SR23001759

الجمهورية العربية السورية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة التصميم الميكانيكي

أتمتة تصميم منتجات الطباعة ثلاثية الأبعاد وتصنيعها باستخدام طريقة العناصر المنتهية (دراسة حالة: الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية)

رسالة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه اختصاص هندسة أتمتة الإنتاج

اعداد: م. رشـــا محمد ناصر الكيـــالـــي

اشراف:

المشرف المشارك

د. م. محمد بسام أبو حرب

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق

المشرف العلمي

أ. م. د. عبد الوهاب الوتار

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق

العام الدراسي 2025/2026

SR23001759

قرار لجنة الحكم

توقيعات لجنة المناقشة:

بناء على قرار مجلس البحث العلمي رقم /55/ المتخذ بالجلسة /1/ المنعقدة بتاريخ 2025/9/22 القاضي بتشكيل لجنة الحكم على رسالة الدكتوراه التي أعدتها طالبة الدراسات العليا رشا محمد ناصر الكيالي بعنوان" أتمتة تصميم منتجات الطباعة ثلاثية الأبعاد وتصنيعها باستخدام طريقة العناصر المنتهية (دراسة حالة: الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية)" والمؤلفة من السادة الأساتذة:

الاسم	الصفة	التوقيع
أ.د.م محمد بني مرجة	عضواً	
أ.م.د مهلب الداود	عضواً	
أ.م.د حسن فارس هدله	عضواً	
أ.م.د محمد سيف الدين الحلاق	عضواً	
أ.م.د عبد الوهاب الوتار	عضواً ومشرفاً	

أجريت جميع التعديلات اللازمة لهذه الرسالة وتعد هذه النسخة معتمدة كنسخة نهائية لرسالة الدكتوراه للمهندسة رشا محمد ناصر الكيالي.

وبالتالي تعد المهندسة جاهزة لمنح درجة الدكتوراه.

SR23001759

تصريح خطي

أنا الموقّعة أدناه أصرّح بعلمي الكامل وقبولي:

1. أنّ كلّ ما ينتج عن البحث والأطروحة هو ملكيّة فكريّة وماليّة بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنّني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتي بنشر البحث أو الأطروحة أو جزء منها نصّاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكتبات أو مواقع إلكترونيّة وغيرها من وسائل النشر).

2. أنّه لا يوجد أي جزء من هذه الأطروحة اقتبس من عمل علمي آخر أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أيّة جامعة أو معهد تعليمي داخل الجمهوريّة العربيّة السوريّة أو خارجها.

الاسم والتوقيع

م. رشـــا محمد ناصر الكيـــالـي

SR23001759

شكر وتقدير

بدايةً أشكر الله عزّ وجلّ، كما أودّ أن أشكر كلّ من كان لهم الفضل في إنجاز هذا البحث، وأبدأ بجزيل الشكر والتقدير لأستاذي المشرف العلمي الدكتور عبد الوهاب الوتار لكل الدعم والتوجيه والإرشاد العلمي حتى أبصر هذا البحث النور، ولأستاذي المشرف المشارك الدكتور محمد بسام أبو حرب على دعمه العلمي والمعنوي.

كما أتقدم بجزيل الشكر لكلّ أعضاء الهيئة التدريسيّة في قسم هندسة التصميم الميكانيكي بجامعة دمشق على كلّ ما قاموا به من جهود، وأخصّ بالشكر رئيس قسم هندسة التصميم الميكانيكي الدكتور محمد سمير البرزاوي.

أشكر عائلتي على دعمهم الدائم لي وتشجعي على الاستمرار والتفوق.

كما أتقدم بالشكر والتقدير لأعضاء لجنة الحكم الأفاضل لملاحظاتهم وإرشاداتهم التي أغنت الأطروحة.

م. رشـــا الكيـــالـــي

فهرس المحتويات

قرار لجنة الحكم II

تصريح خطي III

شكر وتقدير IV

فهرس الجداول IX

فهرس الصور X

قائمة المصطلحات والاختصارات XIV

الملخص XV

Abstract XVI

الفصل الأول 1

الإطار العام للبحث 1

1-1 المقدمة: 2

1-2 مشكلة البحث: 3

1-2-1 الدعائم: 3

1-2-2 تباين خواص المادة: 3

1-3 تساؤلات البحث: 4

1-4 فرضيات البحث: 4

1-5 مسلمات البحث: 4

1-6 هدف البحث: 4

1-7 أهمية البحث: 5

1-8 مبررات البحث: 5

1-9 محدوديات البحث: 5

1-10 الدراسات السابقة: 6

1-11 منهجية البحث وأدواته: 11

1-12 بنية الأطروحة: 11

الفصل الثاني 13

الدراسة النظرية 13

التصنيع بالإضافة 14

2-1 ما هي تقنية التصنيع بالإضافة؟ 14

2-2 تسلسل عملية التصنيع بالإضافة: 17

2-3 فوائد تقنية التصنيع بالإضافة: 19

2-4 دمج البودرة المعدنية: 21

2-5 أساسيات دمج البودرة المعدنية: 23

2-5-1 تصنيع البودرة المعدنية: 23

2-5-2 الشكل المثالي للبودرة: 25

2-5-3 توزع حجم البودرة: 26

2-6 خصائص المواد المعدنية المستخدمة في التصنيع بالإضافة: 27

2-7 العيوب المحتملة في مواد التصنيع بالإضافة: 28

2-8 تسلسل عملية التصنيع بالإضافة المعدنية: 29

2-8-1 كثافة الطاقة: 31

2- 9 الاجهادات المتبقية: 32

2-9-1 إجراءات لتقليل من الاجهادات المتبقية: 33

2-10 الأمثلة: 35

2-11 تعريف معادلة الأمثلة الهيكلية ومتغيرات التصميم: 37

2-12 خطوات تطبيق خوارزمية الأمثلة الهيكلية: 40

2-12-1الخطوة الأولى: تعريف مجال التصميم (Ω) والشروط الحدية: 40

2-12-2 الخطوة الثانية: تقسيم مجال التصميم: 40

2-12-3 الخطوة الثالثة: ضبط الشروط الابتدائية: 40

2-12-4 الخطوة الرابعة: معالجة نتائج الأمثلة الهيكلية: 41

2-13 الأمثلة الخلوية: 43

2-14 استخدام طريقة العناصر المنتهية في نمذجة التصنيع بالإضافة: 45

2-15 المحاكاة الحرارية- الميكانيكية: 46

2-16 الانفعال الكامن: 49

الفصل الثالث 51

الدراسة العملية والنتائج 51

3- مراحل الدراسة 52

3-1 مرحلة الأمثلة الهندسية للمنتج: 52

3-1-1 الدراسة التجريبية: 67

3-2 اختيار الاتجاه الأمثل للطباعة: 74

3-2-1 الاجراء التجريبي: 92

3-3 دراسة البنية المجهرية للمادة. 98

3-4 النتائج والمناقشة: 102

3-4-1 نتائج مرحلة الأمثلة: 102

3-4-2 نتائج مرحلة اختيار الاتجاه الأمثل للبناء: 103

3-5 مقارنة نتائج هذه الدراسة مع الدراسات المرجعية: 104

3-6 الاستنتاجات: 105

3-7 التوصيات: 106

3-8 الخاتمة: 107

المراجع: 108

فهرس الجداول

جدول (3–1): مقارنة بين نتائج الأمثلة لحالات التحميل الثالثة وحالة الأمثلة الخلوية 64

جدول (3–2): بارامترات الطابعة المعدنية 67

جدول (3–3): نتائج اختبار العينات 73

جدول (3–4): التشوهات كل حالات الدراسة 88

جدول (3–5): الاجهادات كل حالات الدراسة 90

جدول (3–6): وزن الدعائم عند كل زاوية بناء 93

جدول (3–7): نتائج اختبار العينات عند زوايا الدراسة 97

فهرس الصور

الشكل (2-1): مقارنة بين تقنية التصنيع بالإضافة وتقنية التصنيع بالإزالة 14

الشكل (2-2): الخط الزمني لتطور تقنية AM 16

الشكل (2-3): أمثلة على دقة ملف STL 17

الشكل (2-4): تسلسل عملية التصنيع بالإضافة 18

الشكل (2-5): أمثلة عن المنتجات التي يمكن الحصول عليها باستخدام تقنية التصنيع بالإضافة 20

الشكل (2-6): طرق التصنيع بالإضافة المعدنية 22

الشكل (2-7): مخطط التأين الغازي 24

الشكل (2-8): بودرة مصنعة بطريقة التأيين التخلخلي 25

الشكل (2-9): العيوب الغير مرغوب بها في البودرة 26

الشكل (2-10): توزع حجم البودرة المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية 27

الشكل (2-11): العيوب المحتملة في مواد التصنيع بالإضافة 29

الشكل (2-12): تسلسل عملية التصنيع بالإضافة المعدنية 29

الشكل (2-13): تأثير البودرة على امتصاص طاقة الشعاع 30

الشكل (2-14): بارامترات الآلة القابلة للتعديل 31

الشكل (2-15): أمثلة على طرق المسح المختلفة لشعاع الطاقة 31

الشكل (2-16): تأثير كثافة الطاقة على خشونة السطح 32

الشكل (2-17): تأثير الاجهادات المتبقية على منتجات الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية 33

الشكل (2-18): بعض أشكال مصفوفات المسح 34

الشكل (2-19): نماذج مصنعة عن طريق دمج الأمثلة الهيكلية والخلوية مع تقنية التصنيع بالإضافة 36

الشكل (2-20): أنواع مسائل الأمثلة الثلاث a) الأمثلة الحجمية. b) الأمثلة الشكلية. c) الأمثلة الهيكلية 37

الشكل (2-21): المخطط التدفقي لطريقة حل الأمثلة الهيكلية باستخدام طريقة العناصر المنتهية 42

الشكل (2-22): مقارنة بين مسائل الأمثلة الهيكلية والخلوية 43

الشكل (2-23): مثال على تطبيق الأمثلة الخلوية 44

الشكل (2-24): أشكال الخلايا في برنامج ansys workbench 44

الشكل (2-25): شكل معادلة Goldak لتوزع الطاقة من مصدر الليزر 48

الشكل (3-1): عينة الدراسة 52

الشكل (3–2) شبكة العناصر المنتهية..... 53

الشكل (3–3): حالة التحميل الأولى..... 54

لشكل (3–4): حالة التحميل الثانية 54

الشكل (3–5): حالة التحميل الثالثة. 54

الشكل (3–7): التشوهات الناتجة عن حالة التحميل الأولى...... 55

الشكل (3–6): الاجهادات الناتجة عن حالة التحميل الأولى 55

الشكل (3–9): التشوهات الناتجة عن حالة التحميل الثانية..... 56

الشكل (3–8): الاجهادات الناتجة عن حالة التحميل الثانية...... 56

الشكل (3–11): التشوهات الناتجة عن حالة التحميل الثالثة. 57

الشكل (3–10): الاجهادات الناتجة عن حالة التحميل الثالثة...... 57

الشكل (3–13): الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثانية. 58

الشكل (3–12): الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الأولى. 58

الشكل (3–14): الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثالثة. 59

الشكل (3–15): الاجهادات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الأولى...... 59

الشكل (3–17): الاجهادات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثانية..... 60

الشكل (3–16): التشوهات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الأولى...... 60

الشكل (3–19): الاجهادات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثالثة...... 61

الشكل (3–18): التشوهات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثانية 61

الشكل (3–20): التشوهات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثالثة 62

الشكل (3–21): كثافة توزع الخلايا بالاعتماد على تحليل العناصر المنتهية. 63

الشكل (3–22): توزع الخلايا الناتجة من تحليل العناصر المنتهية...... 63

الشكل (3–23): الاجهادات الناتجة من حالة التحميل الأولى. 65

الشكل (3–24): التشوهات الناتجة من حالة التحميل الأولى...... 65

الشكل (3–25): الاجهادات الناتجة من حالة التحميل الثالثة. 66

الشكل (3–26): التشوهات الناتجة من حالة التحميل الثالثة...... 66

الشكل (3–27): العينة الناتجة عن حالة التحميل الأولى. 67

الشكل (3–28): العينة الناتجة عن حالة التحميل الثانية. 68

الشكل (3–29): العينة الناتجة عن حالة التحميل الثالثة. 68

الشكل (3-30): العينة الناتجة عن الأمثلة الخلوية. 68

الشكل (3-31): آلة الاختبار Forney 69

الشكل (3-32): طريقة اختبار العينات. 70

الشكل (3-33): منحني قوة – استطالة الناتج عن اختبار العينة المؤمثلة الناتجة عن حالة التحميل الأولى. 70

الشكل (3-34): منحني قوة – استطالة الناتج عن اختبار العينة المؤمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثانية. 71

الشكل (3-35): منحني قوة – استطالة الناتج عن اختبار العينة المؤمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثالثة. 71

الشكل (3-36): منحني قوة – استطالة الناتج عن اختبار العينة المؤمثلة الناتجة عن حالة الأمثلة الخلوية. 72

الشكل (3-37): ضبط وضعية القطعة في برنامج Spaceclaim. 74

الشكل (3-38): الاجهادات عند الزاوية 0° بدون معالجة حرارية. 76

الشكل (3-39): التشوهات عند الزاوية 0° بدون معالجة حرارية. 76

الشكل (3-41): التشوهات عند الزاوية 0° مع معالجة حرارية. 77

الشكل (3-40): الاجهادات عند الزاوية 0° مع معالجة حرارية. 77

الشكل (3-43): التشوهات عند الزاوية 0° مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم. 78

الشكل (3-42): الاجهادات عند الزاوية 0°مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم. 78

الشكل (3-44): الاجهادات عند الزاوية 30° بدون معالجة حرارية. 79

الشكل (3-45): التشوهات عند الزاوية30° بدون معالجة حرارية. 79

الشكل (3-47): التشوهات عند الزاوية30 °مع معالجة حرارية. 80

الشكل (3-46): الاجهادات عند الزاوية30 °مع معالجة حرارية. 80

الشكل (3-49): التشوهات عند الزاوية30 °مع معالجة حرارية ونزع دعائم. 81

الشكل (3-48): الاجهادات عند الزاوية30 °مع معالجة حرارية ونزع دعائم. 81

الشكل (3-51): التشوهات عند الزاوية45 °بدون معالجة حرارية. 82

الشكل (3-50): الاجهادات عند الزاوية45 °بدون معالجة حرارية. 82

الشكل (3-53): التشوهات عند الزاوية45 °مع معالجة حرارية. 83

الشكل (3-52): الاجهادات عند الزاوية45 °مع معالجة حرارية. 83

الشكل (3-54): الاجهادات عند الزاوية45 °مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم. 84

الشكل (3-55): التشوهات عند الزاوية45 °مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم. 84

الشكل (3-56): الاجهادات عند الزاوية90 °بدون معالجة حرارية. 85

الشكل (3-57): التشوهات عند الزاوية90 oبدون معالجة حرارية. 85

الشكل (3-58): الاجهادات عند الزاوية90 °مع معالجة حرارية. 86

الشكل (3-59): التشوهات عند الزاوية90 °مع معالجة حرارية. 86

الشكل (3-60): الاجهادات عند الزاوية90 °مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم. 87

الشكل (3-61): التشوهات عند الزاوية90 °مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم. 87

المخطط (3-1): علاقة التشوهات بزاوية البناء. 89

المخطط (3-2): علاقة الاجهادات بزاوية البناء. 91

الشكل (3-61):صورة للعينات المطبوعة بعد الانتهاء من تنفيذها بالزوايا الأربعة. 92

الشكل (3-62): منحني قوة-استطالة عند الزاوية 0°. 94

الشكل (3-63): منحني قوة-استطالة عند الزاوية 30°. 94

الشكل (3-64): منحني قوة-استطالة عند الزاوية 45°. 95

الشكل (3-65): منحني قوة-استطالة عند الزاوية 90°. 96

الشكل (3-66): حجم الحبيبات واتجاهاتها بالمستوي XY. 99

الشكل (3-67): توزع حجم الحبيبات في المستوي XY. 99

الشكل (3-68): حجم الحبيبات واتجاهاتها بالمستويXZ 100

الشكل (3-69): توزع حجم الحبيبات في المستويXZ 100

الشكل (3-70): حجم الحبيبات واتجاهاتها في المستويYZ. 101

الشكل (3-71): توزع حجم الحبيبات في المستوي YZ. 101

قائمة المصطلحات والاختصارات

المصطلح باللغة العربية	الاختصار	المصطلح باللغة الانكليزية
الأمثلة الهيكلية	TO	Topology optimization
الطباعة ثلاثية الأبعاد	3DP	3D Printing
التصنيع بالإضافة	AM	Additive manufacture
التصميم بمساعدة الحاسب	CAD	Computer aided design
طريقة العناصر المنتهية	FEM	Finite element method
التصميم للتصنيع بالإضافة	DFAM	Design for additive manufacture
الصهر الانتقائي بالليزر	SLM	Selective laser melting
التلبيد الانتقائي باستخدام الليزر	SLS	Selective laser sintering
الترسيب المباشر بشعاع الطاقة	DED	Direct energy deposition
دمج البودرة	PBF	Powder bed fusion
التصنيع بالشعاع الالكتروني	EBM	Electronic beam manufacturing
تحويل المادة الى صلبة متجانسة قسرياً	SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
تقسيم الشكل الى مثلثات منتظمة	STL	stander triangle language
صيغة ملفات التصنيع بالإضافة	AMF	Additive Manufacturing File Format
صيغة ملفات ثلاثية الأبعاد	3MF	3D Manufacturing Format
عامل الانفعال	SSF	Strain scaling factor
الانفعال الكامن	ε_{inh}	Inherent strain
دمج البودرة بالليزر	LPBF	Laser Powder Bed Fusion
ترسيب المعدن المباشر	DMD	Direct Metal Deposition

SR23001759

الملخص

في السنوات الأخيرة أصبحت تستخدم تقنيات التصنيع بالإضافة بشكل واسع في العديد من المجالات الصناعية وخاصة في الفضاء والمركبات والأجهزة الطبية وغيرها من التطبيقات الصناعية، وتعتبر الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية هي الخيار المناسب لتصنيع الأجزاء الصناعية لهذا النوع من الصناعات وذلك لقدرتها على تصنيع منتجات دقيقة وخفيفة الوزن، إلا أن الحصول على منتج صحيح من المرة الأولى للطباعة مع تجنب عمليات الانهيار المحتملة خلال عملية الطباعة يلزمه التخطيط الجيد لعملية تصميم المنتج وتصنيعه قبل تنفيذه.

يهدف هذا البحث الى تطبيق تقنيات الأمثلة للحصول على منتجات خفيفة قابلة للتصنيع بالطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد، مع دراسة عملية التصنيع من خلال محاكاتها باستخدام طريقة العناصر المنتهية لتحديد الاتجاه الأمثل القابل للتنفيذ دون انهيار خلال تصنيع المنتج، بالإضافة إلى تحقيق أقل حجم للدعائم مع المحافظة على متانة المنتج، ومن ثم التحقق من عدم وجود حبيبات غير منصهرة أو مسامات وذلك من خلال دراسة البنية المجهرية من أجل ضمان بنية متجانسة تضمن خواص ميكانيكية جيدة، من خلال محاكاة بارامترات التصنيع المستخدمة وحساب حجم الحبيبات وأبعادها في كافة الاتجاهات.

