلاستيكية من مادة ABS P430 مصنعة بالطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية البناء بالترسيب المنصهر تبعاً لاتجاه الطباعة"		Ingram School of Engineering, Texas State University	(13)
•أغفلت الدراسة تحديد كثافة الملء بدقة	يتركز الإجهاد بين الطبقات	أجريت دراسة في معهد Polytechnic Rensselaer Institute للمقارنة بين الخصائص الميكانيكية لصفحة ايزوتروبية وعينة منتجة بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد وذلك بالتحليل بطريقة العناصر المنتهية وباعتماد العينة المعيارية ASTM D 638	مقارنة بين عينات بوليميرية مطبوعة بتقنية FDM وعينات ايزوتروبية بطريقة العناصر المنتهية	2014	Rensselaer Polytechnic Institute	(14)
تم الاستفادة منها في اتجاه الطباعة	أظهرت العينات المطبوعة بالاتجاه الأفقي متانة أعلى من باقي العينات العينات المطبوعة شاقولياً كانت الأضعف	أجريت دراسة في Rapid Prototyping Journal لتحسين الخصائص الميكانيكية وتكاليف الإنتاج في عمليات الطباعة ثلاثية الأبعاد لمادة ABS وتم اختبار العينات بأوضاع زاوية مختلفة وباعتماد العينة المعيارية ISO 527 1997	التحقق التجريبي لعملية الطباعة لتحسين الخصائص الميكانيكية و التكلفة الانتاجية	2014	Rapid Prototyping Journal	



الفصل الرابع: الإجراء العملي

Practical Procedure



1.4. تمهيد (PREFACE):

تهتم الدراسة العملية بدراسة تأثير نسبة الملء الداخلية (infill) في متانة الأجزاء المصنوعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد تحديداً بتقنية الطباعة بالترسيب المنصهر FDM، والوصول إلى النسبة الأمثل التي تحقق وفراً في كمية المواد المستهلكة وبالتالي وفراً في الوزن وزمن طباعة الجزء في حدود المتانة المناسبة للتطبيقات المختلفة.

تم تقسيم الإجراء العملي إلى محورين، وهما:

❖ الاختبارات التجريبية

❖ النمذجة الحاسوبية

والتي سيتم شرحها لاحقاً

2.4. المواد المستخدمة (USED MATERIALS):

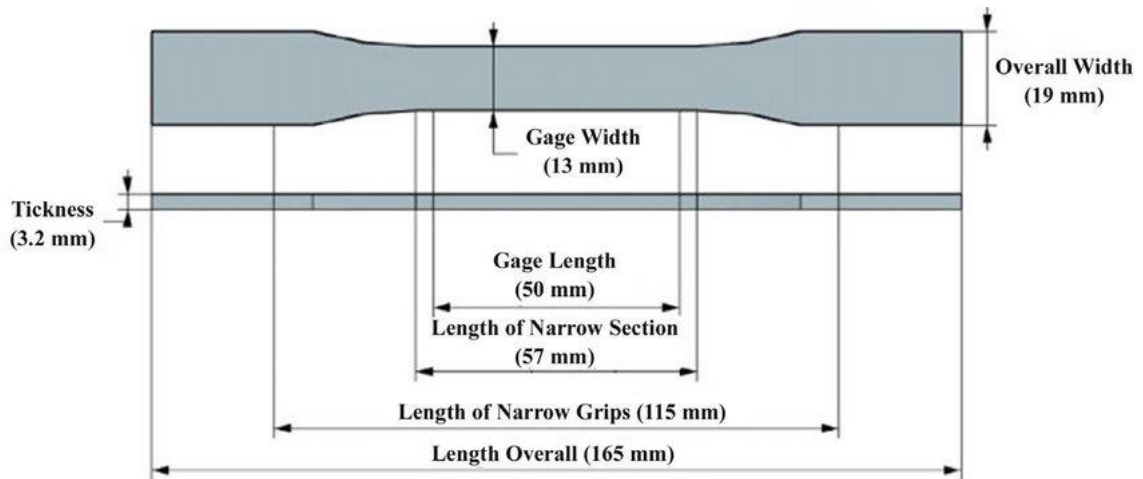
تم استخدام مادة بولي لكتيك أسيد (PLA) poly(lactic acid) وهي المادة الأكثر استخداماً وانتشاراً في مجال الطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية FDM، وذلك لما تتمتع به من خواص تجعل منها مادة صديقة للبيئة بالإضافة إلى أنها مادة سهلة الطباعة.



الشكل 4-1 مادة PLA المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية FDM

العينات (Specimens):

تم اعتماد العينة المعيارية للمواد البلاستيكية لاختبار الشد **ASTM D638 type 1** والمعتمدة من قبل الجمعية الأمريكية للاختبار والمواد [5] (ASTM) American Society for Testing and Materials، (الشكل 4-2)، وذلك لشموليتها لمجموعة واسعة من المواد وأسوة بعدد من الدراسات المرجعية.



الشكل 4-2 عينة اختبار الشد **ASTM D638 type 1**.

4-3- التجهيزات المستعملة (THE EQUIPMENT USED):

تم استخدام عدد من التجهيزات لتصنيع واختبار العينات على النحو التالي:

4-3-1- جهاز اختبار الشد للمواد البلاستيكية:

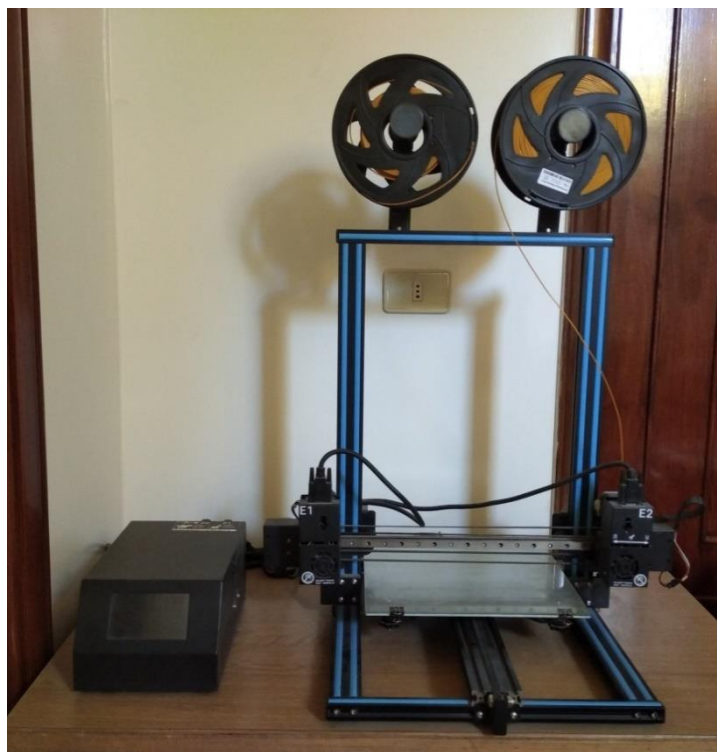
تم قياس المتانة والاستطالة لعينات الشد بواسطة جهاز اختبار الشد للمواد البلاستيكية في مخبر البلاستيك في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة دمشق، (الشكل 4-3).



الشكل 4-3 جهاز اختبار الشد للمواد البلاستيكية.

4-3-2- طباعة ثلاثية الأبعاد 3D PRINTER من النوع FDM:

تم تصنيع عينات الاختبار بواسطة طباعة ثلاثية الأبعاد من النوع FDM تتبع للباحثة، (الشكل 4-4).



الشكل 4-4 طباعة ثلاثية الأبعاد 3D printer من النوع FDM.