من خلال تطبيق هذه المنهجية تم تخفيف وزن عينة الدراسة بنسبة 27.5% وتخفيف وزن الدعائم بنسبة 30% مع التحقق من متانة المنتج المؤمثل عن طريق اجراء الاختبارات الميكانيكية وذلك بعد تصنيعه بالاتجاه الذي يحقق أقل حجم دعائم. وبالتالي تحقيق منتج قابل للتصنيع بأقل وزن وحجم للدعائم مع أفضل خواص ميكانيكية وذلك باستخدام طريقة العناصر المنتهية لعملية التخطيط والتصميم وتصنيع المنتج قبل تنفيذه.

الكلمات المفتاحية: التصنيع بالإضافة، طباعة معدنية ثلاثية الأبعاد، طريقة العناصر المنتهية، الأمثلة الهيكلية، خصائص ميكانيكية.

Abstract

In recent years, additive manufacturing techniques have become widely used in many industrial fields, especially in space, vehicles, medical devices and other industrial applications. 3D metal printing is the right choice for manufacturing industrial parts for these types of industries, that is because its ability to manufacture precise and lightweight products, but to get a product right from the first time and avoid potential breakdowns during the printing process, so the product design and manufacturing process should be well planned before it is implemented.

This research aims to apply optimization techniques to obtain lightweight products that can be manufactured by using 3D metal printing, and study the manufacturing process by simulating it by using finite element method to determine the optimal direction that can be implemented without breakdown during printing process, in addition to achieving the lowest support size and maintaining product strength, then, the microstructure is checked to ensure that there are no unmelted grains or pores in order to obtain a homogeneous structure that guarantees good mechanical properties by simulating the manufacturing parameters used and calculating grain size and dimensions in all directions.

Applying this methodology resulted in reducing the weight of the study sample by 27.5% and reducing the weight of supports by 30% and then verifying the strength of the optimized product by doing mechanical tests, and verify the strength of product after manufacturing it in the direction that achieves the smallest size of supports by doing mechanical tests on it, and obtain a homogeneous structure without unmelted grains and as a result achieve a manufacturable product with lighter weight, smaller support size and better mechanical properties by using finite element method in planning designing and manufacturing products.

Keywords: additive manufacturing, 3D metal printing, finite element method, topology optimization, mechanical properties.

الفصل الأول

الإطار العام للبحث

1-1 المقدمة:

لفتت تقنيات التصنيع بالإضافة انتباهاً ملحوظاً من قبل الجهات الأكاديمية والصناعية كونها تختلف كثيراً عن طرق التصنيع التقليدية. فكان التطور التكنولوجي لها سريعاً حيث نقلنا إلى جيل جديد في الصناعة. حيث عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد تتم بترسيب المادة طبقة فوق طبقة بعد التصلب. وقد زالت القيود التصنيعية للحصول على أشكال معقدة والمقترحة من عمليات أمثلة الشكل، والتي لم يكن بالإمكان تصنيعها بطرق التصنيع التقليدية. إذ طور في السنوات الأخيرة العديد من طرق الأمثلة ووضعت برامج حسابها للعديد من التطبيقات مما أسهم في حل العديد من المشاكل الإنشائية والحرارية. وبالرغم من ذلك ظهر العديد من العوائق والقواعد الجديدة التي يجب أخذها عند تصميم أي منتج لتصنيعه بالطباعة ثلاثية الأبعاد منها:

1- حجم الدعائم وطريقة ازالتها.

2- خواص المادة بعد عملية الطباعة.

1-2 مشكلة البحث:

سيركز هذا البحث على مشكلتين رئيسيتين هما:

1-2-1 الدعائم:

تعدّ الدعائم ضرورية للتأكد من أن المنتج قابل للطباعة بنجاح، لكن طباعة الدعائم تقلل من سرعة الطباعة وتحتاج بعد انتهاء عملية الطباعة للإزالة، حيث من40 الى70% [39] من كلفة المنتجات المصنعة بالطباعة ثلاثية الأبعاد تذهب لإزالة الدعائم، وفي كثير من الأحيان تشكل الدعائم وزناً زائداً مضافاً الى الجزء المصنع وهذا يعد مشكلة اقتصادية وخاصة عندما تكون مادة الطباعة غالية الثمن لذلك من الضروري اختصار هذه الدعائم أو الغاؤها.

1-2-2 تباين خواص المادة:

تحرضّ عملية الطباعة الثلاثية الابعاد المواد وتجعلها متباينة الخواص وبشكل عام لا يمكن تجنب هذه المشكلة لكن يمكن الحد منها وخصوصاً أن تباين الخواص له تأثيراً واضحاً على الخواص الميكانيكية مثل حد المتانة وحد الخضوع. لذلك فإن تباين الخواص يجب أن يؤخذ بالحسبان عند تصميم المنتجات وطباعتها ووضعها ضمن خطة تصميم المنتج وذلك بضبط بارامترات الطباعة (اختيار الاتجاه الأمثل للبناء – السرعة المناسبة للطباعة – شدة الليزر بالإضافة الى طريقة الطباعة المستخدمة في التصنيع).

1-3 تساؤلات البحث:

هل يمكن لطريقة العناصر المنتهية أن تكون مفيدة في عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد؟

هل يمكن الحصول على منتج خالي من العيوب من المرة الأولى للطباعة؟

ماهي المعوقات التي تواجهنا؟

كيف يمكن الحد من هذه المعوقات؟

1-4 فرضيات البحث:

من خلال النمذجة الحاسوبية يمكن تحسين كفاءة الطباعة ثلاثية الأبعاد واختصار زمن الطباعة وتوفير كلفة المنتج.

1-5 مسلمات البحث:

استخدام برامج المحاكاة لعملية الطباعة الثلاثية الأبعاد سيسهم في الاستفادة القصوى لميزات الطباعة ثلاثية الأبعاد.

1-6 هدف البحث:

التحكم في تصميم المنتجات من خلال استخدام طرائق الأمثلة مثل topology optimization و lattice optimization وبالتالي إبقاء الكتلة الفعالة من المادة، ومحاكاة بارامترات عملية الطباعة من حيث شدة الحرارة و سرعة الطباعة واتجاه بناء النموذج، وتحديد توضع الدعائم عن طريق استخدام الأدوات الجديدة التي تقدمها طريقة العناصر المنتهية ثم يتم التأكد من خواص المادة بعد عملية الطباعة باستخدام أدوات تحليل المادة الجديدة (ANSYS Additive Science) الموجودة في النسخ الحديثة التابعة لبرنامج ANSYS كما سيتم اختبار المنتج

أثناء عملية الطباعة ودراسة الأثر الحراري للطباعة ودراسة الاجهادات والتشوهات والتحقق من متانة المنتج أيضاً باستخدام التحليل بطريقة العناصر المنتهية.

1-7 أهمية البحث:

يقدم البحث دراسة تصميمة متكاملة لجميع المنتجات المصنعة بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد بدءاً من الشكل الهندسي، والذي سيتم تطويره بطرق الأمثلة المعتمدة في الدراسة، لضبط عملية الطباعة واختيار الاتجاه الأمثل للطباعة بما يضمن اقل حجم ممكن للدعائم. واختيار الطاقة الحرارية المناسبة وسرعة الطباعة المناسبة التي تحقق بنية مادة متماسكة للمنتج مما ينعكس ذلك على تحسن الخواص الميكانيكية له، وبالتالي تنفيذ عملية طباعة خالية من العيوب من المرة الأولى.

1-8 مبررات البحث:

تعتبر الطباعة ثلاثية الأبعاد أحد طرق التصنيع المرنة، والتي من خلالها نستطيع تصنيع كافة الأشكال المعقدة والتي لا يمكن تصنيعها بطرق تصنيع أخرى. وللاستفادة من هذه الامكانية تم استخدام طرق أمثلة الأشكال الموجودة قبل وجود الطابعة ثلاثية الأبعاد من أجل دراسة إمكانية التوفير في المواد المستهلكة للإنتاج، وكلفة التصنيع. هذا وإن توفر برامج تدعم عملية محاكاة الطباعة ثلاثية الابعاد أدى إلى التحكم بكل بارامترات الطباعة وضبطها قبل تنفيذها مما يسهم في الحصول على منتجات بنوعية جيدة من المرة الأولى للطباعة، وهذا ينعكس على انخفاض كلفة تصنيع المنتجات بالطباعة الثلاثية الابعاد. علماً بأن طريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد لا تستخدم للإنتاج الكمي لذلك كان من الضروري تخفيض كلفة المنتجات المصنعة بها دون المساس بجودة هذه المنتجات.

1-9 محدوديات البحث:

ستتم الدراسة فقط على الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد وذلك بالتعاون مع القطاع الخاص الداعم لموضوع البحث.

1-10 الدراسات السابقة:

- درس (park et al 2019) أمثلة هيكلية لهيكل تعويضي سني له نفس الوظيفة للهيكل التعويضي في الدراسة المقدمة ولكن بعدة تصاميم مختلفة، ثم تمت عملية الأمثلة باستخدام طريقة العناصر المنتهية، وذلك بتطبيق قوى لحالتي تحميل مرة عامودية ومرة مائلة، وقد أظهر تحليل التصاميم الناتجة عن الأمثلة انخفاضاً بالإجهادات الأعظمية بنسبة 16% [14].
- درس (Carnicero et al 2021) تصميم جديد لحامل زراعات أسنان مصنوع من التيتانيوم ويثبت بشكل جراحي بالاعتماد على الأمثلة الهيكلية الناتجة من تحليل العناصر المنتهية، وبعدها أجريت عملية الأمثلة لخمس حالات تحميل متوافقة مع قوى المضغ في الحالات الحرجة، وأدى تطبيق الأمثلة إلى تخفيض عدد براغي تثبيت الجهاز من 6 براغي الى 4 براغي مما أدى لتقليل زمن العمل الجراحي وزمن تعافي المريض إضافة الى تخفيض وزن الجهاز بنسبة 25% وهذا متوافق مع نتائج هذه الدراسة المقدمة [15].
- درس (Nicali et al 2021) أمثلة هيكلية لجهاز صناعي مزروع ضمن الفم بالاعتماد على تحليل العناصر المنتهية، وقد تم تحديد القوى المطبقة باستخدام القياسات الحيوية للمريض، وقد أعطت الأمثلة الهيكلية شكل جديد للجهاز تتوزع المادة فيه بشكل أفضل مما ساعد على زيادة سطوح الاتصال بين الجهاز والمادة المترسبة عليه إضافة الى انخفاض حجم الجهاز 2% [13].
- قدم (Maintz et al 2022) أمثلة هيكلية لصفائح ترميم كسور عظم الفك مصنوعة من مادة التيتانيوم تم صنعها باستخدام طباعة معدنية ثلاثية الأبعاد وذلك بالاعتماد على تحليل العناصر المنتهية، حيث تم تحميل الصفائح بقوى متوافقة مع قوى المضغ وردود أفعال العضلات وتمت الدراسة على نوعين من الصفائح، صفائح تم تثبيتها بأربعة براغي وصفائح تم تثبيتها بثمانية براغي، توصل

الباحثون الى أفضل توزع للإجهادات ضمن الصفائح بعد تطبيق الأمثلة الهيكلية، بالإضافة الى انخفاض كلفة تصنيع الصفائح مع إمكانية الحصول على صفائح متوافقة مع شكل فك المريض وقادرة على تحمل قوى المضغ [1].

- درس (Kopel et al 2020) إمكانية تطبيق أمثلة هيكلية على صفيحة تستخدم لتعويض جزء من الفك تم استئصاله وذلك بالاعتماد على التحليل بطريقة العناصر المنتهية، أعطت التصاميم المقدمة توزع أفضل للإجهادات ضمن الصفيحة، حيث تم تخفيف أماكن تركز أكبر الاجهادات لجعل الصفيحة تتحمل القوى المتغيرة خلال عملية المضغ، تم تصنيع الصفيحة من مادة التيتانيوم من الأمثلة الهيكلية باستخدام طابعة معدنية ثلاثية الأبعاد وقد اجريت عليها اختبارات ميكانيكية وحيوية وانهارت الصفيحة بشكل متوافق مع نتائج تحليل العناصر المنتهية [6].
- قدم (Kalman et al 2022) دراسة قارن بها تصنيع هيكل تعويضي مشابه للهيكل المدروس مصنوع من التيتانيوم، الأول مصنوع بالتفريز والثاني باستخدام طباعة معدنية ثلاثية الأبعاد، وتم ذلك لحالتين، الأولى هيكل مصمت والثانية هيكل مفرغ بشكل خلوي. وقد أظهرت الدراسة أن الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد مناسبة لتصنيع هذا الهيكل بتكلفة مناسبة، بالإضافة الى إمكانية تصنيع منتجات معقدة وأكثر استدامة بسبب تطبيق الأمثلة الخلوية [7] .
- درس (Baghi et al 2021) تأثير اتجاه البناء على عينات حقيقية من معدن Ti-6Al-4V مصنوعة بطريقة صهر الليزر الانتقائي على الخواص الميكانيكية حيث قدم الباحثون تصميماً جديداً العينات يمكن طباعتها بشكل أفقي وعامودي وصالحة مباشرة لإجراء الاختبارات الميكانيكية دون أي عمليات لاحقة مثل المعالجة الحرارية والتشغيل، وقد توصل الباحثون الى أنه يمكن استخدام العينات الأفقية مباشرة بعد الطباعة دون عمليات تشغيل لاحقة لبعض التطبيقات أما العينات العامودية فقد

عانت من ضعف وانخفاض حد المتانة بحدود 38% وفسر الباحثون ذلك الى وجود علاقة عكسية بين جهة توضع الطبقات واتجاه الحمل المطبق[3].

- درس (Ren et al 2019) أثر زاوية البناء على الخواص الميكانيكية والبنية المجهرية لخليطة Ti_6Al_4V مصنعة بطريقة الصهر الانتقائي، وهي نفس الخليطة المستخدمة لعينة الدراسة المقترحة، وذلك عند خمس زوايا بناء (0^o, 30^o, 45^o, 60^o, 90^o) لعينات ذات مقطع دائري وعينات ذات مقطع مستطيل وتم تشكيل أربع مجموعات هي: عينات لم تخضع لمعالجة حرارية لاحقة. وعينات خضعت لمعالجة حرارية عند درجة حرارة منخفضة. وعينات خضعت لمعالجة حرارية عند درجة حرارة مرتفعة. وعينات خضعت لضغط مرتفع. وتم اجراء اختبارات الشد والتعب وتحضير سطوح هذه العينات لفحص البنية المجهرية. وقد توصل الباحثون الى وجود اختلاف بالخواص الميكانيكية باختلاف زوايا البناء للعينات التي خضعت لمعالجة حرارية عند درجة حرارة منخفضة، واختلاف بسيط للخواص الميكانيكية للعينات التي خضعت لمعالجة حرارية عند ضغط مرتفع وحرارة مرتفعة، كما لوحظ أن العمر التعبي لهذه العينات تغير مع تغير زوايا البناء[8].
- درس (Hartunian et al 2018)تأثير اتجاه البناء على البنية المجهرية والخصائص الميكانيكية للخليطة Ti-6Al-4Vالمصنعة بطريقة صهر الليزر الانتقائي حيث تم تصنيع عينات مستطيلة في ثلاث اتجاهات بناء X,Y,Z واجراء معالجة حرارية لها ومن ثم قص عينات شد وصدم نظامية واجراء اختبارات شد وصدم وقساوة ومسح مجهري وخشونة وتوصل الباحثون الى ان اتجاه البناء يؤثر بشكل واضح على الخصائص الميكانيكية والبنية المجهرية وإن أمثلة بارامترات الطباعة يحسن من جودة العينات المصنعة بالتصنيع بالإضافة ويعطي خصائص موحدة في مختلف اتجاهات البناء[5].
- درس (Simonelli et al 2014) تأثير اتجاه البناء على الخصائص الميكانيكية وأنماط التحطم لعينات مصنوعة من خليطة Ti_6Al_4V وبتقنية صهر الليزر الانتقائي، حيث تم تصنيع عينات

باتجاه الحافة XZ والحافة XY والحافة YZ وتشكيل مجموعتين من العينات، عينات خضعت لعملية جلخ بعد الطباعة وعينات خضعت لمعالجة حرارية بعد الطباعة وقد توصل الباحثون إلى أن العينات المطبوعة وفق الاتجاه XZ أعطت خصائص شد أفضل وأعلى استطالة عند التحطم، كما أنها أثرت في ميكانيزم التحطم وانتشار الشقوق في المنتجات وتبين ذلك عند البنية المجهرية [45].

- درس (Palmeri et al 2021) تأثير زوايا البناء على البنية المجهرية والقساوة الميكروية لخليطة Ti_6Al_4V ومصنعة بطريقة صهر الليزر الانتقائي، حيث درس الباحثون تأثير اتجاه البناء وفق اتجاهين هما (0^o, 90^o)، وقد وجد الباحثون أعلى قيمة للقساوة الميكروية في العينات كانت عند الزاوية 0، في كل مناطق الدراسة أكثر من العينات بالزاوية 90^o، وجد الباحثون أعلى نسبة لعدم تجانس البنية المجهرية في العينة المطبوعة عند الزاوية 0^o ، ومن جهة أخرى وجدت المسامية في العينات المبينة بالزاوية 90^o [9].
- درس (Weinhold et al 2021) محاكاة لعملية الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد لذراع توصيل محرك تم تطوير تصميمه باستخدام الأمثلة الهيكلية، إذ أسهمت ساهمت الأمثلة الهيكلية بتخفيض وزن الذراع 44% ومن ثم دراسة أثر زاوية البناء وموقع الذراع على طاولة البناء على تشوهات الذراع، وأيضاً تمت دراسة أثر زاوية البناء على التشوهات والاجهادات المتبقية عند شروط طباعة مختلفة، وقد توصل الباحثون الى أن زاوية الطباعة لها تأثير واضح على التشوهات أكثر من موقع على طاولة الطابعة [2].
- درس (Kremer et al 2022) محاكاة للخواص الميكانيكية والبنية المجهرية والاجهادات المتبقية لخليطة CuSn10 مصنعة باستخدام طريقة صهر الليزر الانتقائي باستخدام طريقة العناصر المنتهية، بعد إعطاء النموذج الخواص الميكانيكية للمادة التي تم الحصول عليها من الاختبارات الميكانيكية والخواص الحرارية والتي تم الحصول عليها من الدراسات السابقة تم اجراء محاكاة حرارية_ستاتيكية

لهذه الخليطة وحساب الاجهادات المتبقية والتشوهات ومقارنتها مع التجارب العملية، وأعطى النموذج توافق مع النتائج التجريبية. كما تمت الاستفادة من نموذج المادة المطور لإجراء محاكاة للبنية المجهرية وتحديد الاتجاه الأمثل الذي يعطي أفضل بنية مجهرية. وتوصل الباحثون الى ان خليطة CuSn10 تصلح للاستخدام بطريقة صهر الليزر الانتقائي عند طاقة حرارية مقدارها 100 [16] .W

- قدم (Sedlacek et al 2023) منهجية تصميم مكثفة لإمكانية تطوير المنتجات باستخدام الأمثلة الهيكلية وجعلها صالحة لعملية الطباعة المعدنية الثلاثية الأبعاد باستخدام العناصر المنتهية، وهذا مطابق للطريقة المتبعة في الدراسة المقدمة، إذ تم تطوير تصميم حامل للعمود المرفقي باستخدام الأمثلة الهيكلية ومن ثم تحليل عملية الطباعة بزاوية 45° فقط ودراسة التوزع الحراري والاجهادات المتبقية والتشوهات لعدة شروط بناء مختلفة، أما في الدراسة المقدمة فتمت الدراسة عند عدة زوايا، وأظهر الباحثون الى أن تطبيق هذه المنهجية أسهم في تقليل زمن تطوير المنتج وإمكانية استخدام نتائج الأمثلة الهيكلية مباشرة في التصنيع بالإضافة وبأقل قدر من الأخطاء [12].
- درس (Hassaan Ali et al 2023) محاكاة بطريقة العناصر المنتهية لتحليل أثر طريقة المسح ومقدار طاقة المصدر الحراري على تشوهات والاجهادات المتبقية لمعدن EH36steel بطريقة القوس السلكي للتصنيع بالإضافة، أما في الدراسة المقدمة تم دراسة أثر زوايا البناء على التشوهات والاجهادات المتبقية لمعدن Ti-6Al-4V ولطريقة صهر الليزر الانتقائي، وقام الباحثون بدراسة أربع طرق للمسح وعند ثلاث طاقات حرارية مختلفة وتوصل الباحثون الى أن طريقة المسح تؤثر على الاجهادات المتبقية والتشوهات أكثر من مقدار الطاقة الحرارية المستخدمة والى أهمية استخدام طريقة العناصر المنتهية في تحديد بارامترات الطباعة المثلى [11].

1-11 منهجية البحث وأدواته:

اعتمد البحث على المنهج العلمي البحثي المبني على المحاكاة الحاسوبية والتحقق منها بالاختبارات التجريبية الميكانيكية وجرت الاستعانة بالأدوات التالية:

- حاسوب ASUS VivoBook بمعالج intel core i7 8550U 1.80 GHZ 8th gen
- ذاكرة نفاذ عشوائية 16GB Ram
- برنامج ANSYS
- جهاز اختبار Forneyوهو جهاز اختبار عام لتنفيذ اختبارات الشد والضغط باستطاعة 200 Ton
- طابعة ثلاثية الأبعاد لطباعة الأجسام المعدنية من نوع Riton-D150

1-12 بنية الأطروحة:

تتكون الأطروحة من ثلاثة فصول على النحو الآتي:

– يتناول الفصل الأول الإطار العام للبحث ويتضمّن: مقدّمة، وبعض الدراسات السابقة، وكلّ من مشكلة البحث وهدفه وأهمّيّته ومبرراته وحدوده ومنهجه وأدواته، بالإضافة إلى بنية الأطروحة.

– يتناول الفصل الثاني الأساس العلمي لعملية التصنيع بالإضافة بشكل عام، والأساس العلمي للطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية بشكل محدد، والاساس العلمي لعملية الأمثلة والاساس العلمي لطريقة العناصر المنتهية المستخدمة في نمذجة الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد.

– يتناول الفصل الثالث الدراسة العملية لعينة الدراسة من خلال اجراء عملية الأمثلة عليها والتحقق من متانتها حاسوبياً ثم تصنيعها واجراء الاختبارات الميكانيكية للعينات المقترحة واختيار العينة الأمثل واستخدامها في المرحلة التالية وهي اختيار الاتجاه الأمثل للبناء، وقد أجريت محاكاة عملية التصنيع باستخدام طريقة العناصر المنتهية عند أربع زوايا بناء

وهي (0^o,30^o,45^o,90^o) وحساب الاجهادات المتبقية والتشوهات، وبعدها تنفيذ هذه العينات وحساب وزن الدعائم والتحقق من متانتها من خلال اجراء الاختبارات الميكانيكية، وبعدها اجريت عملية محاكاة للبنية المجهرية للمادة وتم حساب حجم الحبيبات واتجاه نموها بكافة الاتجاهات والتحقق من الحصول على بنية متجانسة ومناقشة النتائج والاستنتاجات والتوصيات والخاتمة.

الفصل الثاني

الدراسة النظرية

التصنيع بالإضافة

2-1 ما هي تقنية التصنيع بالإضافة؟

يشمل مصطلح التصنيع بالإضافة (AM) كل التقنيات التي تستطيع بناء المجسمات المادية من نموذج افتراضي ثلاثي الأبعاد وذلك عن طريق بناء طبقة تلو الأخرى حتى ينتهي المجسم. وبمقارنة هذه الطريقة مع تقنيات التصنيع بالإزالة، والتي تبدأ من كتلة من المادة الخام يتم إزالة جزء غير مطلوب من المادة باستخدام آلات التشغيل وذلك للوصول الى المجسم المطلوب، فإن تقنية التصنيع بالإضافة تبدأ من الفراغ ويبنى المجسم بطباعة طبقة تلو الأخرى حتى ينتهي بناء المجسم كما هو مبين بالشكل (2-1) [17].

تؤخذ ثخانة طبقة البناء اعتماداً على التقنية المستخدمة ونوع المادة المستخدمة، حيث تتراوح ثخانة الطبقة من بضعة ميكرونات حتى ثخانة 0.25 mm للطبقة الواحدة.



الشكل (2-1): مقارنة بين تقنية التصنيع بالإضافة وتقنية التصنيع بالإزالة[17]

يعود مصطلح التصنيع بالإضافة إلى نهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين، حيث تم اعتماد نظام بناء الطبقات في تصنيع الخرائط الجغرافية الثلاثية الأبعاد وذلك لإبراز التضاريس ولف هذه الخرائط على مجسم الكرة لإعطاء شكل الكرة الأرضية.

أما المفهوم الحديث للتصنيع بالإضافة فيعود إلى منتصف القرن العشرين وتحديداً عام 1951 من خلال الاختراع الذي قدمه Otto John Munz والذي يمكن اعتباره الأساس في طريقة الطباعة الحديثة. حيث اعتمد أساساً على تحويل المجسم إلى مقاطع ثنائية الأبعاد وطباعة طبقات من المادة الحساسة للضوء فوق بعضها بحيث يكون المقطع العرضي لكل طبقة نفس المقطع العرضي للمجسم. لكن عيب هذه الطريقة ان المجسم ثلاثي الأبعاد النهائي بحاجة الى معالجة كيميائية يدوية لكي يصبح جاهز[17].

وخلال العقود التي تلتها شهدت التقنية تطوراً ناجحاً حيث قدم Swainson عام 1968 طريقة لتصنيع النماذج البلاستيكية عن طريق استخدام مواد بوليميرية تتصلب بالضوء من خلال تعرضها لشعاع ليزر حيث يتم بثق المواد البوليميرية بشكل متزامن مع شعاع الليزر [17].

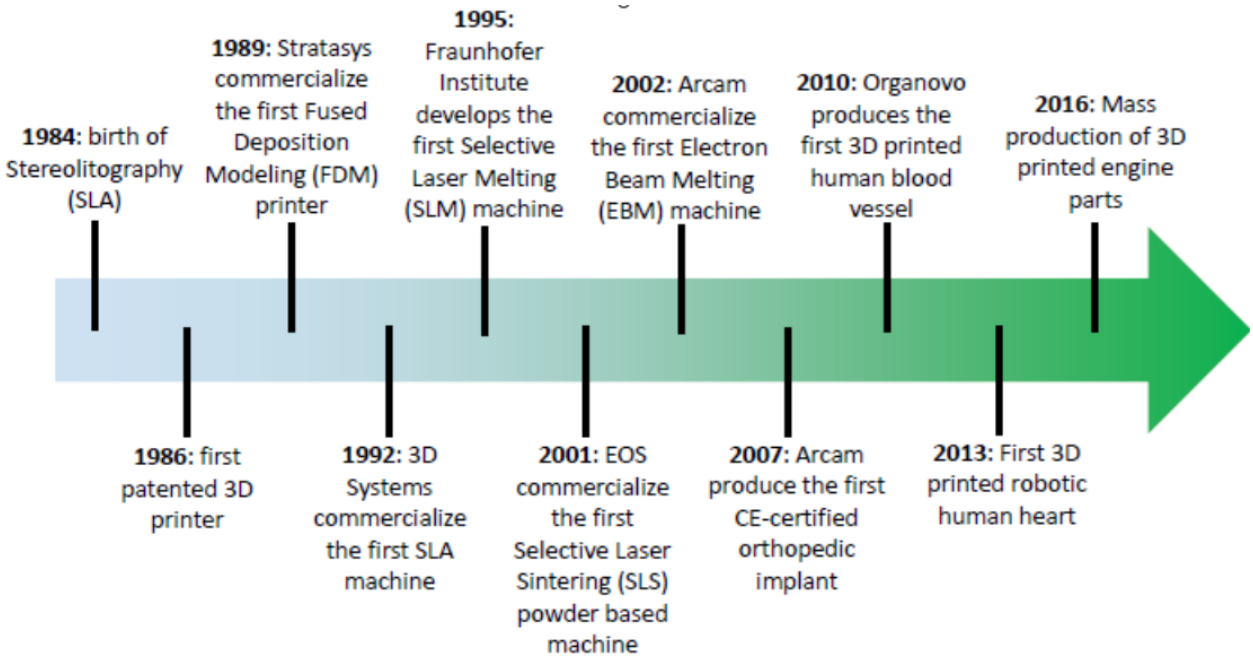
قدم **(Ciraud, 1971)** تقنية المساحيق والتي يمكن اعتبارها الأب لتقنيات الترسيب المباشر الحديثة مثل تقنية powder bed fusion، وفي عام 1979 طور Housholder نموذج اولي لاستخدام الليزر في الطباعة والتي عرفت لاحقاً SLS وSLM [17].

ومن بعدها توالت تطورات التصنيع بالإضافة، فقد قُدم عمل Hideo Kodama من اليابان بالتوازي مع عمل Herbert في تطوير نظام يستخدم الشعاع فوق البنفسجي UV لتصليب الطبقة البوليميرية عن طريق استخدام نظام مرآة عاكسة لمسح طبقات النموذج.

أما الشكل التجاري للتصنيع بالإضافة المعروف اليوم فقد نشأمنذ بداية عام 1986 على يدCharles Hull وظهر أول نموذج تجاري لتقنية SLA عام 1988 ومن ذلك الوقت فإن التطور ازداد بشكل متسارع وذلك بسبب تطور التقنيات والأنظمة المتاحة والمواد.

عام 2009 قامت جمعية المهندسين الأمريكيين بوضع نظام قياسي لاستخدام تقنية التصنيع بالإضافة في الصناعة تمثلت بالمواصفة ASTM F2792 10e1 وضمن هذه المواصفة تم وضع تعريف لمصطلح التصنيع بالإضافة وهو:

العملية التي تجمع المواد لصناعة مجسمات من بيانات النموذج الثلاثي الأبعاد الافتراضي، عادة تكون طبقة فوق طبقة، بشكل معاكس لطرق التصنيع بالإزالة مثل عمليات التشغيل التقليدية ويبين الشكل (2-2) التطور الزمني للتصنيع بالإضافة[24].

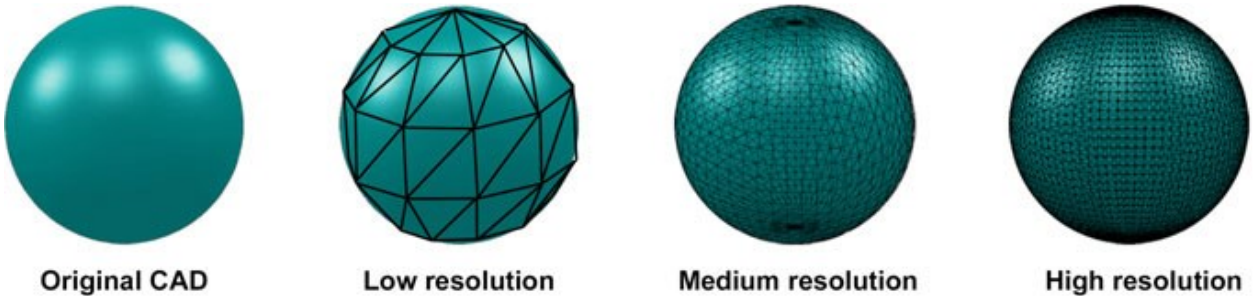


الشكل (2-2): الخط الزمني لتطور تقنية AM [24].

2-2 تسلسل عملية التصنيع بالإضافة:

تبدأ كل تقنيات التصنيع بالإضافة بإنشاء النموذج الافتراضي الثلاثي الأبعاد باستخدام أحد برامج التصميم بمساعدة الحاسب CAD وذلك بشرط أن يكون نموذج بحجم مغلق، فإن كان النموذج بدون أحد الأوجه أو يحتوي على ثقوب عندها تمثل هذه الثقوب على أنها أسطح رقيقة جداً والتي لا يمكن طباعتها، لكن توجد بعض برامج AM وظيفتها الإصلاح الأتوماتيكي للنموذج.

يتم تحويل ملف CAD الى صيغة تستطيع آلة AM فهمها. الصيغة الأكثر استخداماً عادة هي STL (standard triangle language, stereolithography, or standard tessellation language) والتي تحول ملف CAD الأصلي الى ملف مثلثي وكلما زاد دقة ملف STL زاد عدد المثلثات التي يحتويها الملف وبالتالي الحصول على نموذج بجودة عالية ويظهر الشكل (2-3) أمثلة على دقة ملف STL [17].



الشكل (2-3): أمثلة على دقة ملف STL [17]

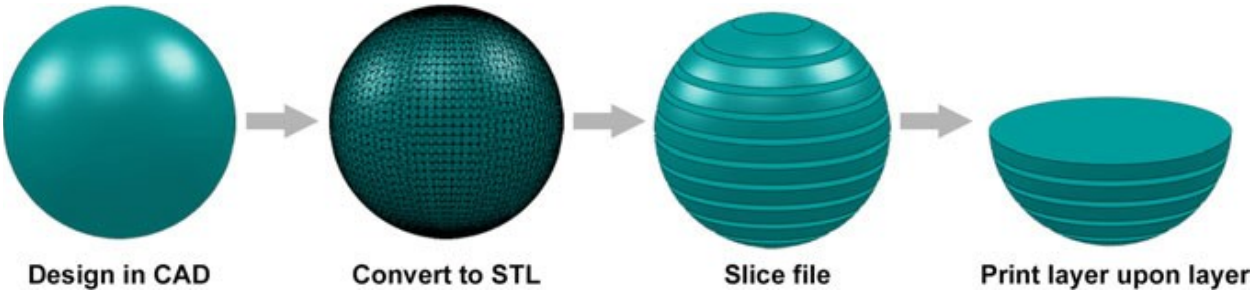
توجد حالياً صيغ جديدة لملفات التصنيع بالإضافة وهي AMF (Additive Manufacturing File Format) و 3MF (3D Manufacturing Format) والتي تعد تطويراً لصيغة STL التقليدية حيث يحتوي الملف على معلومات إضافية تتضمن اللون والمادة وتسمح باستخدام المثلثات المنحنية وذلك لتحسين جودة النموذج. بدأت تعتمد صيغة

3MF من قبل الشركات مثل Autodesk, Dassault Systems, Netfabb, Microsoft, SLM Solutions, HP, Shapeways, Materialise, 3D Systems, Siemens PLM.

يعمل بعض الباحثين على الطباعة مباشرة من ملف CAD الأصلي مما يعطي أمل في تجنب عملية التحويل والتي تقلل من جودة النموذج.

يفتح ملف STL في برنامج آلة AM، ويتوضع النموذج على طاولة البناء بشكل افتراضي ضمن بيئة البرنامج وذلك بالاتجاه المناسب لعملية الطباعة، إذ يؤثر اتجاه الطباعة على جودة السطح ومتانة المنتج النهائي، بعدها يشرح برنامج آلة AM ملف STL الى طبقات وتسمح بعض البرامج بضبط بارامترات الطباعة مثل ثخانة الطبقة، نوع المادة، مصفوفة الملء، السرعة ... إلخ. وبمجرد أن يرسل البرنامج تعليمات بناء المجسم إلى الآلة، تبدأ الآلة ببناء المجسم طبقة تلو الأخرى حيث يعتمد بناء كل طبقة على نوع المادة المستخدمة ونوع تقنية التصنيع بالإضافة المستخدمة ويبين الشكل (2-4) تسلسل عملية التصنيع بالإضافة[17].

بعد انتهاء الآلة من طباعة المجسم يتم إزالة المجسم من الآلة، ثم تبدأ عمليات ما بعد الطباعة والتي تتضمن تنظيف المجسم إما من البودرة أو الريزين حسب نوع الطباعة ثم إزالة الدعائم وفي بعض الحالات قد يحتاج المجسم الى جلخ في حال كان مطلوب سطح بدرجة نعومة عالية.



الشكل (2-4): تسلسل عملية التصنيع بالإضافة[17]

2-3 فوائد تقنية التصنيع بالإضافة:

يمكن تلخيص فوائد التصنيع بالإضافة بـ :

1- **التقليل من كلفة التصنيع:** تعطي عمليات دمج المواد والتصميم الرقمي ميزات اقتصادية للتصنيع بالإضافة خاصةً في إنتاج القطع المنخفضة الحجم، بما في ذلك تصنيع المنتجات الخاصة.

2- **زيادة في تعقيد المنتجات:** يعطي تسلسل إضافة المواد في تقنية AM قدرة على تصنيع منتجات بطريقة مبتكرة وتسمح هذه الطريقة بتصنيع مجسمات عالية التعقيد والذي من الصعب أو من المستحيل تصنيعها بطرق التصنيع التقليدية، ويتضمن ذلك تصنيع البنى الانشائية الناتجة من عمليات الأمثلة والبنى الخلوية ذات الفاعلية العالية.

3- **مواد مخصصة:** طريقة دمج المواد التي تتم في أثناء التصنيع بالإضافة يحفز الأبحاث في مجال علم المواد، مثل الحصول على مواد بوليميرية جديدة، إضافة الى ذلك إمكانية تصنيع بنى بيولوجية معقدة غير ممكنة التصنيع بالطرق التقليدية.