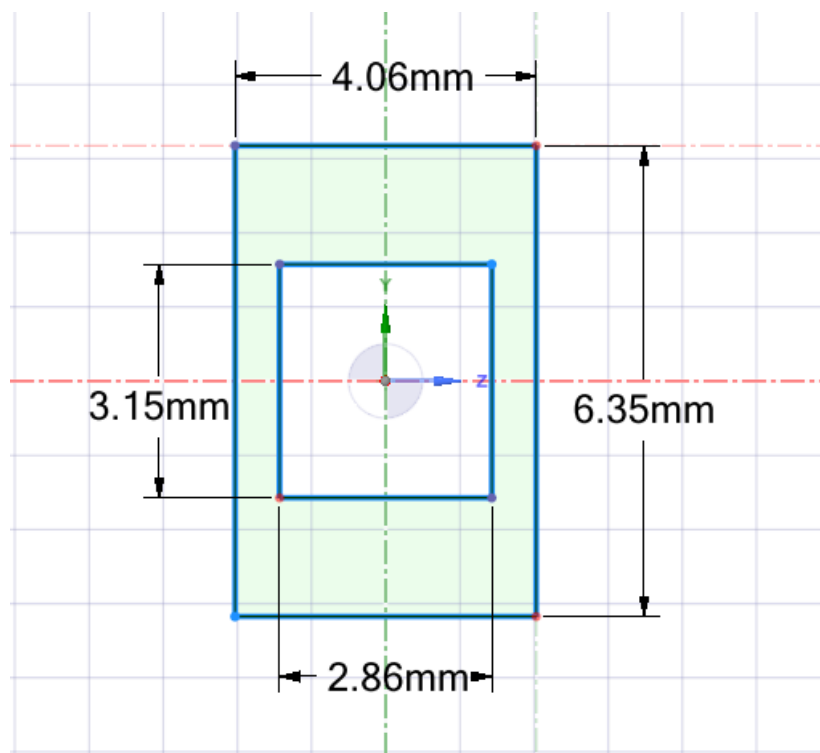
4.4. المراحل الأولى من الدراسة:

في البداية تم استخدام العينة المعيارية ASTM D638 type 4، (الشكل 4-5).

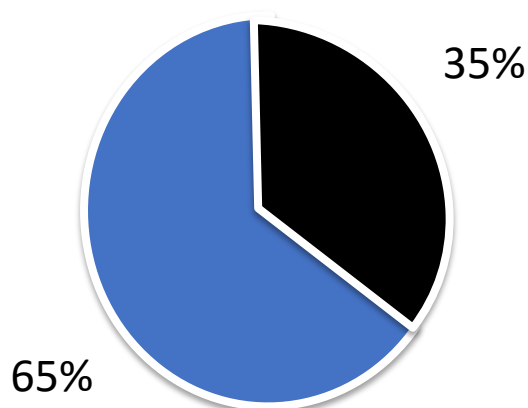


الشكل 4-5 العينة المعيارية ASTM D638 type 4

لكن لوحظ أن نسبة الملء إلى المساحة الكلية في المقطع العرضي صغيرة نسبياً والتي تشغل 35% فقط من مساحة المقطع العرضي للعينة، (الشكل 4-6) و(الشكل 4-7).

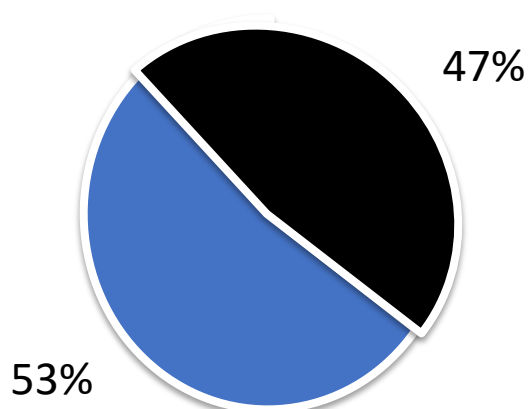


الشكل 4-6 المقطع العرضي للعينة المعيارية المفرغة ASTM D638 type 4



الشكل 4-7 نسبة الملء إلى مساحة المقطع العرضي في العينة المعيارية ASTM D638 type 4

فتم استبدالها بالعينة ASTM D638 type 1 حيث أن نسبة الملء فيها أكبر وتبلغ 47% من مساحة المقطع العرضي للعينة، (الشكل 4-8).



الشكل 4-8 نسبة الملء إلى مساحة المقطع العرضي في العينة المعيارية ASTM D638 type 1

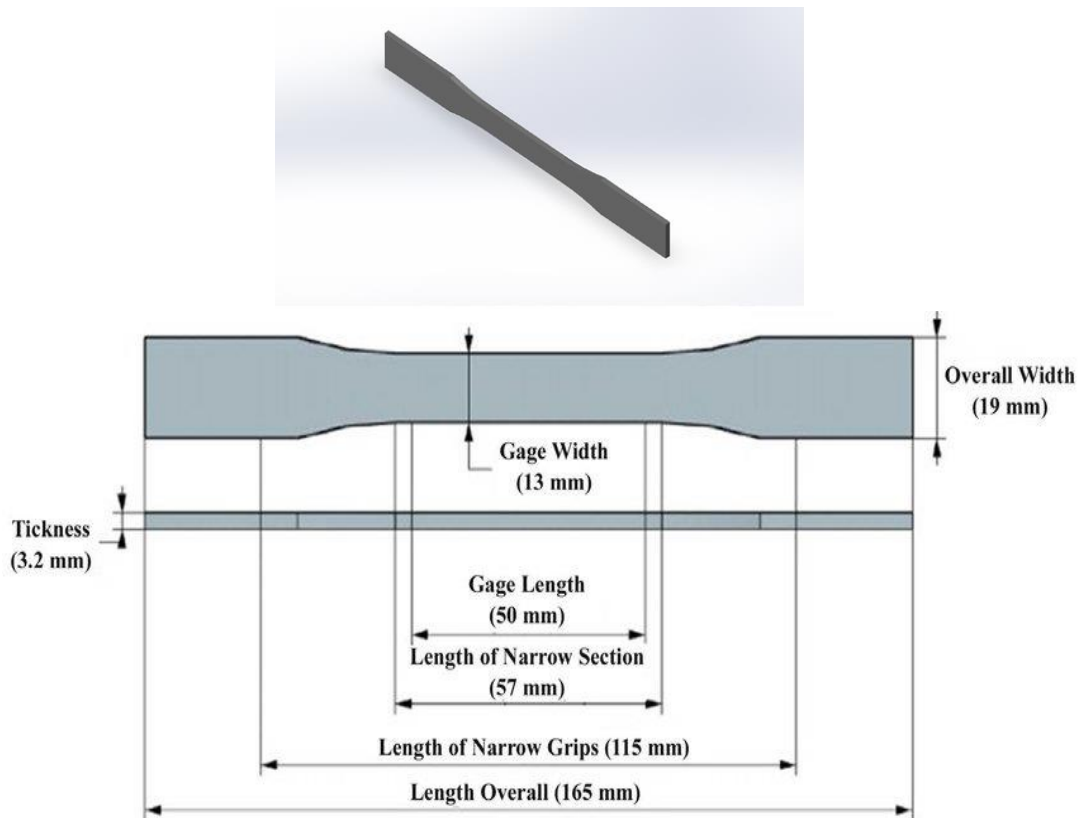
4-5- محورا الإجراء العملي:

4-5-1- الاختبارات التجريبية:

تم إجراء اختبار الشد الإئتلافي لعدد من عينات الشد المعيارية **ASTM D638 type 1** والمنتجة بالطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام تقنية FDM وذلك بعد تطبيق أنماط كثافات ملء (infill) مختلفة، بهدف المقارنة بين نتائج الاختبارات لكل منها، وفق الخطوات الآتية:

4-5-1-1- اختيار عينة الشد:

تم اختيار عينة الشد **ASTM D638 type 1** (الشكل 4-9) من بين العينات القياسية المعيارية آنفة الذكر