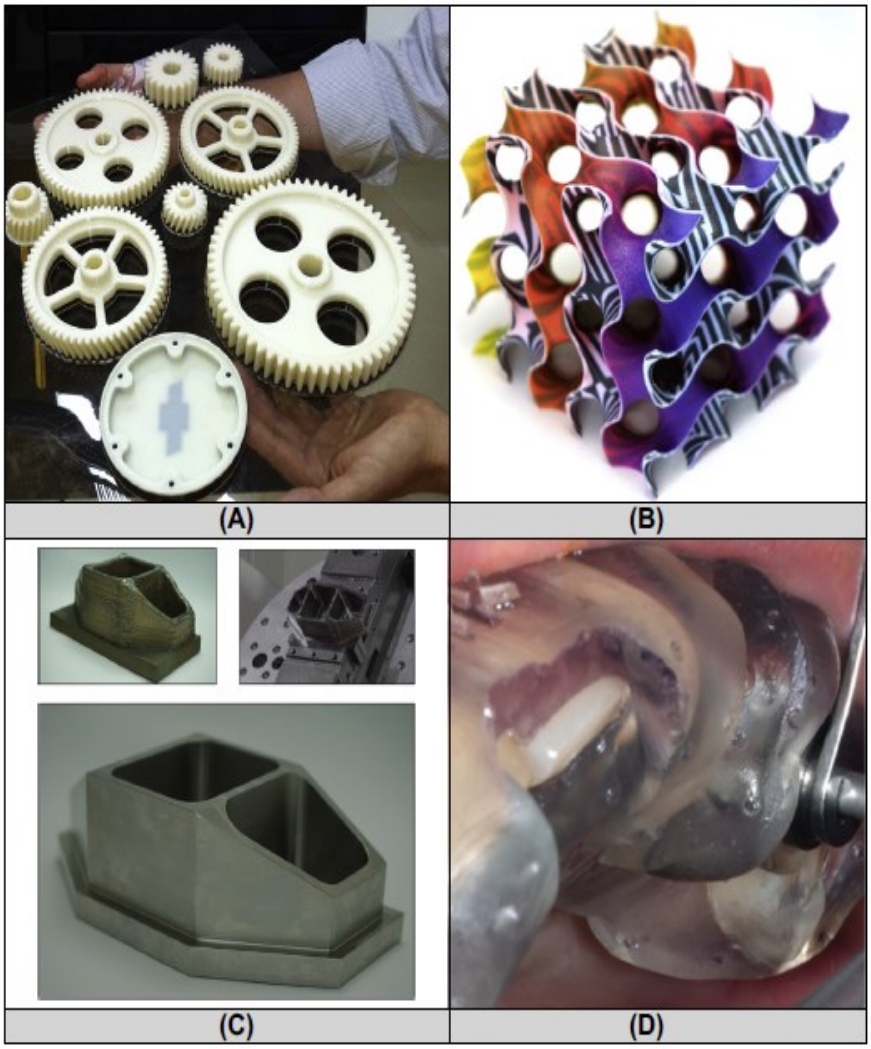
4- **التصميم الإبداعي:** تعطي البيئة الرقمية للتصنيع بالإضافة القدرة على أتمتة عملية التصميم، وتصنيع الأنظمة الهندسية المعقدة وهذا ممكن ان يقلل من كلفة التصميم إلى الحد الذي يمكنه تصنيع منتجات بكتل مادية مخصصة قادرة على تحقيق متطلبات معينة.

5- **تقليل الهدر:** يسمح الاستخدام الفعال لدمج مواد التصنيع بتقليل الهدر والكلفة لمواد المنتجات المعقدة.

6- **توزيع التصنيع:** يمكن مشاركة الملفات الرقمية بشكل عالمي بين مراكز التصنيع بما فيهم التصنيع عند الطلب وهذا يزيد من إمكانية تقليل وقت الحصول وكلفة الشحن وصيانة المعدات القديمة [18].

7- **التصنيع بالإضافة** عن طريق دمج البودرة المعدنية (مثل تلبيد المعدن باستخدام شعاع الليزر المباشر، الصهر باستخدام شعاع ليزر انتقائي، الصهر باستخدام شعاع الكتروني).

ويبين الشكل (2–5) أمثلة عن منتجات التصنيع بالإضافة.



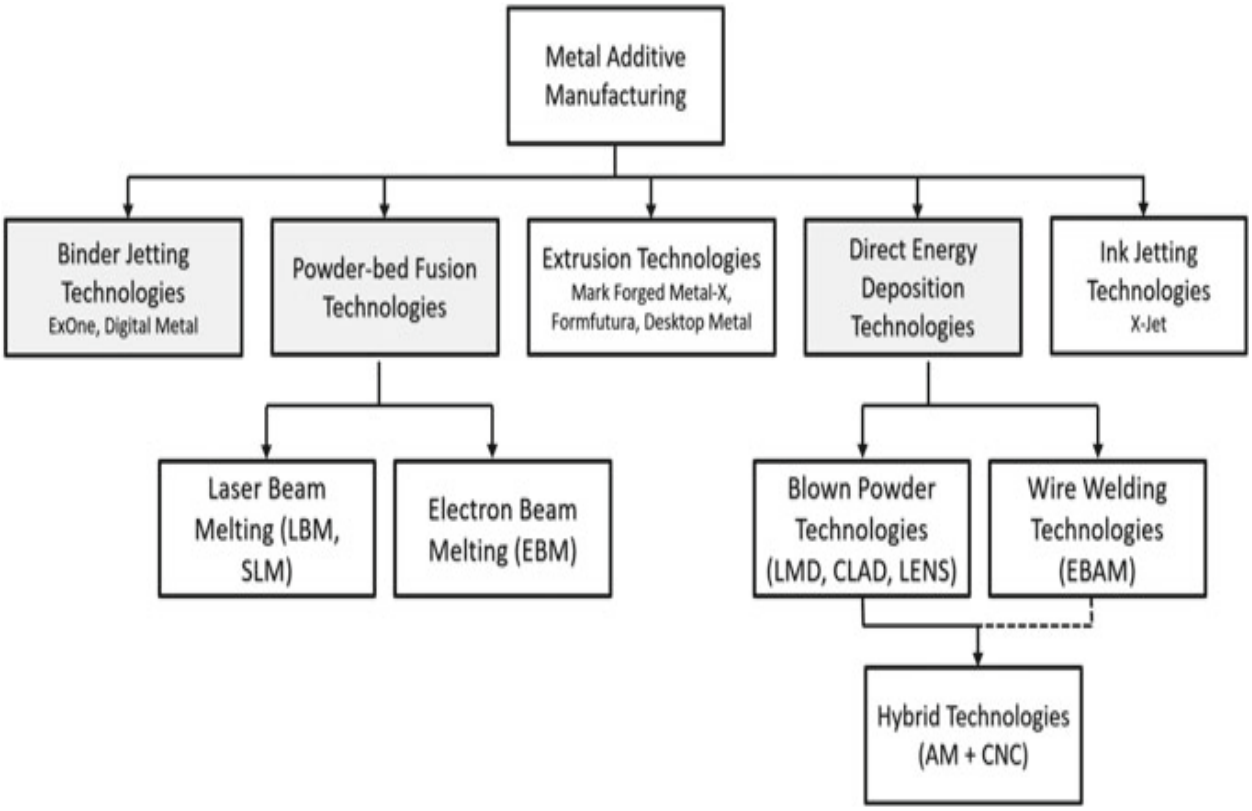
الشكل (2–5): أمثلة عن المنتجات التي يمكن الحصول عليها باستخدام تقنية التصنيع بالإضافة [18]

2-4 دمج البودرة المعدنية:

في هذه التقنية يتم صهر بعض حبيبات من بودرة المعدن باستخدام طاقة حرارية تطبق على تلك المنطقة. تتضمن المواد المستخدمة لهذا النوع من الصناعة الفولاذ الغير قابل للصدأ، الفولاذ الصلب، الألمنيوم، خلائط التيتانيوم، خلائط النيكل، الكروم كوبالت، والمعادن الثمينة مثل الذهب. حيث تتطلب الأجزاء المبنية بهذه التقنية إضافة دعائم والتي تبنى من نفس معدن القطعة المصنعة. وتزال هذه الدعائم بشكل يدوي بعد انتهاء عملية البناء، لذلك على المصممين ترك فراغات لتسهيل إزالة الدعائم، وعند تصميم القطع التي تحتاج الى دعائم صغيرة إعطائها إمكانية تكسرها أثناء إزالة الدعائم.

الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد سهلة بإنتاج القطع ولكن أهميتها تكمن في تصميم المنتجات التي ستصنع بتلك الطباعة والاختيار الصحيح لبارامتراتها للحصول على منتجات اقتصادية مع خصائص قيمة للمنتج المصنع [17]. إن فهم عميلة الطباعة هو جزء صغير من عملية التصنيع بالإضافة المعدنية لكن فهم التحضيرات قبل عملية الطباعة والإجراءات بعد عملية الطباعة يساعد المهندسين على اضافة قيمة حقيقة للمنتجات المصنعة بهذه التقنية.

تقسم الطباعة الثلاثية الأبعاد المعدنية الى عدة تصنيفات كما يبين الشكل (2-6) وسيتم التركيز في هذا الفصل على دمج البودرة المعدنية



الشكل (2–6): طرق التصنيع بالإضافة المعدنية[17].

2-5 أساسيات دمج البودرة المعدنية:

لمعرفة تقنية دمج البودرة المعدنية يجب الإحاطة بأنواع البودرة المعدنية المستخدمة في هذه التقنية من الطباعة وبخصائص صهر كل نوع من أنواع البودرة المستخدمة. وبدون تلك المعرفة لهذه الخصائص من الصعب فهم آلية حدوث العيوب في الطباعة المعدنية.

2-5-1 تصنيع البودرة المعدنية:

تصنع البودرة المعدنية المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد من خلال عملية تأيين الغاز حيث يوجد العديد من عمليات التأيين تتضمن التأيين الغازي – التأيين التخلخلي – التأيين البلازمي – التأيين بالطرد المركزي والتأيين المائي. ومن معظم عمليات التأيين نحصل على:

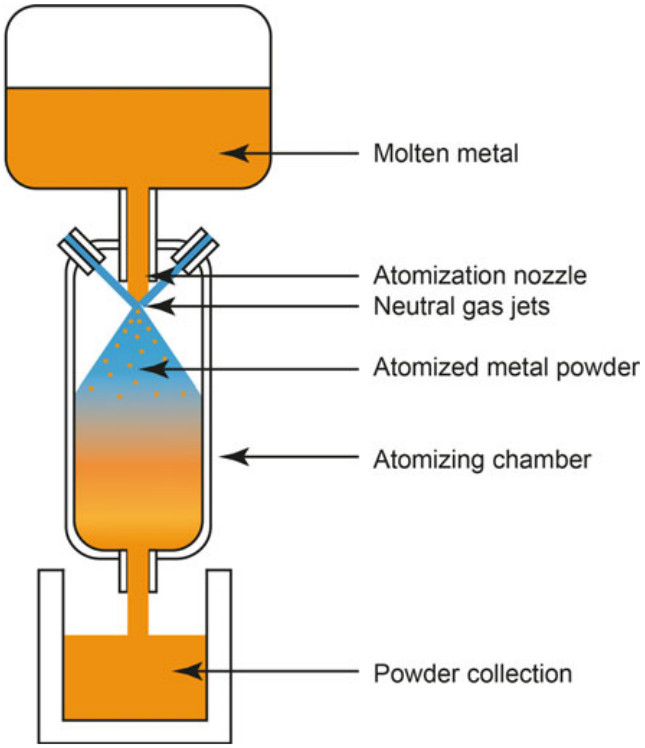
1- بودرة كروية الشكل.

2- بودرة ذات كثافة جيدة، وذلك بسبب الشكل الكروي والتوزع الحجمي للجزيئات.

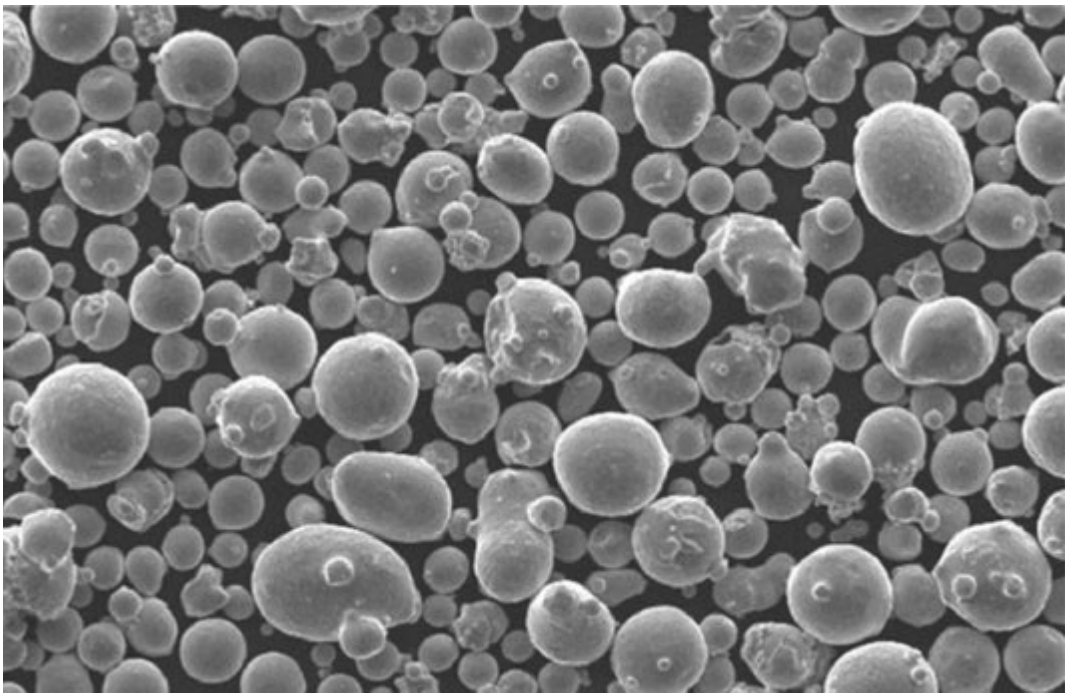
3- توزع حجمي جيد للجزيئات.

يعد التأيين الغازي أكثر الطرق المستعملة في انتاج البودرة المعدنية وهو يقوم على تفجير تيار من المعدن المصهور عن طريق نفث الغاز الطبيعي الذي يفجر المعدن الى جزيئات كروية.

التأيين الغازي يشبه التأين التخلخلي لكنه يتم بالخلاء مما يساعد في التخفيف من الأكسدة التي تحدث للبودرة المعدنية [17] ويظهر الشكل (2–7) مخطط التأيين الغازي.



الشكل (2–7): مخطط التأين الغازي [17]



الشكل (2-8): بودرة مصنعة بطريقة التأيين التخلخلي [17]

2-5-2 الشكل المثالي للبودرة:

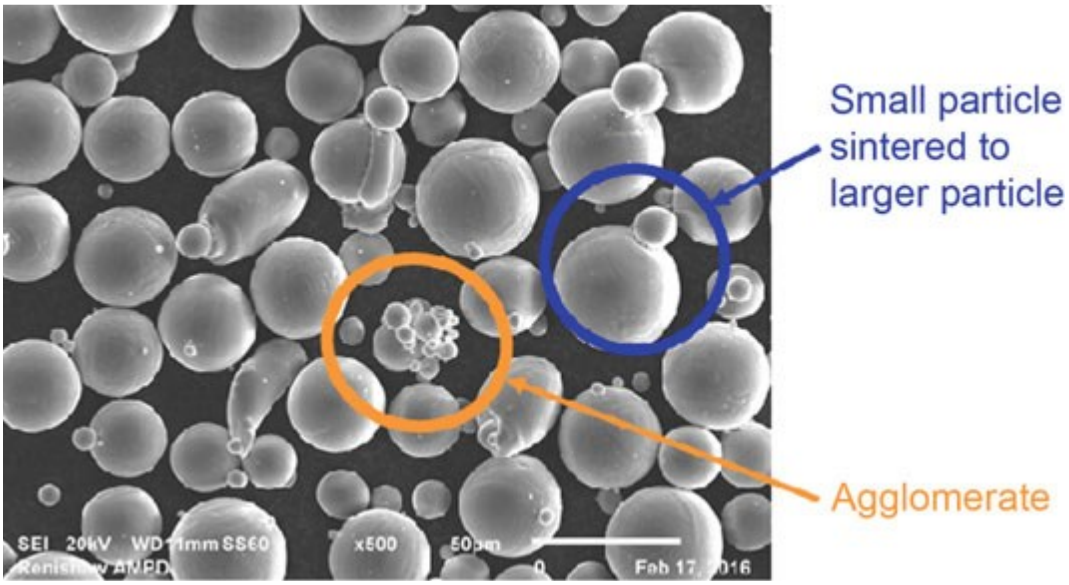
يوصى بالشكل الكروي للبودرة المعدنية المستخدمة في الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد وذلك لسهولة تدفقها، حيث الشكل الكروي سيساعد في الحصول على طبقات من البودرة المنتظمة في نظام دمج البودرة المعدنية.

تعمل كل أنظمة دمج البودرة المعدنية على رش طبقة معدنية رقيقة قبل صهر شعاع الليزر لكل طبقة، لذا كلما كان نشر البودرة بصورة منتظمة نحصل على منتج بجودة أعلى. لكن هناك معوقات تحد من التوزع المنتظم نذكر منها:

1-الاشكال الغير المنتظمة للبودرة مثل الحبيبات المتطاولة والتي يمكن أن تسبب صعوبة في انتظام رش البودرة كما يظهر الشكل (2-9).

2-الحبيبات الصغيرة العالقة على سطح الحبيبات الكبيرة والتي تسبب أيضاً صعوبة في انتظام رش البودرة وتسبب تموجات في الطبقات كما يظهر الشكل (2-9).

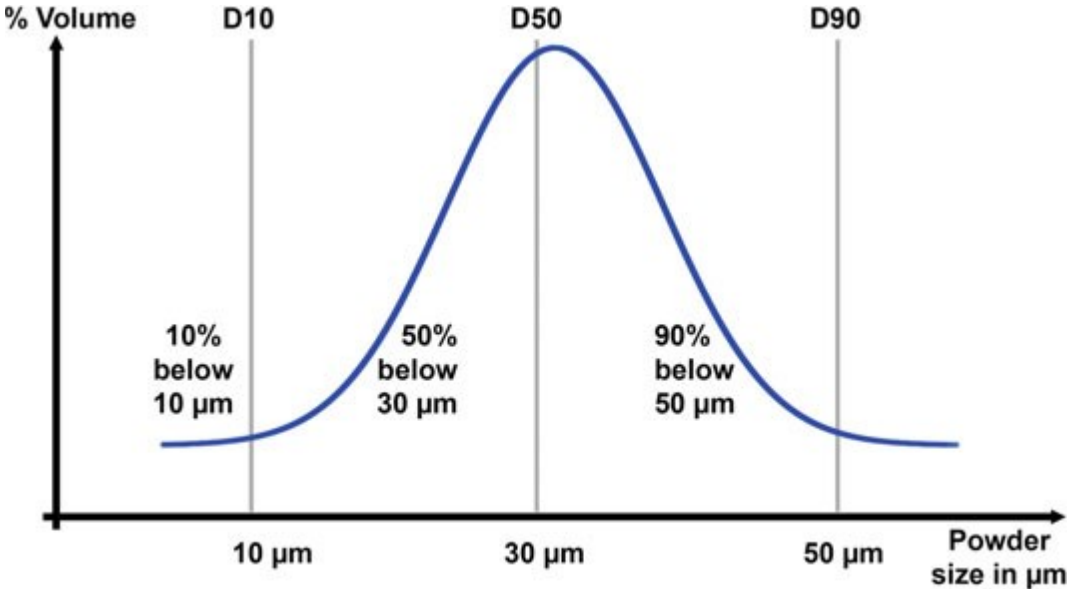
3–جزيئات البودرة المفرغة والتي يمكن أن تنفجر خلال عملية الصهر أو تسبب فقاعات غازية ضمن المنتج مما يسبب بالحصول على منتجات بمواصفات ميكانيكية ضعيفة لا تحقق المواصفات المطلوبة.