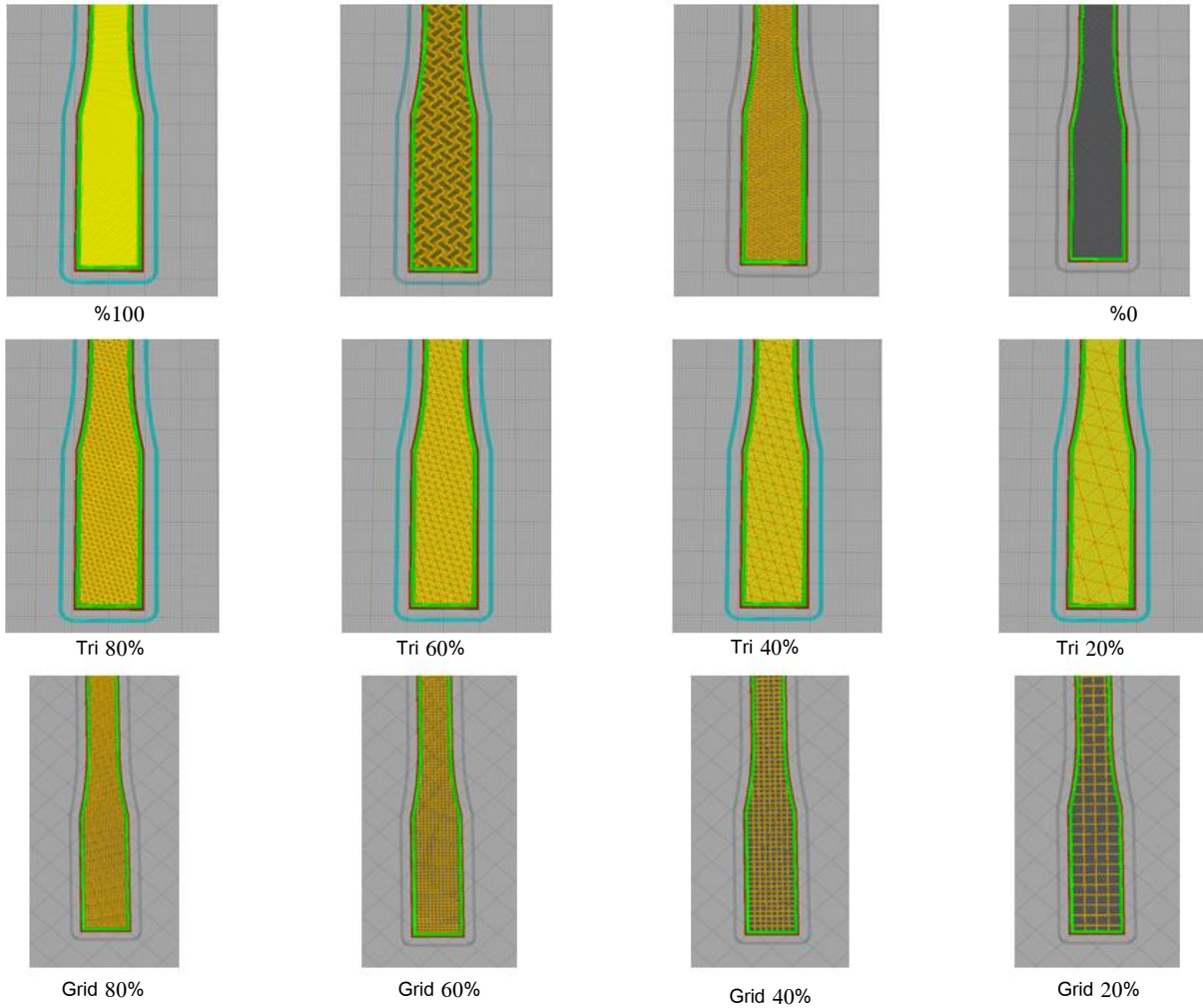
الشكل 4-9 عينة الشد المعيارية **ASTM D638 type 1**

4-5-1-2- تحضير عينات الشد ASTM D638 TYPE 1 للطباعة ثلاثية الأبعاد:

تم تحضير عينات الاختبار باستخدام برنامج Ultimaker Cura وهو أحد برامج التشريح حيث يمكن من خلاله التحكم بإعدادات ومتغيرات عملية الطباعة للعينة المراد طباعتها تمهيداً لتصديرها كملف G-code ليصار إلى طباعتها باستخدام الطابعة ثلاثية الأبعاد.

من المتغيرات (parameters) التي يمكن التحكم بها هي نمط وكثافة الملء (infill) حيث تم تطبيق أنماط مختلفة من الملء وبنسب مختلفة كما في (الشكل 4-10).

جرى تحضير عدة مجموعات من عينات الشد المعيارية من مادة **PLA**، بالشروط البرمجية والتنفيذية ذاتها وباختلاف المتغيرين المدروسين وهما نمط وكثافة الملء **infill pattern and infill density**، حيث تدرجت كثافة الملء من العينات المفرغة تماماً والتي توافقت النسبة (0%) لكثافة الملء إلى العينات المصمتة التي توافقت النسبة (100%) متضمنة العينات ذات الكثافات (20% - 40% - 60% - 80%) كما في (الشكل 4-10).



الشكل 4-10 أنماط ونسب كثافة infill المطبقة

4-5-1-3 طباعة عينات الاختبار:

تمت طباعة عدة مجموعات من عينات الاختبار آنفة الذكر بواسطة طابعة ثلاثية الأبعاد تستخدم تقنية

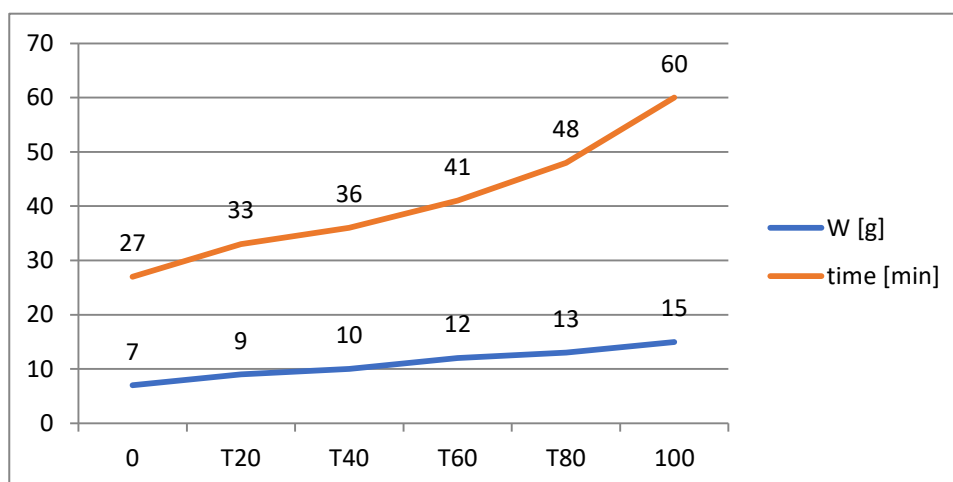
FDM تتبع للباحثة.

يظهر (الشكل 4-11) بعض العينات المطبوعة قبل الاختبار.



الشكل 4-11 بعض العينات المطبوعة قبل الاختبار.

تتراوح زمن طباعة كل من العينات بين (27 دقيقة) للعينات المفرغة و(60 دقيقة) للعينات المصمتة أي بنسبة تقل عن 50%. كما تتراوح وزن كل من العينات بين (7g) للعينات المفرغة و(15g) للعينات المصمتة أيضاً بنسبة تقل عن 50%، كما هو موضح في (الشكل 4-12). رغم ذلك فإن العينات المفرغة تماماً لا تحقق الأداء الوظيفي المطلوب في معظم التطبيقات، لذلك تمت دراسة عينات أخرى بنسب كثافة مختلفة.



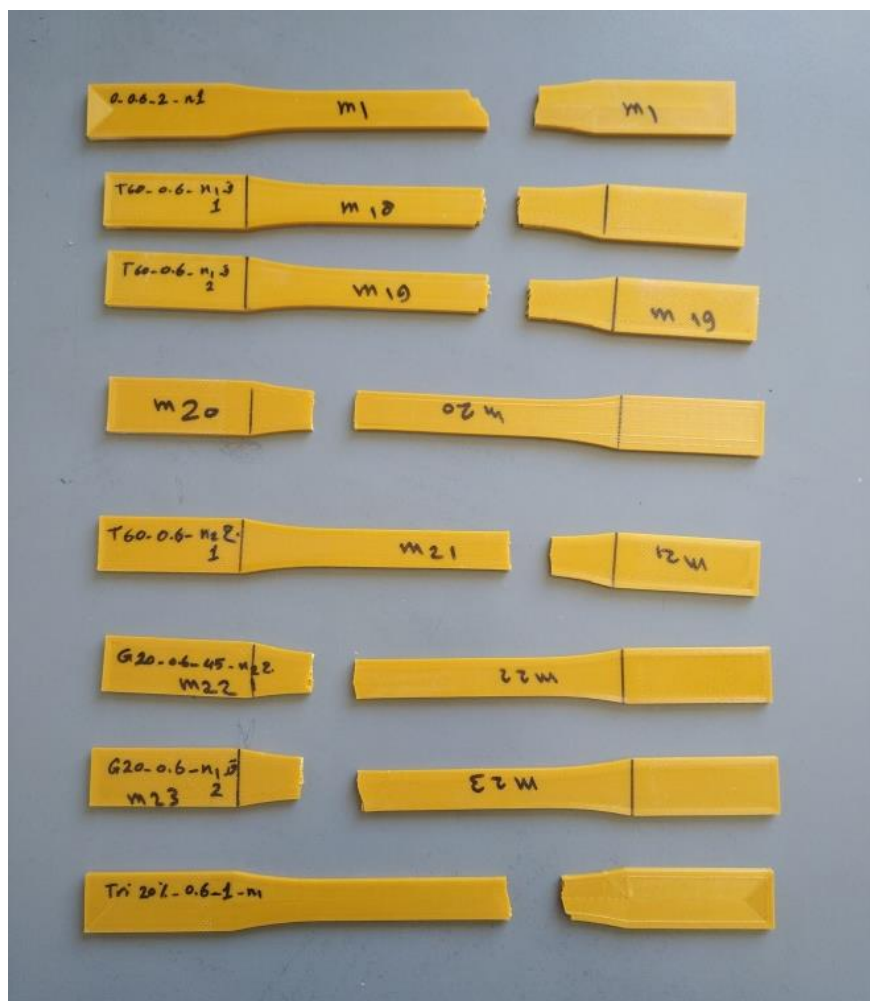
الشكل 4-12 بعض العينات المطبوعة قبل الاختبار.

4-1-5-4- اختبار العينات:

تم اختبار العينات بواسطة جهاز اختبار الشد للمواد البلاستيكية، (الشكل 4-3).

حيث تم إجراء الاختبار بسرعة 25 mm/min

يظهر (الشكل 4-13) بعض العينات بعد الاختبار.

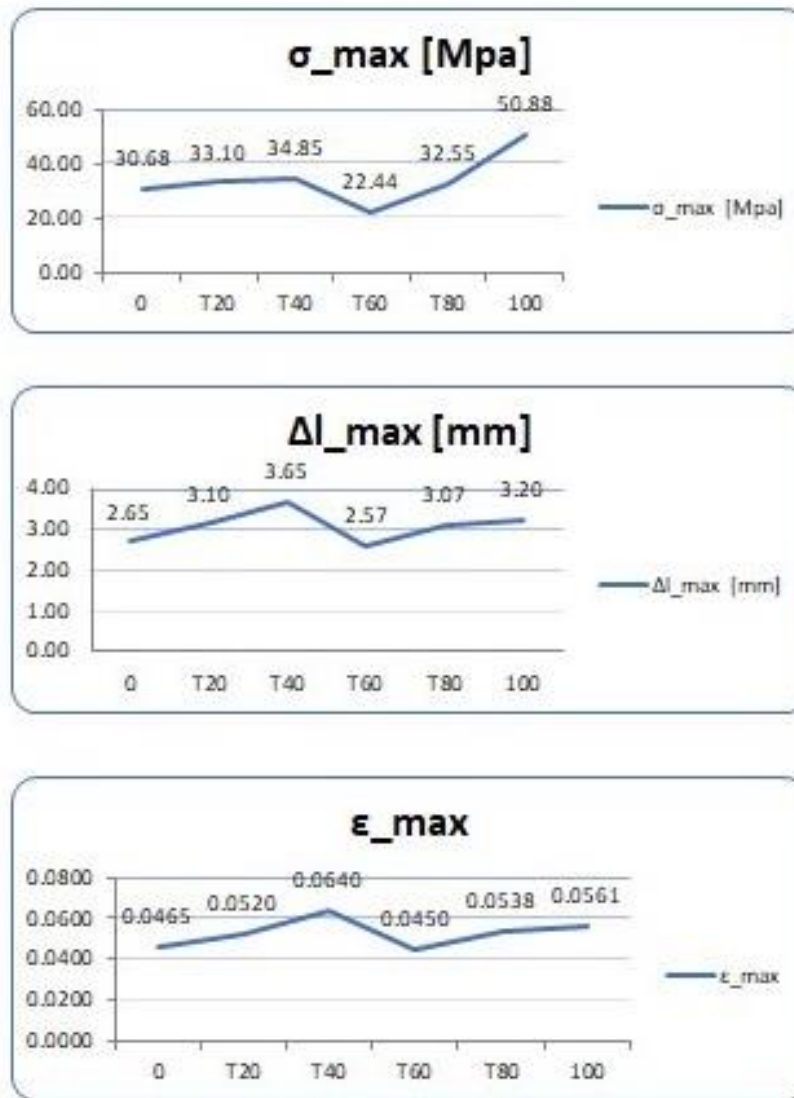


الشكل 4-13 بعض العينات بعد الاختبار.

4-5-1-5- نتائج الاختبارات التجريبية:

أظهرت الاختبارات التجريبية النتائج التالية:

- أظهرت العينات المصمتة المطبوعة أعلى متانة بين العينات التي تم اختبارها، وكانت قيمة الإجهاد الأعظمي عند التحطم (51MPa)، (الشكل 4-14) تليها العينات المطبوعة بكثافة ملء 40%
- أبدت العينات المطبوعة بكثافة ملء 40% تغيراً في الطول واستطالة أعلى من باقي العينات المختبرة، (الشكل 4-14).