الشكل (2–9): العيوب الغير مرغوب بها في البودرة[17]

2–5–3 توزع حجم البودرة:

يتراوح حجم البودرة المستخدمة في تقنية دمج البودرة المعدنية من (40 – 30 µm) وذلك بتوزع منحني احتمالي مع وجود بعض الحبيبات الصغيرة. تحتاج بعض الأنظمة التي تتطلب طبقات رقيقة من البودرة الى حبيبات صغيرة الحجم. بعض المواد مثل الألمنيوم لها حجم كبير من الحبيبات بالمقارنة مع الفولاذ أو التيتانيوم. تستخدم البودرة ذات الأحجام الكبيرة التي تتراوح بين (50 و100–150) µm في تقنيات EBM وDED . ويظهر الشكل (2–10) التوزع الاحصائي لحجم البودرة المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية.



الشكل (2-10): توزع حجم البودرة المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية[17]

يتم دمج عدة أحجام للبودرة لتملأ البودرة الصغيرة الحجم الفراغات بين الحبيبات الكبيرة الحجم وهذا يساعد في الحصول على كثافة أعلى في طبقات البودرة المرشوشة، ولو تم استخدام حجم موحد للبودرة لحصلنا على فراغات بين حبيبات البودرة في الطبقة الواحدة وهذا يسبب انهيار أو تصدع خلال عملية الصهر أو خلال الاستثمار.

2-6 خصائص المواد المعدنية المستخدمة في التصنيع بالإضافة:

تتغير الخصائص الميكانيكية لمنتجات التصنيع بالإضافة المعدنية بشكل كبير حسب نظام التصنيع وحسب الآلة وحسب أنواع الآلات وحسب المواد المستخدمة. لأن كل نظام تصنيع يستخدم خصائصه الخاصة فيما يتعلق ببارامترات الليزر وطريقة المسح. حيث يعدل العديد من المستخدمين بارامترات الليزر وطرق المسح لتناسب حاجتهم الخاصة، وكما يوجد في العديد من الأدبيات عدد كبير من العوامل التي تؤثر على الخصائص الميكانيكية لمنتجات التصنيع بالإضافة.

إذا أردنا البحث بعمق في الخواص الميكانيكية للمنتجات بشكل عام فنجد أنها متضمنة ضمن الخصائص العامة للمواد المصنعة بطرق التصنيع بالإضافة وهي:

1- البنية المجهرية الناعمة بسبب التصلب السريع في عملية التصنيع.

2- تغير طفيف في الخصائص الميكانيكية باتجاه البناء.

3- تغير بسيط في المسامية بشكل خاص تحت السطوح العلوية، لكن الكثافة بشكل عام تصل الى 99% في عملية التصنيع بالإضافة. للحصول على كثافة كاملة وللتقليل من الخواص اللاخطية يتم اجراء معالجة حرارية [17].

2-7 العيوب المحتملة في مواد التصنيع بالإضافة:

عند استخدام بارامترات تصنيع خاطئة، أو اتباع طريقة واتجاه بناء خاطئ، أو عند استخدام بودرة بجودة أقل يمكن ملاحظة بعض العيوب في بنية المواد المصنعة بالإضافة وهي:

2- حبيبات بودرة غير منصهرة.

3- انصهار قليل.

4- مسامية.

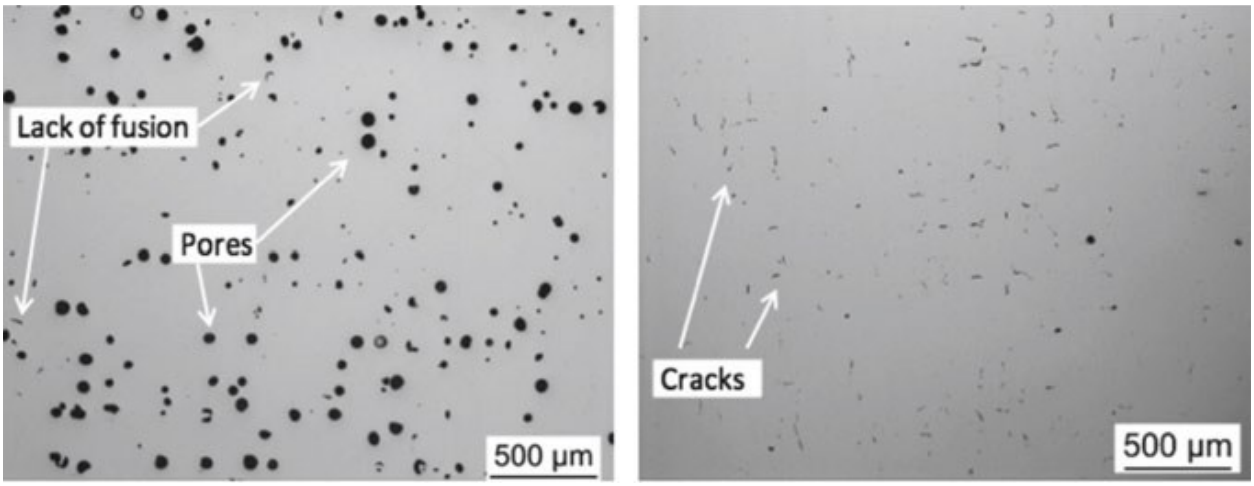
5- شقوق.

6- شوائب.

7- اجهادات متبقية.

8- سطوح خشنة.

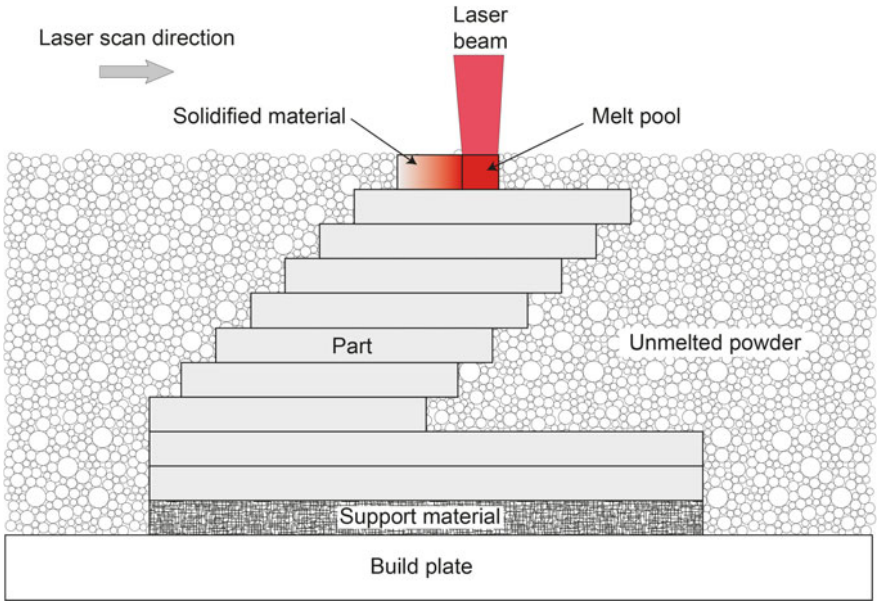
ويظهر الشكل (2-11) العيوب المحتملة في مواد التصنيع بالإضافة.



الشكل (2-11): العيوب المحتملة في مواد التصنيع بالإضافة[17]

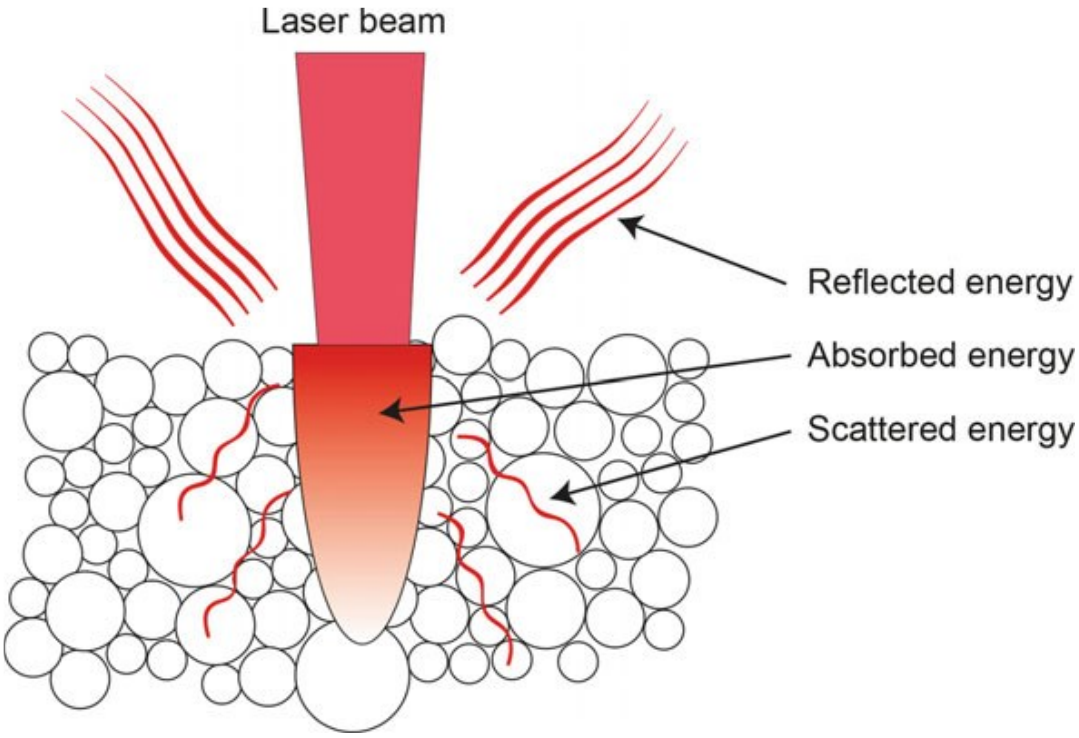
2-8 تسلسل عملية التصنيع بالإضافة المعدنية:

تبدأ عملية دمج البودرة المعدنية برش طبقة رقيقة من البودرة على صفيحة البناء واستخدام مصدر للطاقة لدمج البودرة وصهرها مع بعضها. تتكرر هذه العملية عدة مرات للحصول على المنتج النهائي كما يظهر في الشكل (2-12).



الشكل (2-12): تسلسل عملية التصنيع بالإضافة المعدنية[17]

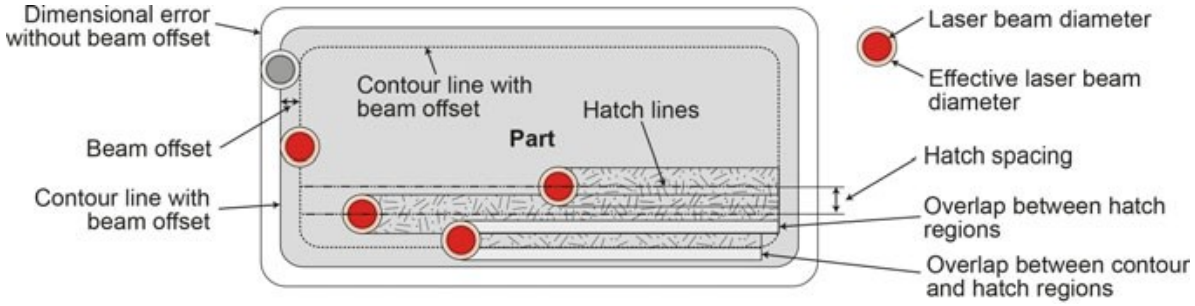
تمتلك الطاقة القادمة من شعاع الليزر أو من الشعاع الالكتروني القدرة على صهر البودرة مع بعضها، لكن ليس كل الطاقة تستهلك، حيث يتم امتصاص بعض الطاقة في البودرة وبعضها ينعكس وبعضها يتشتت كما هو موضح في الشكل (2-13).



الشكل (2-13): تأثير البودرة على امتصاص طاقة الشعاع [17]

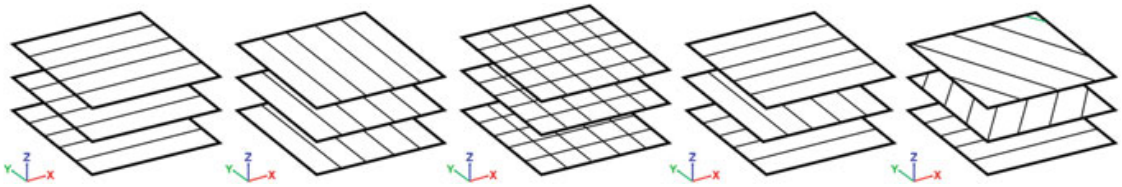
يوجد العديد من البارامترات التي يمكن لمشغل الآلة التحكم بها والتي تؤثر بشكل مباشر على جودة المنتجات. من هذه البارامترات تباعد شعاع المصدر الحراري والذي يضبط اثناء معايرة الآلة، وأيضاً تباعد خطوط الترسيب الذي يعتبر عامل حرج في انتاج المنتجات وجودتها وسرعة البناء. إذ يعد تباعد خطوط الترسيب من العوامل المؤثرة على الكثافة أو على مسامية المنتجات.

لا تسمح كل الآلات بالتحكم بكل البارامترات من قبل المستخدم. فالمصنع لتلك الآلات عزل بعض البارامترات ليسمح بتعديلها بعد دفع قيمة إضافية محددة وذلك بفتح نسخة برنامج التشغيل والسماح بالدخول لتعديل بارامترات الطباعة ويظهر الشكل (2-14) بارامترات الطابعة القابلة للتعديل.



الشكل (2-14): بارامترات الآلة القابلة للتعديل [17]

يوجد العديد من طرق المسح التي يمكن أن تستخدم للتقليل من الاجهادات والتشوهات في كل طبقة ويوجد أيضاً مصفوفات مختلفة للمسح تستخدم لتوجيه شعاع الطاقة والتي لها تأثير في تقليل الاجهادات المتبقية ويظهر الشكل (2-15) طرق المسح المختلفة.



الشكل (2-15): أمثلة على طرق المسح المختلفة لشعاع الطاقة [17]

2-8-1 كثافة الطاقة:

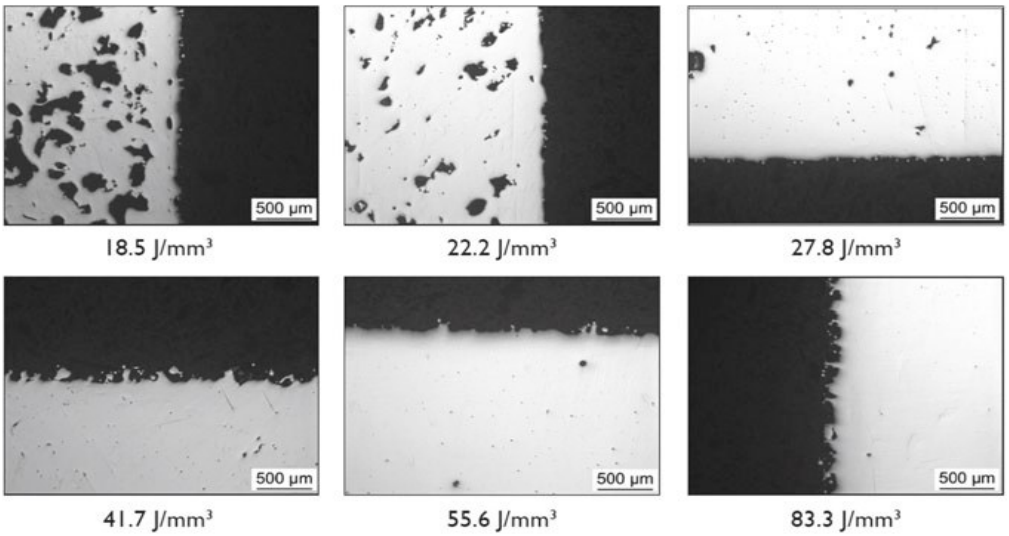
لصهر حبيبات البودرة للطبقة المصنعة والطبقة المصنعة قبلها نحتاج إلى شدة طاقة كافية كي يحدث ارتباط قوي بين الطبقات المتتابعة، وبذلك يتم تجنب حدوث ضعف في الصهر وتجنب وجود مسامية. أما زيادة طاقة الانصهار فتسبب في ذوبان المعدن وتشكل عيوب وتقل كثافة المادة.

يعد الحصول على كثافة طاقة مناسبة من الأمور الحساسة ويتم الحصول على كثافة طاقة الانصهار من العلاقة (2-1):

$$E = \frac{p}{v.h.t} \qquad (2\text{-}1) \quad [17]$$

حيث: E كثافة الطاقة، P الاستطاعة (w) ، V سرعة المسح (mm/s) ، h المسافة بين خطوط الترسيب (mm) ، t ثخانة الطبقة (mm). حيث يمكن للمستخدم تعديل تلك البارامترات.

كلما زادت كثافة الطاقة ازدادت كثافة المنتج لكن عند نقطة معينة تبدأ خشونة السطح بالازدياد مع استمرار زيادة كثافة الطاقة، وكلما ازدادت كثافة الطاقة نقصت المسامية بالقرب من السطح لكن الخشونة تصبح سيئة ويظهر الشكل (2-16) تأثير الطاقة على الخشونة[17].



الشكل (2-16): تأثير كثافة الطاقة على خشونة السطح [17]

2- 9 الاجهادات المتبقية:

الاجهادات المتبقية هي اجهادات تنشأ في المادة الصلبة أثناء الطباعة وتبقى بعد الانتهاء من الطباعة. يمكن أن تكون الاجهادات المتبقية كبيرة بشكل كافي مسببة إنحناء صفيحة البناء أو مسببة فصل المنتج من على صفيحة البناء أو مسببة تشقق المنتج كما يبينه الشكل (2-17). وفي بعض الأحيان يمكن أن تكون الاجهادات المتبقية غير سيئة أو مفيدة. هذا وإن إزالة مسبب الاجهادات المتبقية من التحديات التي يتصدى لها الباحثون للحصول على منتج جيد

باستخدام الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد، وقد تم استخدام مواد داعمة لتخفيف الاجهادات المتبقية وللتقليل من تركز الاجهاد، كما أن المعالجة الحرارية قبل إزالة المنتج من صفيحة البناء يمكن أن تخفف أو تزيل الاجهادات المتبقية.



الشكل (2-17): تأثير الاجهادات المتبقية على منتجات الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية[17]

يوجد عدة عوامل تسبب حدوث اجهادات متبقية نذكر منها:

1- تدرج الحرارة من السطح الى داخل المنتج المصنع بالطباعة المعدنية الثلاثية الابعاد خلال تبريده، أي أن مركز المنتج يبرد بشكل أبطئ من سطحه.

2- التشوهات اللدنة.

3- تغيرات البنية.