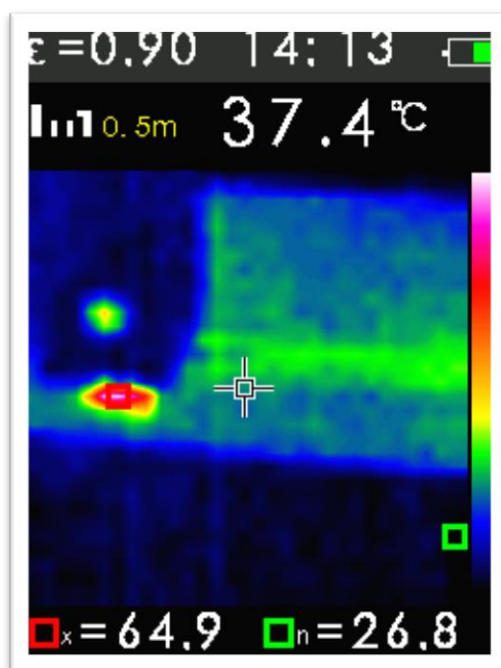
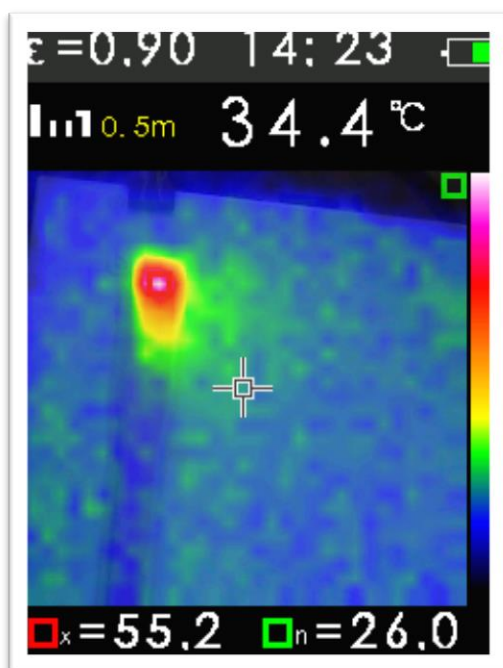
الشكل 4-14 نتائج الاختبارات

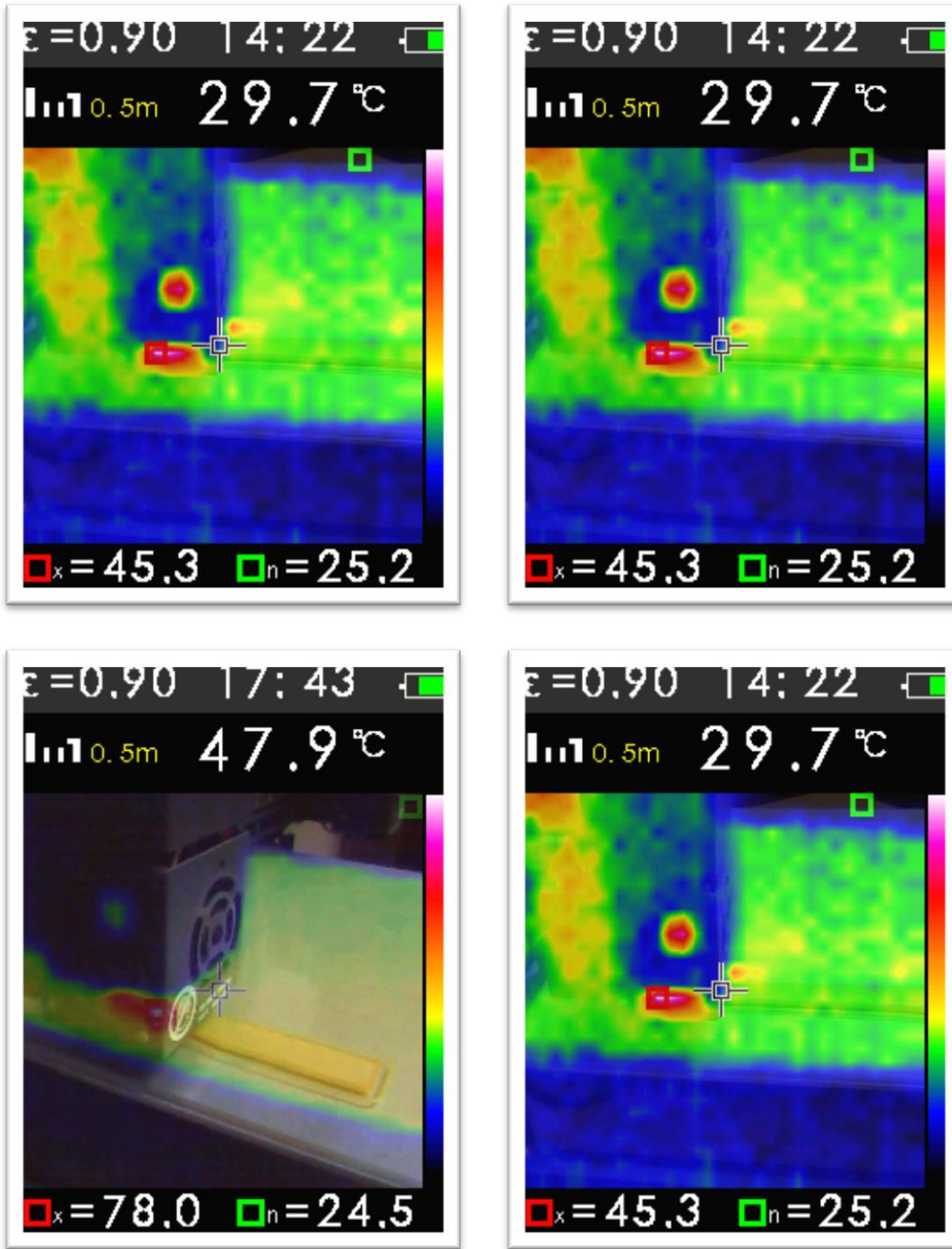
- بينما أظهرت العينات المطبوعة بكثافة 60% انخفاضاً ملحوظاً في المتانة مما أدى إلى انهيار سريع في العينة، فتم إعادة طباعة بعض العينات واستخدام التصوير بالأشعة تحت الحمراء بواسطة كاميرا من النوع CEM طراز DT-9868 للكشف عن أي بارامترات حرارية مؤثرة، (الشكل 4-15).



الشكل 4-15 كاميرا التصوير الحراري

- أظهر التصوير بالأشعة تحت الحمراء التوزيع الحراري في العينات، إلا أنه لم يظهر مؤشرات كافية لتفسير هذا الانهيار، ويمكن أن يفسر ذلك بالتباين الحراري على مساحة صغيرة تفوق حساسية الكاميرا المستخدمة، (الشكل 4-16).