4- تسبب الحرارة المسلطة من الليزر على المنتج المصنع بالطباعة المعدنية ثلاثية الابعاد تمدد المركز إما من المعدن المنصهر أو من شكل مقاطع المنتج التي تبرد بغير انتظام، لأن بعض المناطق تبرد أكثر من مناطق أخرى مما يسبب اجهادات متبقية عند الانتهاء من تبريد المنتج.

2-9-1 إجراءات لتقليل من الاجهادات المتبقية:

يوجد العديد من التقنيات المستخدمة التي يمكن أن تقلل الاجهادات المتبقية مثل:

1- التخلص من المساحات الغير المتساوية الثخانة إذ تعد الكتل الضخمة من المواد مصدر للإجهادات المتبقية.

2- إمكانية تجنب التغيرات الفجائية في المقطع.

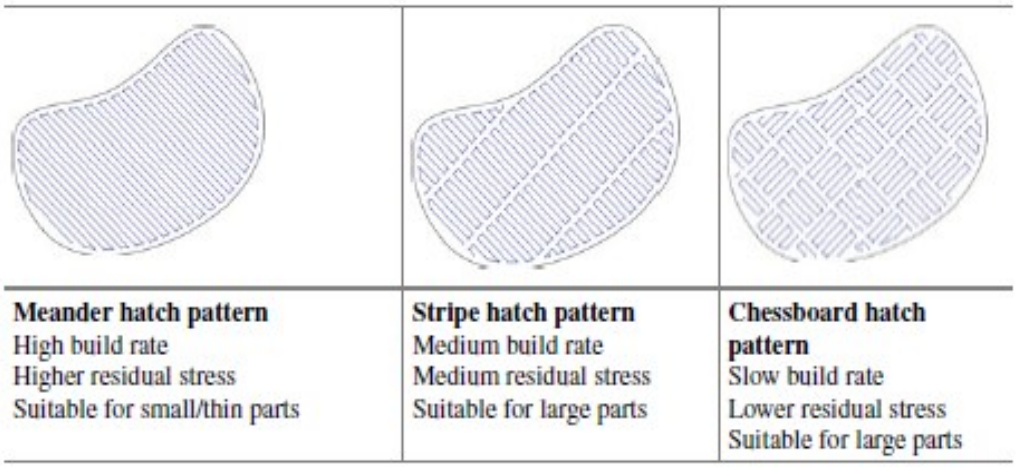
3- احماء صفيحة البناء بشكل مسبق.

4- تسخين حجرة البناء.

5- استخدام مصفوفات مسح شطرنجية بمسافات فاصلة صغيرة يقلل من الاجهادات المتبقية.

5- تدوير اتجاه المسح بزاوية 67 بين الطبقات.

ويظهر الشكل (2-18) أشكال مصفوفات المسح.



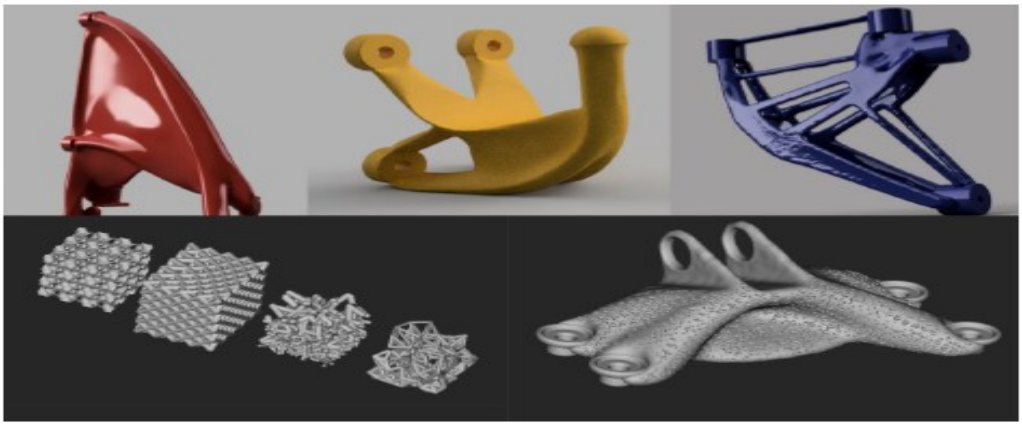
الشكل (2-18): بعض أشكال مصفوفات المسح[17]

2-10 الأمثلة:

تهدف الأمثلة الى تقليل الكتلة والانحراف والمطيلية، إذ تعرف المطيلية بأنها خاصية ميكانيكية للمادة تصف قدرتها على التشوه الدائم تحت تأثير قوى الشد دون أن تنكسر، في تطبيقات البنى الانشائية. إذ تعد الهياكل الشبكية والجوائز بشكل حرف I والأنابيب الحلقية أمثلة مسائل بسيطة في الأمثلة التقليدية يمكن حلها بشكل تحليلي بدون استخدام الحاسوب، لكن مع التطور السريع للإمكانيات الحاسوبية أصبح من الممكن تطبيق طرق أمثلة معقدة لنحصل على حلول أكثر أمثلة من حيث الشكل والكتلة دون أن نقلل من الحمولة المطلوب تطبيقها على تلك البنى الانشائية. من هذه الطرق هي الأمثلة الهيكلية والتي أصبحت جزءاً من البرامج الحاسوبية الهندسية، إذ يمكن استخدام الآلات المبرمجة في انتاج هياكل انشائية معقدة من الصعب الحصول عليها بطرق أخرى [22]. لأنه يستحيل تصنيع البنى الانشائية الناتجة عن الأمثلة الهيكلية بطرق التصنيع التقليدية كالسباكة والتشكيل والتشغيل. لكن يمكن تصنيعها بطرق التصنيع الرقمي بالإضافة، وبسب الانتشار الواسع لهذه الطريقة أصبح من الممكن تطبيق طرق أمثلة متقدمة على البنى الانشائية بمختلف التطبيقات الهندسية.

إحدى طرائق الأمثلة الحديثة هي استخدام البنى الانشائية الخلوية والتي من خلالها يمكننا أن نحصل على بنى انشائية خفيفة الوزن، والتي يتم فيها استبدال المادة الصلبة المصمتة ببنى خلوية تقلل من كتلة الجسم المصمم، إذ تملأ الخلايا الفراغات داخل البنية الصلبة، هذه الخلايا ممكن أن تكون عشوائية أو تكون منتظمة، ويتم ذلك عن طريق إزالة المادة الداخلية المصمتة واستبدالها ببنى خلوية (تحوي فراغات). هنا يمكن التحكم بمتغيرات البنى الخلوية للحصول على أفضل أداء، فمثلاً يمكن التحكم بثخانة الطبقة الخلوية عن طريق استخدام حقل الاجهادات الذي يتم حسابه باستخدام طريقة العناصر المنتهية واضافة مادة في أماكن الاجهادات العالية وإزالة مادة في أماكن الاجهادات المنخفضة، فاتجاه الخلايا يؤثر على رد فعل البنية الخلوية وعلى مقدار القوى التي يمكن تحملها أيضاً، كما يمكن أن يؤدي ذلك الى زيادة أو تقليل من صلابة المادة. ويمكن تصنيع البنى الخلوية المعقدة باستخدام طرق التصنيع بالإضافة [22].

بدمج الأمثلة الهيكلية والخلوية وطرق التصنيع بالإضافة يمكننا انتاج أجزاء هندسية مؤمثلة تستطيع تحمل المتطلبات الإنشائية للقطعة المصممة، وهذ الأمر يستثمر في تطبيقات متنوعة منها النقل والفضاء حيث تقليل الوزن يقلل من الطاقة المستهلكة ويزيد من أداء المركبات ويظهر الشكل (2-19) بعض النماذج المصنعة بعد تطبيق الأمثلة الهيكلية والخلوية.

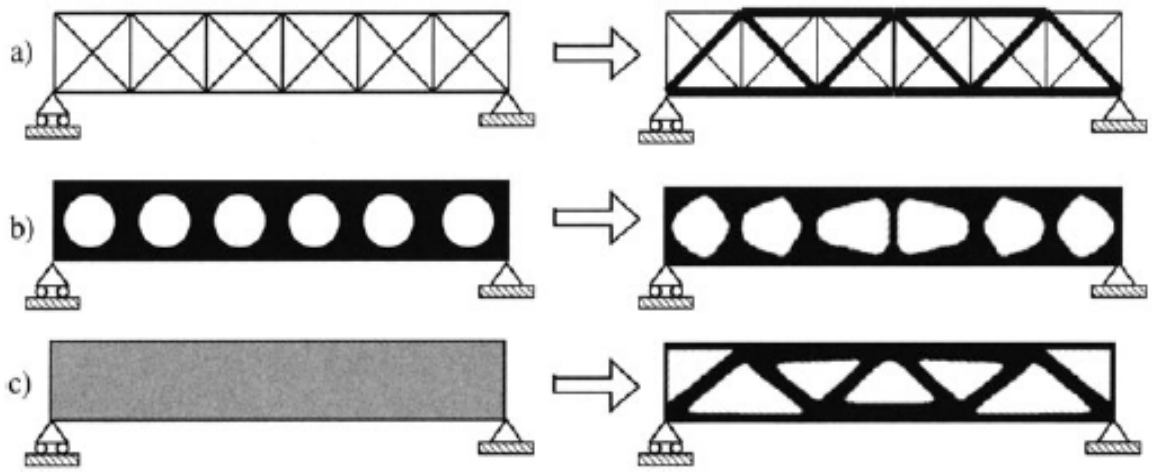


الشكل (2-19): نماذج مصنعة عن طريق دمج الأمثلة الهيكلية والخلوية مع تقنية التصنيع بالإضافة [22]

تقسم مسائل أمثلة تصميم البنى الانشائية الى ثلاث أنواع وهي: أمثلة الحجم size optimization – أمثلة الشكل shape optimization والأمثلة الهيكلية Structural optimization.

الهدف الرئيس في مسائل أمثلة الحجم هو إيجاد الثخانة المثلى لمسائل الصفائح المرنة الخطية أو إيجاد المساحة المثلى للمقطع العرضي في مسائل الهياكل الشبكية، إذ تؤدي الثخانة المثلى الى تصغير أو تكبير في أحد المقادير الفيزيائية مثل المطيلية أو الاجهاد الأعظمي أو الانحراف ... إلخ. حيث يكون متغير التصميم هو ثخانة الصفيحة ومتغير الحالة هو الانحراف مثلاً. الميزة الأساسية في مسائل الأمثلة الحجمية هو أن مجال التصميم ومتغيرات الحالة تكون ثابتة.

بالمقابل يكون الهدف الأساس في مسائل أمثلة الشكل هو إيجاد الشكل الأمثل للتصميم كما يبين الشكل (2−20)، إذ يكون مجال التصميم هو متغير أبعاد التصميم. أما الأمثلة الهيكلية تعرف على أنها طريقة رياضية لإيجاد التوزع الأمثل للمادة من أجل مجموعة من القيود وهي القوى والشروط الحدية [20].



الشكل (2−20): أنواع مسائل الأمثلة الثلاث a) الأمثلة الحجمية. b) الأمثلة الشكلية. c) الأمثلة الهيكلية[20]

2−11 تعريف معادلة الأمثلة الهيكلية ومتغيرات التصميم:

طريقة الأمثلة الهيكلية طريقة تكرارية، حيث تحل مسألة الأمثلة عن طريق تقسيم مجال التصميم باستخدام طريقة العناصر المنتهية. فأول من أوجد هذه الطريقة هما العالمان Bendsøe & Kikuchi عام 1988.

تتألف مسألة الأمثلة الهيكلية من تابع هدف وهو تصغير تابع المطيلية للجسم الصلب الخاضع لقوة وذلك ضمن قيد حجم المادة المستخدمة [20].

$$\text{Min}_x : c(x) = U^T K U = \sum_{e=1}^{N} u_{e=1}^{T} k_e u_e = \sum_{e=1}^{N} x_e \, u_e^T k_l u_e \quad (2\text{-}2)$$

يخضع لقوة $F=KU$ (2-3)

متغيرات التصميم $\boldsymbol{\rho}_i \in [0,1]$ (2−4)

قيد الحجم $g=\sum_i \rho_i - v_0 \leq 0$ (2-5) [20]

C(x) : تابع الهدف وهو تابع المطيلية.

F و U: شعاع القوة وشعاع الازاحة الكلي.

K :شعاع الصلابة الكلي.

u_e و k_e : شعاع الازاحة والصلابة العنصري.

x_e: شعاع كثافة المادة العنصري.

K_l: مصفوفة صلابة العنصر الصلب.

N: عدد عناصر مجال التصميم.

تسعى طريقة الأمثلة الهيكلية الى تشكيل مجال مركب من نوعين أو أكثر من مواد ذات خواص مرنة مختلفة، إذ تكون احدى هذه المواد بخواص مرنة منخفضة وتمثل الفراغات، والأخرى بخواص مرنة عالية وتمثل المادة الصلبة. في هذه الصيغة الأمثلية تقوم طريقة الأمثلة الهيكلية بنشر نقاط متناهية في الصغر بين مختلف المواد ضمن مجال التصميم، لكن ضمن المجال المستمر بالطرق التقليدية يكاد يكون مستحيلاً، لذا تستخدم لحل هذه المسألة طريقة العناصر المنتهية [20].

طريقة العناصر المنتهية تتم بتقسيم مجال التصميم وتوزع كثافة المادة بين 0 و1 والتي تربط لكل عنصر حيث يمثل 1 وجود المادة أما 0 يمثل وجود الفراغ، والعناصر التي تحمل قيم متوسطة تكون عبارة عن مزيج بين خواص هاتين المادتين. وبما أن تشكيل مجال مستمر يتألف من قيم متدرجة لكثافة المادة يعتبر مسألة إشكالية لذا تسعى طريقة الأمثلة الهيكلية الى ربط كل عنصر في مجال التصميم بأحد قيمتين إما 1 أو قيمة 0 علماً بأنه يوجد عدة خوارزميات هدفها جعل العناصر ذات القيمة المتوسطة تأخذ إما القيمة 1 أو القيمة 0 قسرياً، أحد تلك الخوارزميات تدعى بطريقة المادة الصلبة المتجانسة قسرياً Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) (SIMP)

تابع (SIMP) هو تابع أسي، فيه يحسب معامل المرونة للعنصر j بالعلاقة (2-6):

$$E_{p(xj)} = E0 + x_j^p \Delta E \qquad (2\text{-}6)\ [20]$$

حيث E_p معامل المرونة (معامل يونغ) للعنصر j ، E_o معامل المرونة للفراغات، x_j تابع الكثافة للعنصر j .

$$\Delta E = E_1 - E_0 \qquad (2\text{-}7) \quad [20]$$

وبما أن قيم x_j تكون ضمن المجال (0،1)، وقيمة الأس p يجب أن تختار $p>1$ مما سيقلل من قيمة صلابة أجزاء المادة التي لها قيم كثافات متوسطة في تابع الكثافة [20].

يتم حساب الأس p وفق المعادلتين:

$$p \geq \max\left\{\frac{2}{1-\upsilon^o}, \frac{4}{1-\upsilon^o}\right\} \quad \text{(in-2D)} \qquad (2\text{-}8)\ [20]$$

$$p \geq \max\left\{15\frac{1-\upsilon^o}{7-5\upsilon^o}, \frac{3}{2}\frac{1-\upsilon^o}{1-2\upsilon^o}\right\} \quad \text{(in-3D)} \qquad (2\text{-}9)\ [20]$$

حيث υ^o: معامل بواسون

2-12 خطوات تطبيق خوارزمية الأمثلة الهيكلية:

البرامج التي تحل خوارزمية الأمثلة الهيكلية تستخدم عادة نفس الخطوات التالية:

2-12-1الخطوة الأولى: تعريف مجال التصميم (Ω) والشروط الحدية:

تبدأ مسألة الأمثلة الهيكلية بتعريف مجال التصميم (Ω) والذي يمكن أن يتضمن ثقوب أو تجاويف (أي الأماكن التي لا تحتوي مادة) ، إلى جانب أماكن تحتوي على مادة بشكل قسري للسماح مثلاً باتصال الأجزاء مع بعضها. يمكن تمثيل مجال التصميم بطرق مختلفة كنموذج CAD – شبكة – مجموعة نقاط ... إلخ.

إن تعريف الشروط الحدية ضروري لإيجاد الحل، وأيضاً يجب تعريف الأحمال الميكانيكية الازاحات والأحمال الحرارية والقوى التي تؤثر على النموذج. وممكن أن تكون المسألة لقوة وحيدة أو عدة قوى أو عدة حالات تحميل، إذ تؤثر أحمال مختلفة على البنية الانشائية بشكل معتمد على بعض ويجب أن يكون مجال التصميم مقيد لحركة الجسم الصلب حتى أخر نقطة فيه[22].

2-12-2 الخطوة الثانية: تقسيم مجال التصميم:

تتطلب مسألة الأمثلة الهيكلية تقسيم مساحة التصميم والذي يمكن تنفيذه باستخدام طريقة العناصر المنتهية. يجب ان تكون العناصر صغيرة بشكل نسبي للحصول على حل أدق، حيث نوع العناصر المنتهية المستخدم يؤثر على نتيجة الحل وخاصة العناصر المثلثية الكبيرة والتي تعطي قيم صلابة غير منطقية [22].

2-12-3 الخطوة الثالثة: ضبط الشروط الابتدائية:

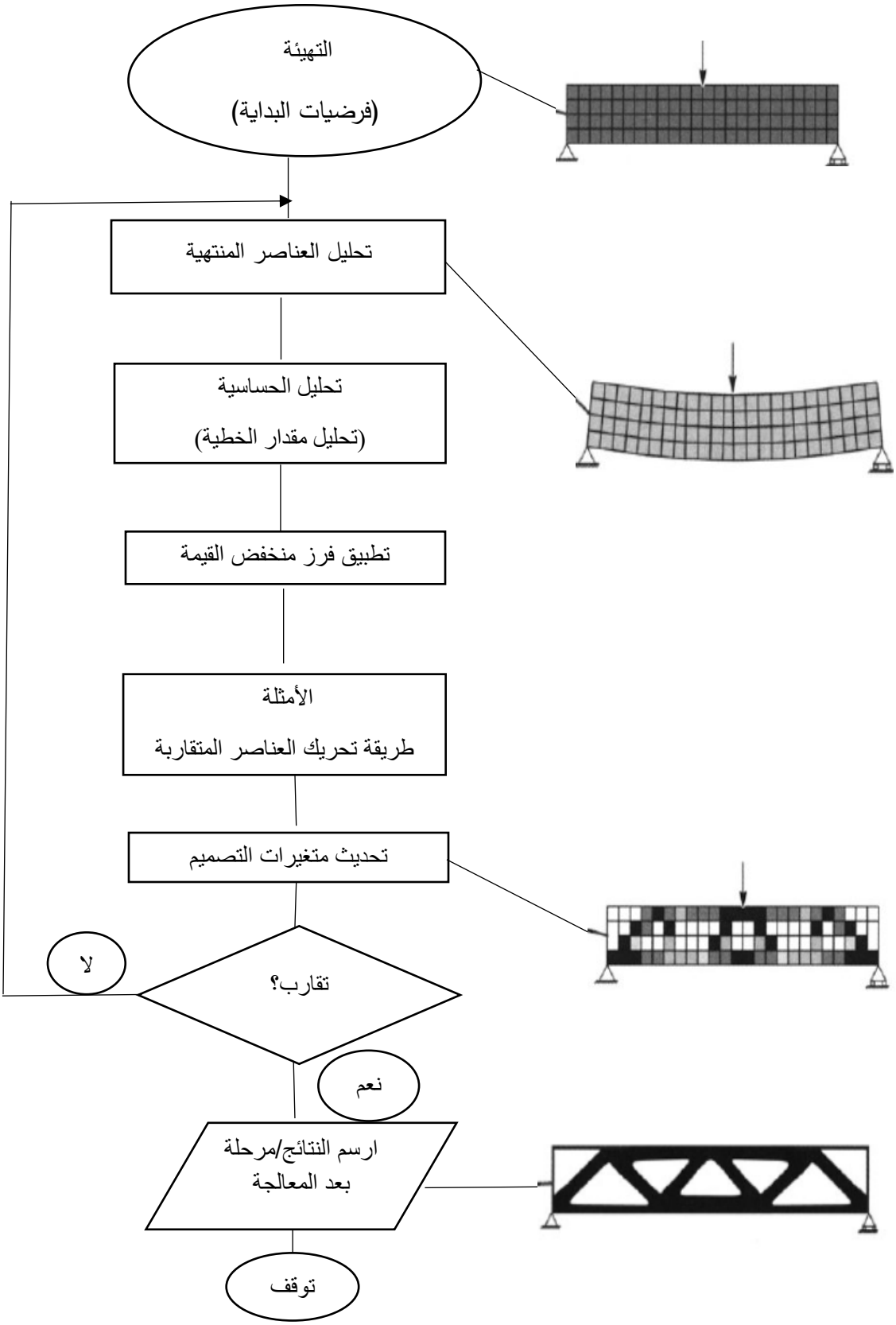
تبدأ خوارزمية SIMP بإعطاء كل العناصر قيمة ابتدائية ثابتة مثلاً تعطى كل العناصر قيمة كثافة تساوي 0.5 في حال كان هدف الخوارزمية تقليل الحجم الى 0.5 وبناء عليه فان خواص المادة لمساحة التصميم المقسم الى شبكة

عناصر منتهية تعدل. بمعنى تقليل الحجم الى 0.5 سوف يقلل من صلابة المادة أو ممكن أن يزيدها حسب مخطط الخوارزمية وبناءً عليه تربط طريقة العناصر المنتهية مجال التصميم المقسم بالخواص المعدلة [22].

وحسب تابع الهدف تعدل خواص كل عنصر بناءً على نتيجة تحليل العناصر المنتهية، فمثلاً العناصر التي عليها اجهاد عالي يتم إضافة مادة لها والعناصر التي عليها اجهاد منخفض يزال منها المادة وبعدها تعدل خواص المادة لكل عنصر ويجرى تحليل العناصر المنتهية من جديد[22].

2-12-4 الخطوة الرابعة: معالجة نتائج الأمثلة الهيكلية:

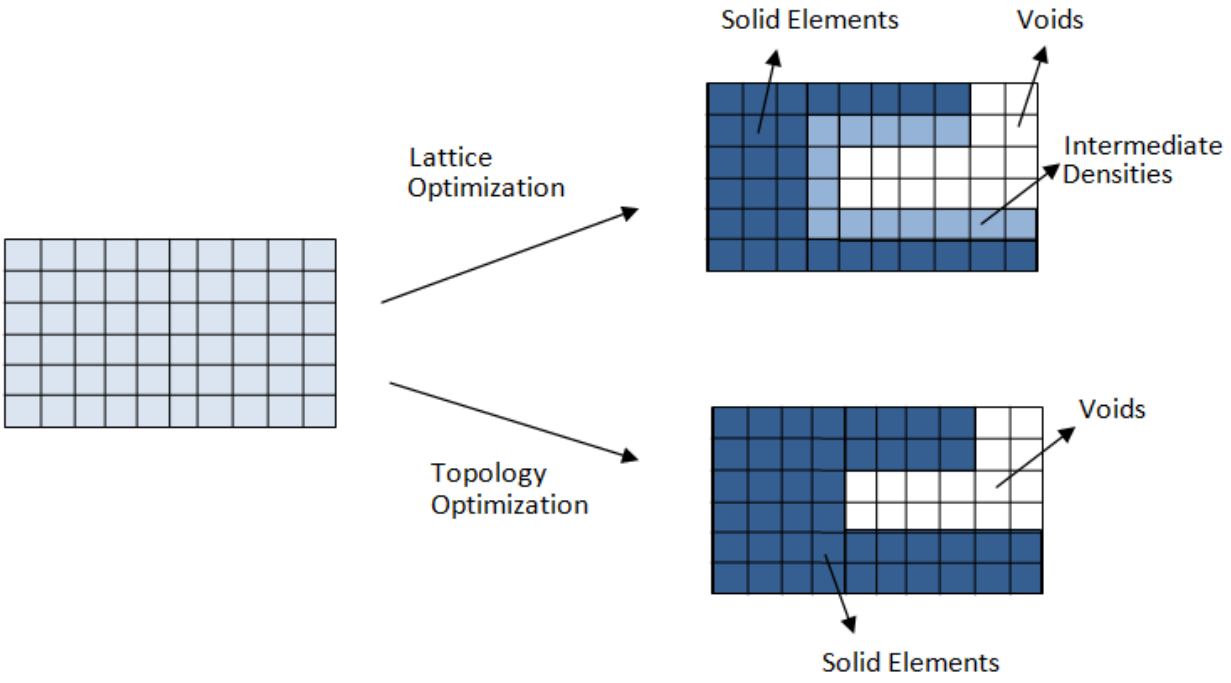
بسبب أن الخوارزمية تحسب الكثافة لكل عنصر في مساحة التصميم، فإن نتيجة الحل سيكون لها نفس الدقة ونفس حواف الشبكة المقسمة، لذلك فإن تصفية وتنعيم الحواف للنموذج الناتج من التقنيات المستخدمة تتم في مرحلة ما بعد المعالجة[22] ويبين الشكل (2-21)المخطط التدفقي لطريقة حل الأمثلة الهيكلية .



الشكل (2-21): المخطط التدفقي لطريقة حل الأمثلة الهيكلية باستخدام طريقة العناصر المنتهية.[20]

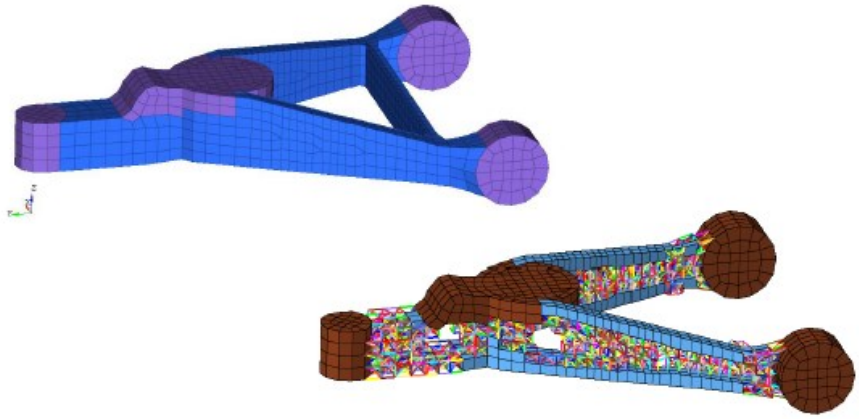
2-13 الأمثلة الخلوية:

الهدف الرئيس من تطبيق تقنية الأمثلة الخلوية هو استبدال العناصر ذات الكثافات المتوسطة، والتي تنتج من مسائل الأمثلة الهيكلية التقليدية، ببنى خلوية. كل العناصر المنتهية ذات الكثافات التي تقع ضمن حدود 0 و1 صالحة لعملية الاستبدال وبالتالي الحصول على حل أدق من الحل الناتج من عملية الأمثلة الهيكلية التقليدية التي تحول كثافات العناصر اما 0 أو 1 كما يظهر في الشكل (2-22) [41] .



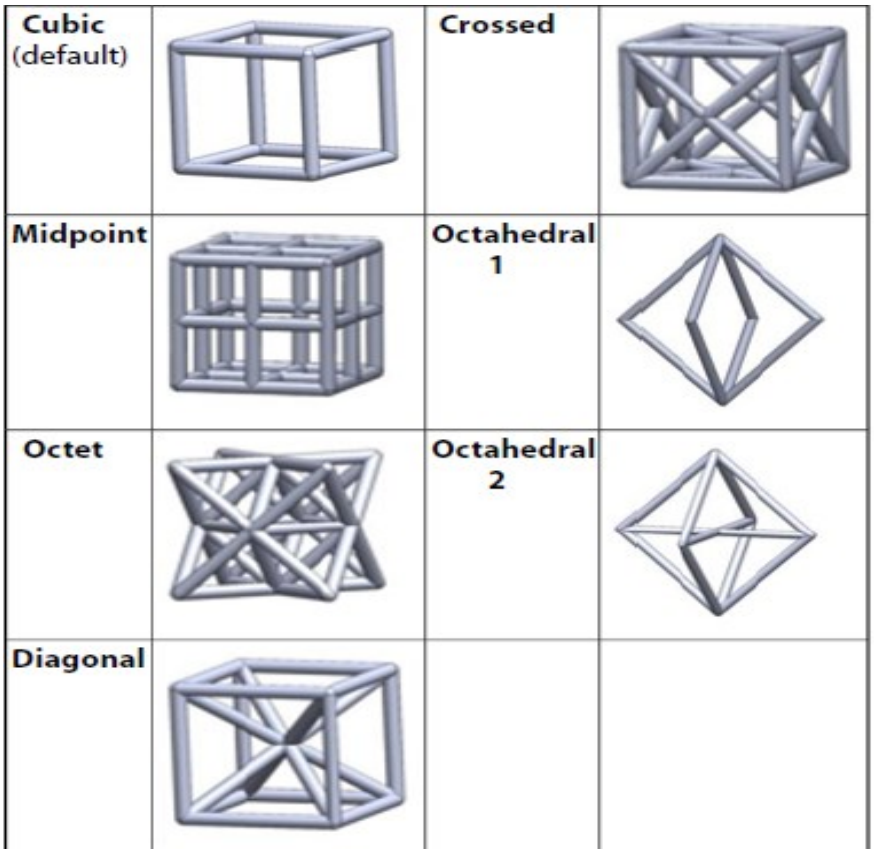
الشكل (2-22): مقارنة بين مسائل الأمثلة الهيكلية والخلوية[41].

خطوات تطبيق الأمثلة الخلوية لها نفس خطوات الأمثلة الطوبولوجية وهي تحديد مساحة التصميم وتحديد أماكن الشروط الحدية التي تستبعد من المسألة الشكل (2-23).



الشكل (2-23): مثال على تطبيق الأمثلة الخلوية[41]

وفي مساحة التصميم يتم استخدام الأشكال الخلوية التالية في الشكل (2-24):



الشكل (2-24): أشكال الخلايا في برنامج ansys workbench [44]

14-2 استخدام طريقة العناصر المنتهية في نمذجة التصنيع بالإضافة:

ظهر تطبيق نمذجة العناصر المنتهية في حساب التشوهات والاجهادات المتبقية في التصنيع بالإضافة بعد اجراء أبحاث كثيرة في مجال اللحام متعدد المسارات. إذ إن هذه العملية تشبه طريقة التصنيع بالإضافة من جهة الحاجة الى مصدر حراري لإذابة المادة في القطعة المشغلة، ومن ثم تبريدها لتتصلب. في هذه التقنية يسبب التدرج الحراري تشوهات واجهادات غير مرغوب بها، واستخدام طريقة العناصر المنتهية لمحاكاة عملية التصنيع بالإضافة يعطي مشاكل أخرى، إذ تؤدي إضافة المادة خلال عملية الترسيب وزيادة عدد المسارات الى زيادة تعقيد النموذج وزيادة زمن الإنجاز[23].

بسبب قدرة طريقة العناصر المنتهية على معالجة المسائل غير الخطية، فقد كثر استخدامها كطريقة عددية مفضلة. وأنتجت معظم البرامج التجارية التي تعتمد على طريقة العناصر المنتهية نماذج خاصة لنمذجة التصنيع بالإضافة، أو بناء توابع قادرة على محاكاة طرق مختلفة لتحليل السلوك الحراري الميكانيكي وحساب اجهادات وتشوهات البنية المجهرية للأجزاء المطبوعة ومن هذه الطرق:

1- نموذج Goldak أو طريقة Gauss لتعريف المصدر الحراري مع الحل ضمن المستوى الميكروي.

2- طريقة شبكة العناصر المنتهية التكيفية في تقريب المصدر الحراري.

3- نمذجة متعددة المستويات مع استيراد نتائج المستوي الميكروي لشبكة عناصر منتهية خشنة للأشكال الهندسية الثلاثية الابعاد المعقدة.

4- طريقة الطبقات الإضافية لترسيب المادة مع عقدة منفردة متحركة سطحية لتمثيل التدفق الحراري.

مع زيادة تبسيط إجراءات المحاكاة، يمكن تقليل زمن حساب عملية الطباعة الثلاثية الأبعاد للأشكال المعقدة بالمقارنة مع الزمن الحقيقي اللازم لعميلة الطباعة. يقوم مجموعة من الباحثين بمقارنة مدى فاعلية النتائج الحاسوبية ودقة النتائج لهذه الطرق المبسطة مع نتائج حل شبكة العناصر المنتهية الناعمة لاتزال تلك الأبحاث قيد الدراسة.

طبق العديد من الصيغ والنماذج الرياضة والفيزيائية لطريقة التصنيع بالإضافة مع المعادلات الأساسية لطريقة العناصر المنتهية في حزم البرامج التجارية والتي ستناقش في الفقرات التالية [23].

2-15 المحاكاة الحرارية- الميكانيكية:

يستخدم التحليل الحراري الميكانيكي عند شروط محددة بدقة بالنسبة للوقت والمساحة بالإضافة الى التحكم بالدقة على كامل الحل، وتعتبر هذه الطريقة موثوقة أكثر من التحليل الميكانيكي الصافي الذي يحتاج الى زمن حساب أكبر.

يستخدم في جميع الأدبيات التحليل الحراري الميكانيكي في نمذجة عملة التصنيع بالإضافة، حيث يمكن تقسيم هذه عملية الى مرحلتين:

1- اجراء تحليل حراري صافي أو تحليل انتقال حراري للحصول على درجة حرارة العقد في النموذج الأساسي لمعادلة العناصر المنتهية.

2- الحصول على تركيبة انشائية تمثل الاستجابات الميكانيكية في معادلة العناصر المنتهية عند تطبيق درجات حرارة العقد وبالتالي الحصول على التشوهات والاجهادات المتبقية في الجزء المصنع.

تعرف طريقة اجراء التحليل الحراري مع التحليل الانشائي بالتحليل الحراري الميكانيكي الكامل الارتباط، أما إن تم تمثيل التحليل الميكانيكي بعد استنتاج التحليل الحراري فتعرف هذه الطريقة بالصيغة الضعيفة. إذ نقوم في هذه الصيغة بالحساب الانشائي بعد كل مرحلة تحليل حراري، وهذا يعني أن الشكل الهندسي يتعدل عند كل خطوة زمنية، فتؤثر ازاحته على الحقل الحراري للقطعة المشغلة. أما عند نمذجة القطعة المشغلة بإجراء تحليل حراري كامل يسبق أي تحليل انشائي فهذا يعني ان الحقل الحراري لا يتأثر بالاستجابة الميكانيكية للمنتج. بسبب قلة زمن الحساب وأداءها المناسب تستخدم الصيغة الضعيفة لمحاكاة السلوك الحراري – الميكانيكي في معظم حزم برامج المحاكاة التجارية.

يعتمد تحليل انتقال الحرارة على مبدأ امتصاص الطاقة للجسم ويعبر عنه بالمعادلة التالية [10]:

$$Q(X , t) - \boldsymbol{\rho} C_p \frac{dT}{dt} + \nabla[K(T)\nabla T] = 0 \qquad (2-10) \qquad [10]$$

حيث تمثل X جملة الاحداثيات المحلية، t تمثل الزمن، Q تمثل مصدر حرارة الجسم، $\boldsymbol{\rho}$ كثافة المادة، C_p الحرارة النوعية للمادة، K الموصلية الحرارية وTدرجة الحرارة. يمكن الحصول على درجة حرارة العقد من خلال الحل العددي لهذه المعادلة الخاصة بالجسم المعطى تحت شروط حدية محددة، ومن ثم تضاف درجات حرارة العقد الى التحليل الانشائي كحمل حراري. تتضمن الشروط الحدية للتحليل الحراري التوصيل والحمل والاشعاع المرتبطة بالمصدر الحراري للجسم.

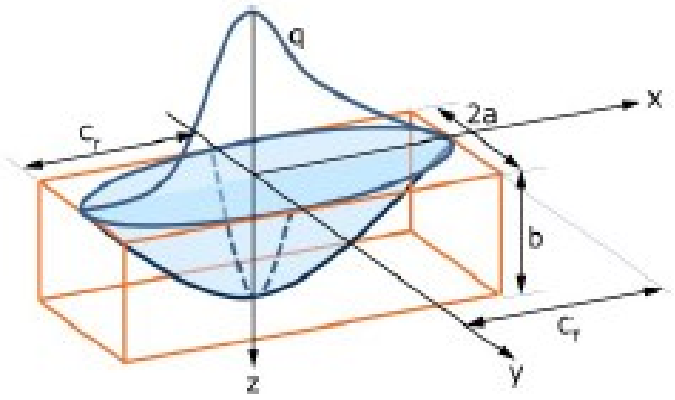
يجب إضافة كل خصائص الليزر مثل السرعة، الاتجاه، الصيغة والأداء في نموذج المصدر الحراري.

لقد قام العالم Yan باختبار ثلاث نماذج لتوزع التدفق الحراري للجسم وهي : 3D super – Gaussian و 3D Gaussian و الشعاع المنعكس 3D Gaussian. حسب العالم فإن نموذج حزمة super − Gaussian مع طاقة ليزر عالية و نموذج حزمة 3D Gaussian وحزمة Gaussian المنعكسة مع طاقة ليزر منخفضة يمكن أن تقلل الاجهادات المتبقية.

يستخدم نموذج Goldak في معظم دراسات التصنيع بالإضافة لتمثيل الطاقة الحرارية القادمة للجسم ويعبر عنه بالمعادلة(2 − 10) [10] :

$$Q=\frac{6\sqrt{3\eta}Pf}{\pi\sqrt{\pi}abc}\exp\left(-3\frac{x^2}{a^2}-3\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{c^2}\right) \qquad (2-11) \qquad [10]$$

حيث P طاقة الليزر، η معامل الامتصاص، f نسبة الوزن و a,b,c أبعاد القطع الناقص وعمق ومساحة منطقة الانصهار والممثلة بالشكل(2−25):



الشكل (2-25): شكل معادلة Goldak لتوزع الطاقة من مصدر الليزر[10]

يستخدم قانون Stefan_Boltzman لحساب الاشعاع الحراري q_{rad}:

$$Q_{rad}= \xi\sigma_b(T_s^4 - T_{env}^4) \qquad (2\text{-}12) \quad [10]$$

حيث ξ انبعاث السطح، σ_b ثابت Stefan_Boltzman، T_s حرارة السطح، T_{env} الحرارة المحيطة.