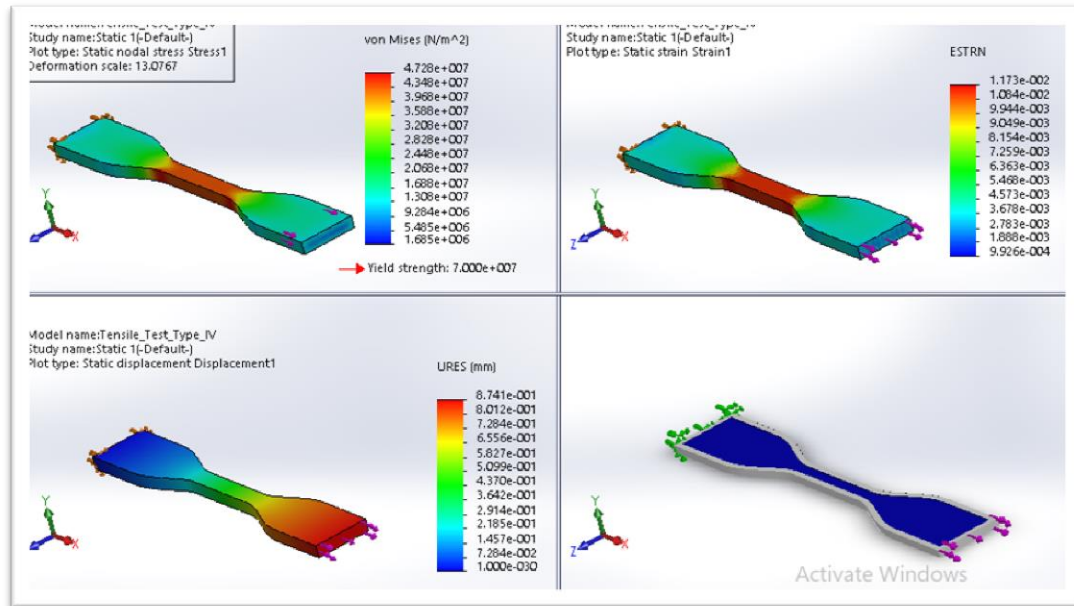
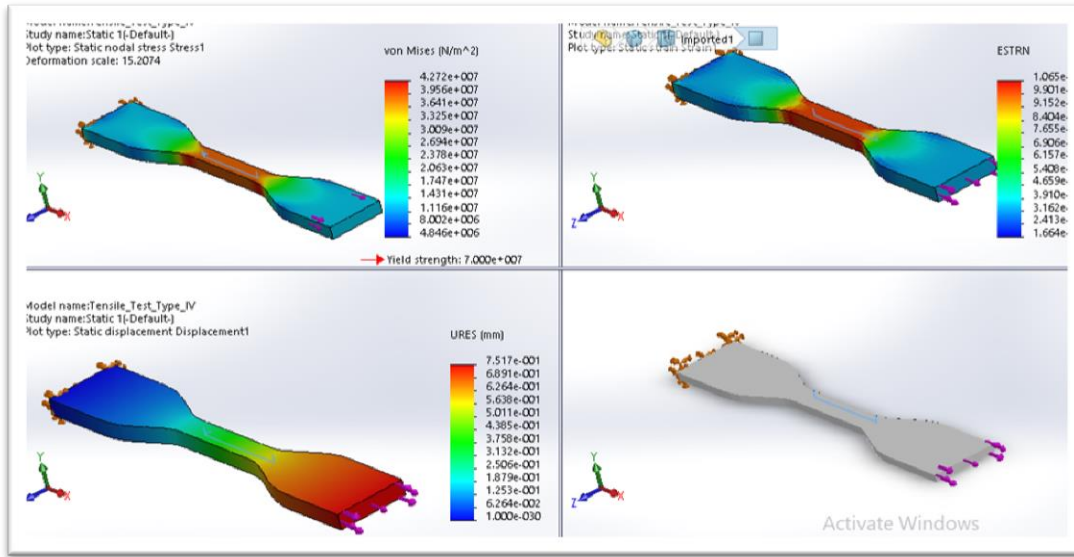


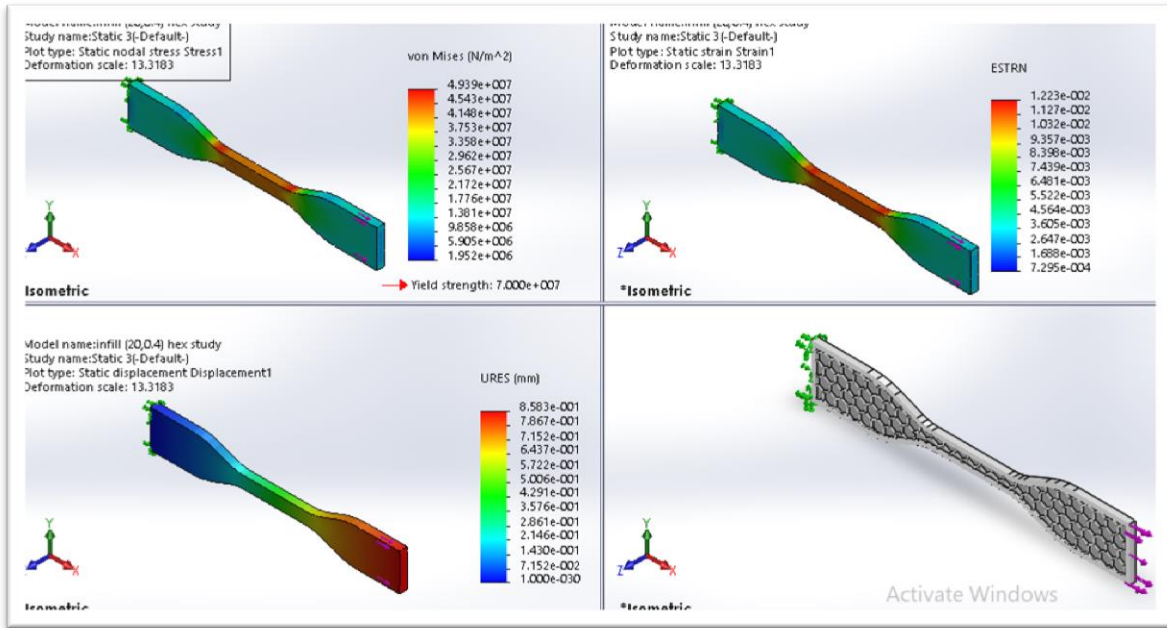
الشكل 4-16 التصوير بالأشعة تحت الحمراء.

2.5.4. النمذجة الحاسوبية بطريقة العناصر المنتهية FEA:

تم في النمذجة الحاسوبية اختبار العينات على مرحلتين:

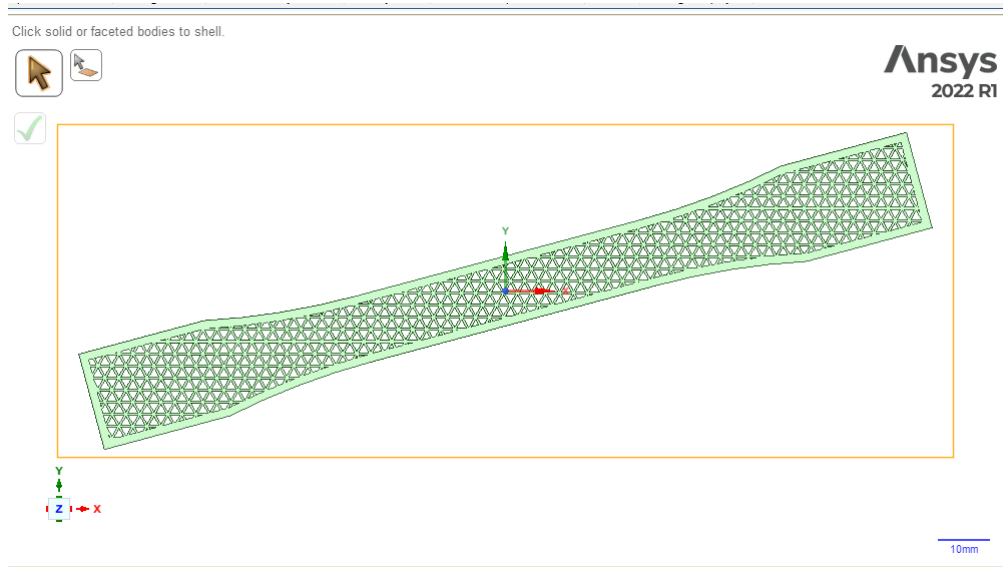
➤ المرحلة الأولى: كانت باستخدام برنامج SOLIDWORKS للحصول على نتائج أولية للعينات المطبوعة بكثافات ملء مختلفة، (الشكل 4-17).



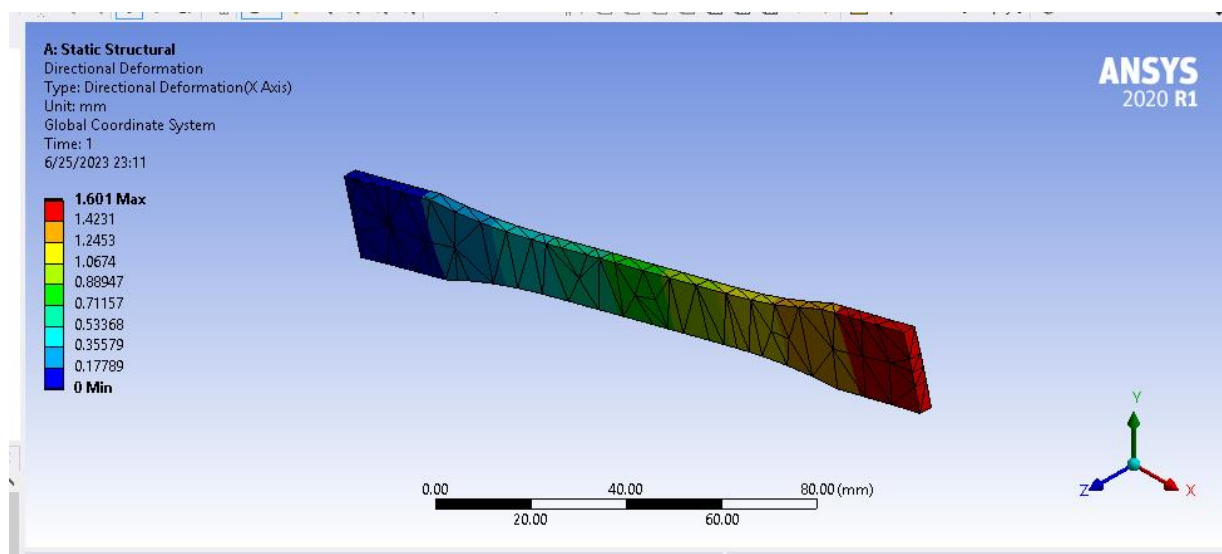
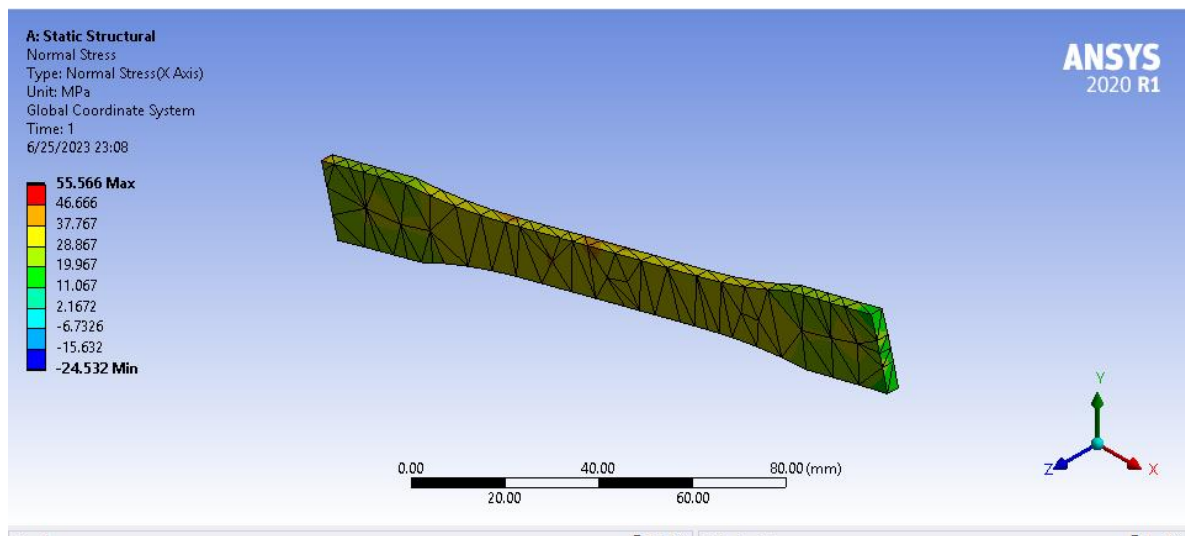


الشكل 4-17 اختبارات النمذجة الأولية

➤ المرحلة الثانية: كانت باستخدام برنامج ANSYS وذلك بعد تطبيق أنماط وكثافات الملء المناسبة حاسوبياً، (الشكل 4-18)، حيث تم الحصول من خلالها على قيم الإجهادات والانفعالات لعدد من العينات، (الشكل 4-19).



الشكل 4-18 تطبيق أنماط وكثافات الملء حاسوبياً



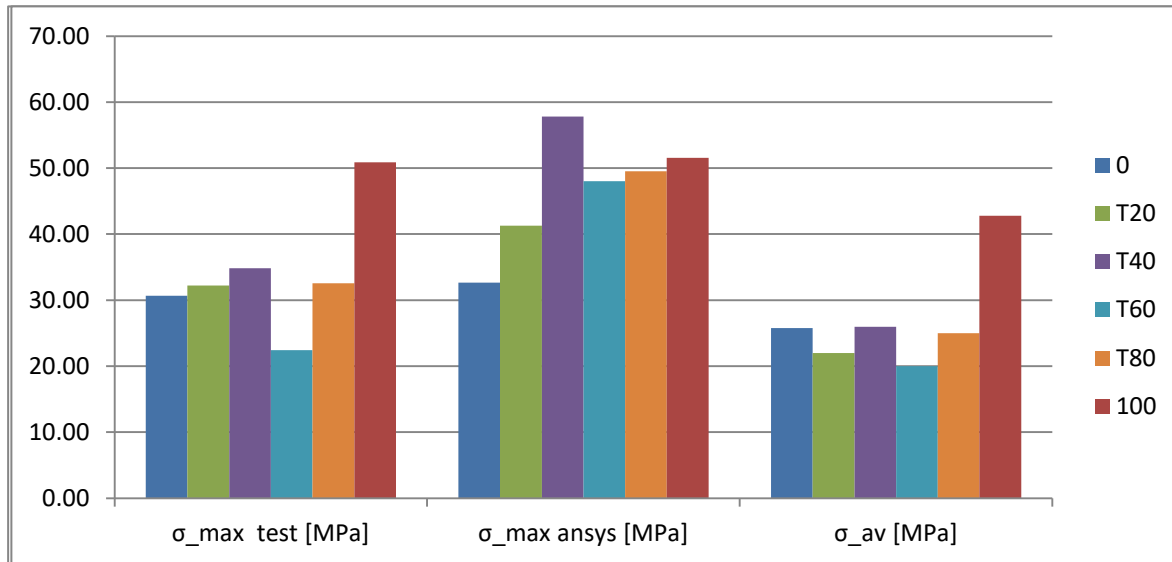
الشكل 4-19 نتائج النمذجة الحاسوبية

4-6- نتائج الدراسة (RESULTS):

بنتيجة الدراسة وبعد إجراء الاختبارات التجريبية والنمذجة الحاسوبية بطريقة العناصر المنتهية FEA والمقارنة

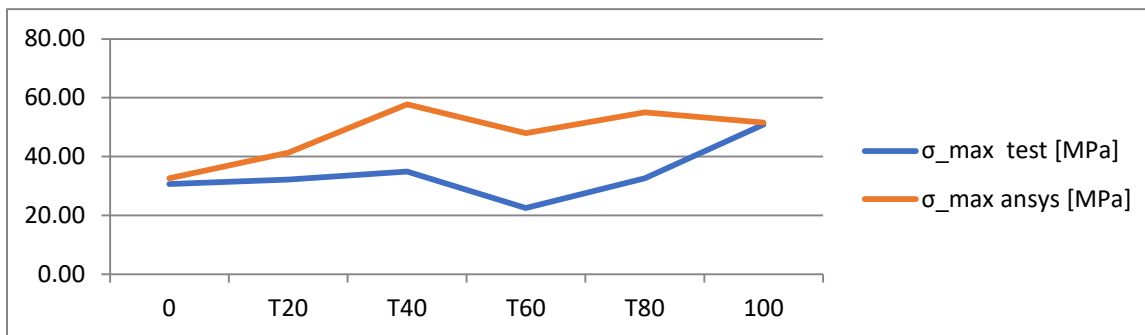
بين نتائج كل من الطريقتين، تم الحصول على النتائج التالية:

- من خلال الاختبارات التجريبية أظهرت العينات المصمتة أعلى متانة تليها العينات المطبوعة بكثافة (T40%) التي أبدت متانة أعلى بالمقارنة مع باقي العينات، حيث كانت قيم الإجهادات الحاصلة في العينات باختلاف كثافة الملء كما في (الشكل 4-20).
- بينما أظهرت نتائج النمذجة الحاسوبية أن العينات المطبوعة بكثافة (T40%) أبدت أعلى متانة تليها العينات المصمتة (الشكل 4-20).

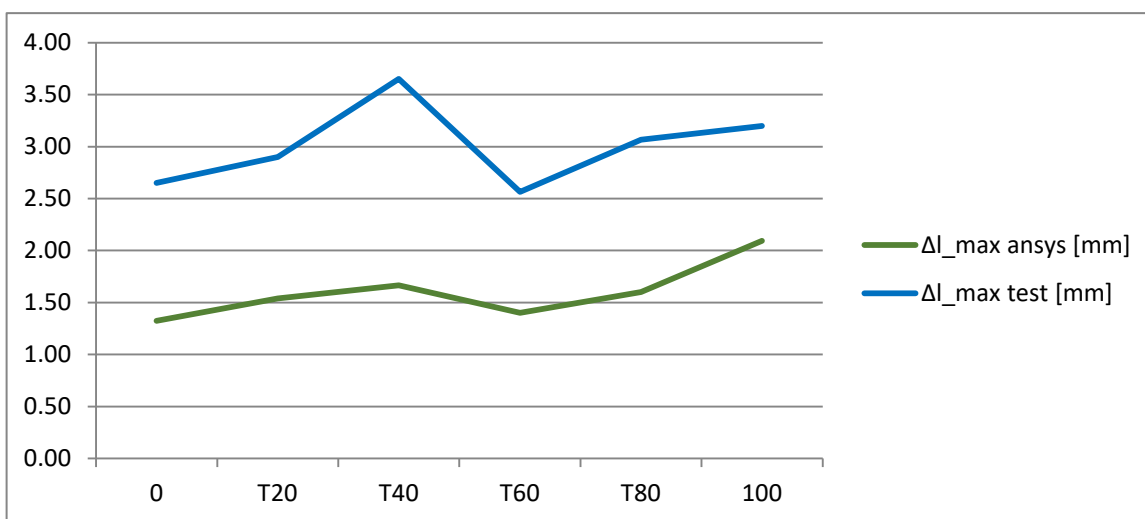


الشكل 4-20 قيم الإجهادات الحاصلة في العينات باختلاف كثافة الملء

- تعطي النمذجة الحاسوبية نتائج مختلفة إلى حد ما في العينات ذات كثافات الملء infill density المختلفة المغايرة للعينات المصمتة تماماً (100%) أو المفرغة تماماً (0%)، مقارنة بنتائج الاختبارات التجريبية، كما هو موضح في (الشكل 4-21) و(الشكل 4-22).



الشكل 4-21 مقارنة قيم الإجهادات الأعظمية الحاصلة في العينات بين الاختبارات التجريبية والنمذجة الحاسوبية



الشكل 4-22 مقارنة قيم الاستطالات الأعظمية الحاصلة في العينات بين الاختبارات التجريبية والنمذجة الحاسوبية



الفصل الخامس: التوصيات والمقترحات

Recommendations and suggestions



النتائج والتوصيات:

- يفسر الاختلاف بين الاختبارات التجريبية والنمذجة الحاسوبية بأن الاتجاه الطولي للألياف ساهم في زيادة المتانة وهذا يتوافق مع الدراسة المرجعية.
- تمثل كثافة الملء infill density (40 %) النسبة الأفضل التي تحقق المتانة وزمن التنفيذ على الآلة (زمن الطباعة).
- تعطي النمذجة الحاسوبية نتائج يمكن اعتمادها مع اعتبار عامل أمان كبير لكثافات الملء المختلفة المغايرة للعينات المصمتة تماماً (100%) أو المفرغة تماماً (0%).
- قدمت الدراسة خوارزمية يمكن من خلالها تحقيق المتانة المطلوبة بالحد الأدنى من زمن الإنتاج مما يساهم في تحقيق وفر كبير في تكاليف الإنتاج، كما قدمت منهجية علمية لدراسات أخرى في هذا المجال.

المقترحات:

- دراسة تغير بارامترات برمجية وتنفيذية أخرى ومدى تأثيرها على متانة الأجزاء المطبوعة وتكاليف الإنتاج.
- دراسة علاقة سرعة المروحة وأسلوب التبريد بالترابط بين الطبقات وتأثيره على متانة الأجزاء المطبوعة.
- دراسة علاقة زمن طباعة الطبقة بالتوزيع الحراري بين الطبقات وتأثيره على متانة الأجزاء المطبوعة.
- توسيع أفق البحث بدراسة أنواع أخرى من الخامات.



الفصل السادس: المراجع العلميّة

REFERENCES



المراجع

1. A Brief History of 3D Printing .Joan Horvath .*Mastering 3D printing*.2014 .
2. *Sub-modeling Finite Element Analysis of 3D Printed Structures* .**Armin Iravani, Zeinab Amin-Akhlaghi Javad Zarbakhsh**.2015 .
3. **Stelian Coros** .*Additive Manufacturing* .
4. *Introduction to 3D Printer* .**Muhammad Shamaas** .
5. *The Impact and Application of 3D Printing Technology* .**Cephas Mawere** .
.2014
6. A Brief History of 3D Printing .
7. 3D printing .*wikipedia* [متصل] .
https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing#cite_ref-13.
8. **Raymond F. Jones** .Tools of the Trade .*Astounding Science Fiction magazine* .November, 1950.
9. **Johannes F Gottwald** .*US3596285A*.1971
10. Basics of Fused Deposition Modelling.2020 .

11. **Dozuki System** .

https://dozuki.umd.edu/Wiki/Introduction_to_Fused_Deposition_Modeling_%28FDM%29#main .2022 .

12. *Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts* .**Hazel Marie, Guha P. Manogharan Liseli Baich** ,2015 .

International Journal of Rapid Manufacturing.

13. *ANALYZING THE TENSILE, COMPRESSIVE, AND FLEXURAL PROPERTIES OF 3D PRINTED ABS P430 PLASTIC BASED ON PRINTING ORIENTATION USING FUSED DEPOSITION MODELING* .

D. Slaughter, D. Whaley, J. Tate, and B. Asiabanpour R. Hernandez.2016 .

14. *A Comparative Finite Element Stress Analysis of Isotropic and Fusion Deposited 3D Printed Polymer.*2014 .

15. [| All3DP](#)

16. [\(youtube.com\)](#)

17. **Dozuki System (and one other contributor** .(Introduction to Fused Deposition Modeling (FDM) – University of Maryland (umd.edu) .
University of Maryland .2022.

Abstract

In this research, the mechanical properties of 3D printed standard specimens – using FDM method– was studied, where the effect of infill pattern and infill density on the strength was studied by applying various of infill pattern and infill density and testing the specimens experimentally, as well as optimization these specimens using Finite Element Analysis (FEA), then comparing results, to show how the FEA results can be used instead of experimental tests.

3D printing becomes one of the most important manufacturing methods which used in various fields, also the strength of 3d printed parts is effected by many factors. Some of these factors is **infill pattern and infill density** that effect on production cost and time.

The purpose of this research is to approach the minimal limit of the time and used material, through the optimized selection of infill pattern and infill density that ensure sufficient strength of 3D printed parts.

Key words:

3D printing, Fused Deposition Modeling, FDM, Mechanical Properties, Infill, Infill Pattern, Infill Density, 3D Filament, Polylactic Acid, PLA .

Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical & Electrical Engineering

Department of Mechanical Design

Master of Production Automation Engineering



Improving the strength of 3D printed part

Case study (Infill type)

Thesis submitted for the degree of (Master of Production Automation Engineering)

Prepared by

Eng.Yamameh Qassideh

Supervision by

Prof.Dr.Eng. Mahmoud Bani Al-Marjeh

2024