يعبر عن الضياع الحراري بالمعادلة:

$$Q_{conv} = h(T_s\text{-}T_{env}) \qquad (2\text{-}13) \quad [10]$$

حيث h معامل انتقال الحرارة بالتوصيل.

يعتمد النموذج الميكانيكي على موازنة ميكانيك الأوساط المستمرة مع النموذج الأساسي للسلوك المرن باستخدام قانون هوك والسلوك اللدن من خلال الخواص الكينماتيكية والموحدة لمادة البناء:

$$\nabla.\sigma = 0 \qquad (2-14) \quad [23]$$

$$\sigma=C(\varepsilon\text{-}\varepsilon^p - \varepsilon^T) \qquad (2-15) \quad [23]$$

حيث σ الاجهاد، C مصفوفة الصلابة المرنة من الدرجة الرابعة، ε^T , ε^p ,ε أشعة الانفعال الحراري واللدن والكلي على التسلسل. يتم حساب الاجهادات المتبقية والتشوهات بتطبيق الشروط الحدية على نموذج العناصر المنتهية، وللحصول على محاكاة منطقية للعملية يجب تعريف خواص المادة الحرارية والميكانيكية معاً [23].

2-16 الانفعال الكامن:

الى جانب طريقة شبكة العناصر المنتهية التكيفية المستخدمة حديثا، استخدم بعض الباحثين مفهوم الانفعال الكامن، حيث طور (Udea et al) طريقة الانفعال الكامن لتسريع عملية حساب التشوهات في البنى الانشائية الملحومة، والتي تعتمد على حقيقة أن الانفعال الكامن يسبب عدم ترابط في البنى الانشائية الملحومة ويؤدي الى التشوه. وحتى يمكن حساب الاجهادات المتبقية باستخدام شعاع الانفعال اللدن ضمن طريقة العناصر المنتهية، طور الباحث Ueda مجموعة من المعادلات.

$$\mathrm{f} = \int_v B^T D_{\varepsilon_{inh}} dV \qquad (2-16)\ [23]$$

$$\mathrm{U} = K^{-1} f \qquad (2-17)\ [23]$$

$$\varepsilon_{tot} = BU \qquad (2-18)\ [23]$$

$$\varepsilon_e = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{inh} \qquad (2-19)\ [23]$$

$$\sigma = D\varepsilon_e \qquad (2-20)\ [23]$$

حيث f اشعة القوى في العقد، B مصفوفة التشوه، D المصفوفة الأساسية، u شعاع الازاحة، k مصفوفة الصلابة، σ شعاع اجهادات العقد و ε_{tot} , ε_{inh} , ε_e تمثل الانفعال الكلي والكامن والمرن على الترتيب.

تم إيجاد طريقة ثانية لتطبيق تحليل الانفعال الكامن من خلال إيجاد مفهوم عامل قياس الانفعال (SSF) والذي يساعد على تسهيل وتسريع المحاكاة، بافتراض أن الانفعال المرن القياسي في العقد يعرف بالعلاقة[47]:

$$\varepsilon_{\mathrm{inh}} = \mathrm{SSf}\frac{\sigma_{\mathrm{ys}}}{\mathrm{E}} \qquad (2-20)\ [47]$$

أول من استخدم مفهوم الانفعال الكامن هما Keller و Ploshikhin وذلك لحساب التشوهات في الأجزاء المصنعة بالإضافة. حيث اقترح العالمان مفهوم الطبقة الميكانيكية المكافئة، وذلك بتقسيم النموذج الى ثلاث مستويات (ميكروي،

ماكروي، ووسطي). يمكن اجراء تحليل حراري صافي باستخدام النموذج الحقيقي للمصدر الحراري وتطبيق الشروط الحدية الحرارية على جزء صغير من النموذج بالقرب من القاعدة والذي يعادل الطبقات المنخفضة بالحجم الحقيقي. يتم التعبير عن الحرارة المحسوبة بالعقد كمصادر حرارية صغيرة الحجم وهي ناتجة عن تحليل النموذج بالمستوي الميكروي، ومن ثم تطبق المصادر الحرارية الصغيرة في المستوي الوسطي لنموذج حساب التحليل الحراري الميكانيكي كامل الارتباط مع الاخذ بالحسبان مختلف طرق المسح باستخدام الليزر. وكنتيجة لذلك يتم إزالة مركبة نموذج الانفعال المرن من المعادلات بعد أن يتم حساب معامل التمدد الحراري غير المتناظر في مركبة الانفعال المرن وتضاف الى النموذج الحراري المرن في المستوي الماكروي، مع درجة الحرارة التي تزداد بكامل الطبقات حتى تتوحد. ونتيجة لذلك يتم حساب التشوه في المستوي الماكروي والذي تمثل تشوهات الجزء المصنع بأبعاده الحقيقية.

تفترض الطريقة السابقة أن توزع الانفعال اللدن متساوي في كل اجزاء الجزء المصنع، لكن في الحقيقة هو يتغير حسب حجم الجزء ودرجة تعقيده. العيب الأساسي لهذه الطريقة هو أنه لا يمكن الاخذ بالحسبان تأثير مسارات الليزر المختلفة وتأثير الشكل الهندسي للقطعة، بسبب أن طريقة الانفعال الكامن تفترض ان الانفعال موحد بكل الحجم. تستخدم طريقة الانفعال الكامن في طرق نمذجة LPBF و DED و DMD للطباعة [23].

الفصل الثالث

الدراسة العملية والنتائج

3- مراحل الدراسة

ستتم الدراسة على ثلاث مراحل:

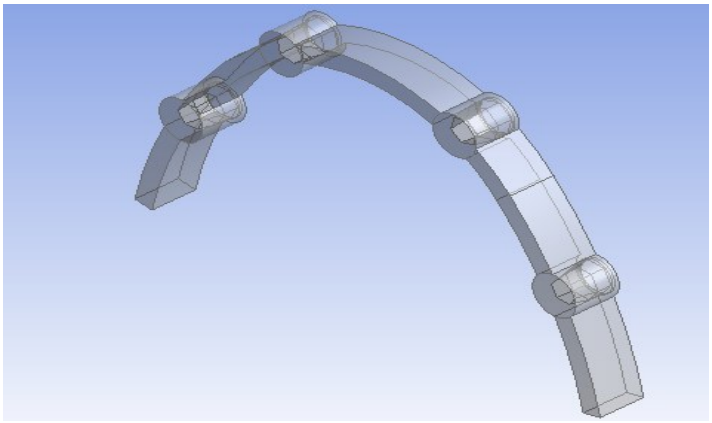
1- الأمثلة الهندسية للمنتج.

2- اتجاه البناء الأمثل للطباعة.

3- دراسة بنية المادة.

3-1 مرحلة الأمثلة الهندسية للمنتج:

تم اختيار عينة الدراسة للبحث مشابها للدراسات المرجعية ومأخوذة من قياسات حقيقية لمريض يعاني من فقد كامل لأسنان الفك السفلي، وهي عبارة عن جسر ثابت حامل للزرعات الشكل (3-1) تم تصميمه باستخدام برنامج Solidworks2020 بأبعاد: 6 mm ارتفاع وعرض 5 mm وبطول 10 mm لكل جناح تعويض.

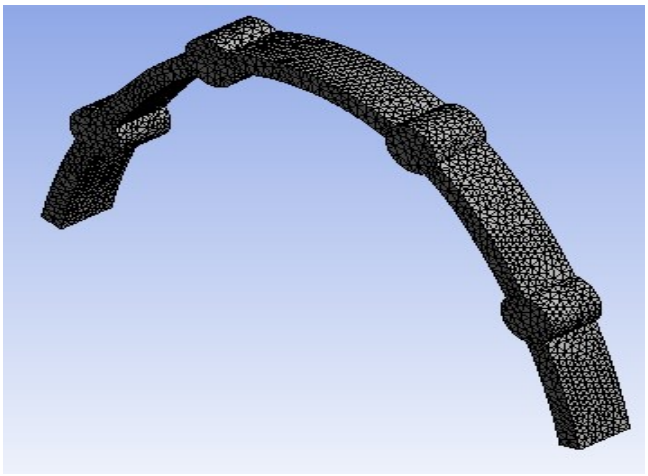


الشكل (3-1): عينة الدراسة

بعد ذلك تم استيراد النموذج الهندسي للهيكل الى برنامج Ansys workbench2022R1 واجراء تحليل ستاتيكي وفق الخطوات التالية:

1- تعريف مادة الهيكل التعويضي: وهي خليطة Ti_6Al_4V معرفة ضمن مكتبة مواد التصنيع بالإضافة في برنامج Ansys ولها معامل يونغ E=102 Gpa ومعامل بواسون υ=0.35 .

2- تقسيم الهيكل الى شبكة عناصر منتهية: حيث تم استخدام عناصر منتهية من نوع tetrahedron وبلغ عدد العناصر 18781 عنصر وعدد العقد 32975 عقدة كما يظهر في الشكل (3-2).



الشكل (3-2) شبكة العناصر المنتهية.

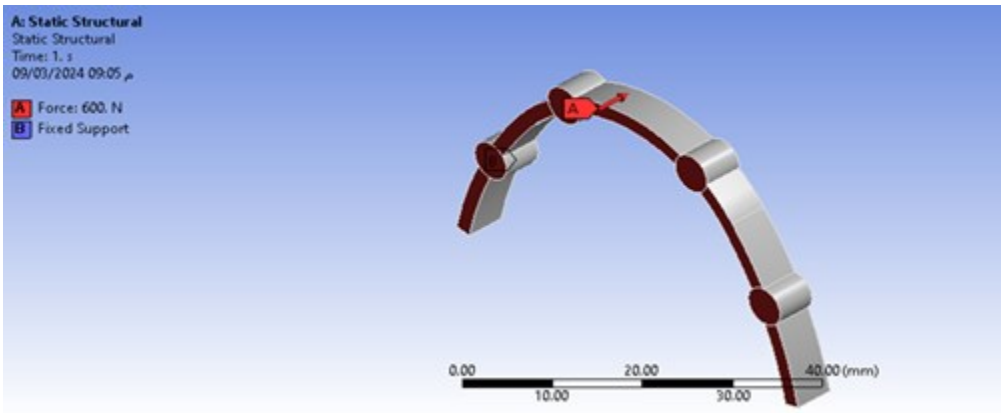
3- تطبيق الشروط الحدية: تمت محاكاة قوى العض لحالة الاطباق الكامل وهي تعبر عن الحالة الحرجة والتي تكافئ تطبيق قوة مقدارها 600N (park et el 2019) وفق ثلاث افتراضات:

a- الافتراض الأول: القوة موزعة على السطح.

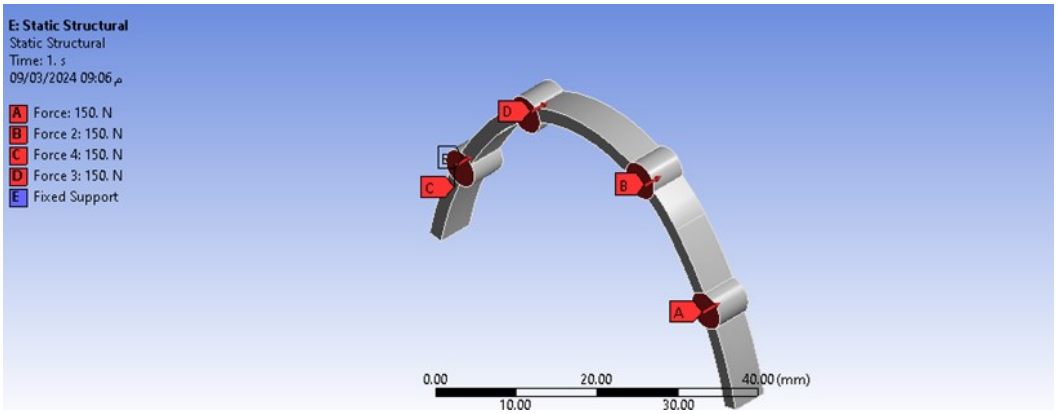
b- الافتراض الثاني: قوى مركزة فوق كل زرعة وعددها 4 ومقدار كل قوة 150N.

c- الافتراض الثالث: توزيع القوة بين الأضراس الخلفية والقواطع الأمامية.

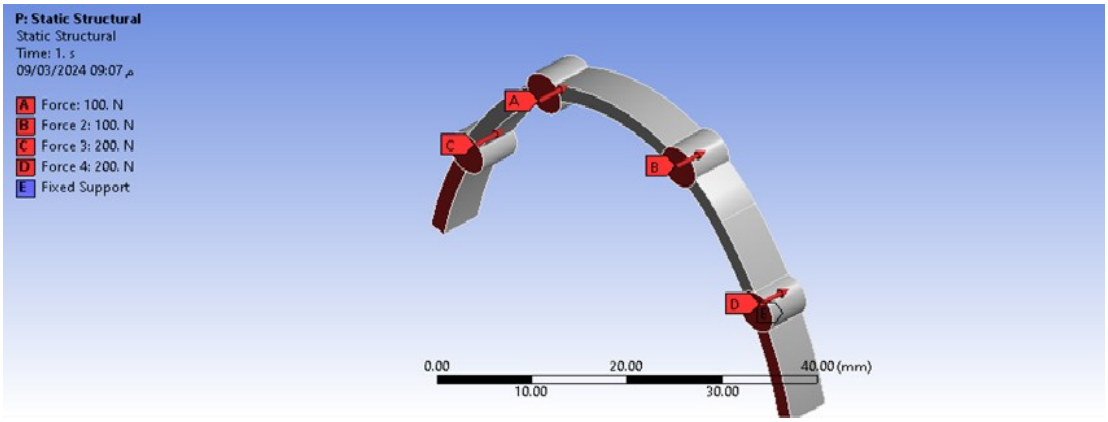
تم تثبيت الجهاز في أماكن توضع الزراعات (E, C, B, D) باستخدام المساند الثابتة.



الشكل (3-3): حالة التحميل الأولى

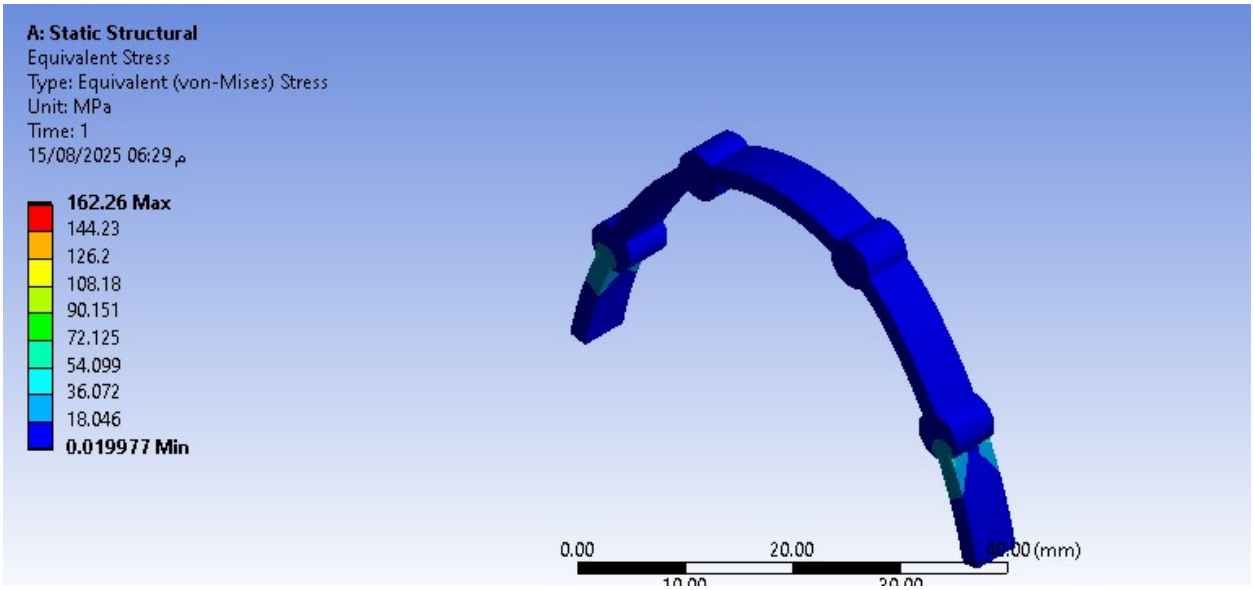


لشكل (3-4): حالة التحميل الثانية

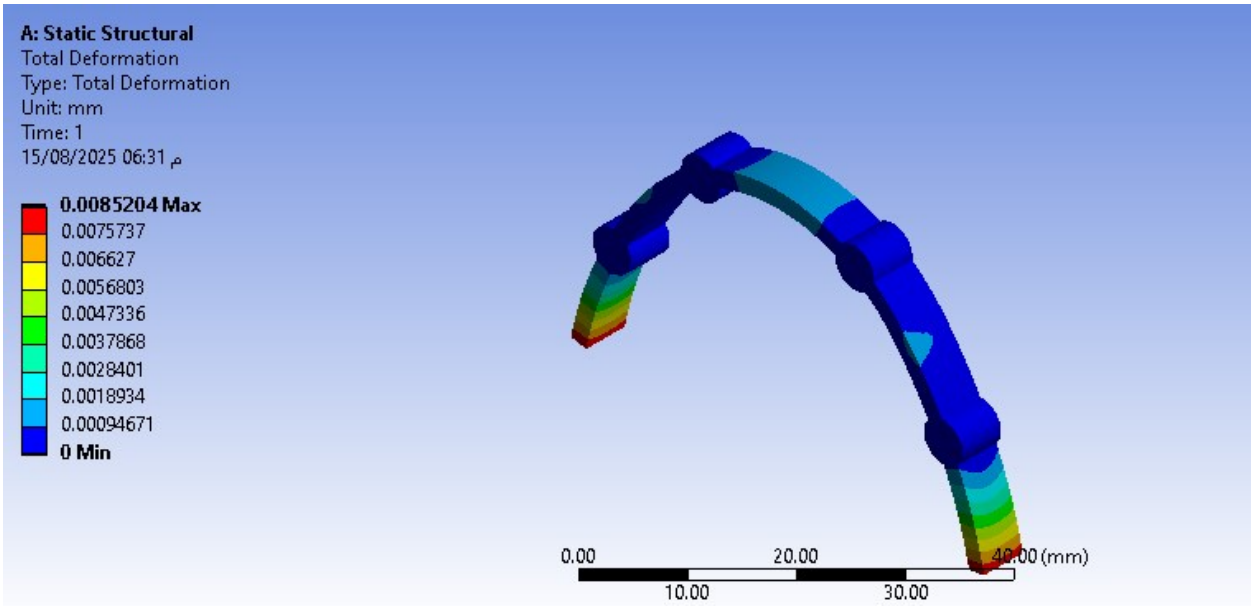


الشكل (3-5): حالة التحميل الثالثة.

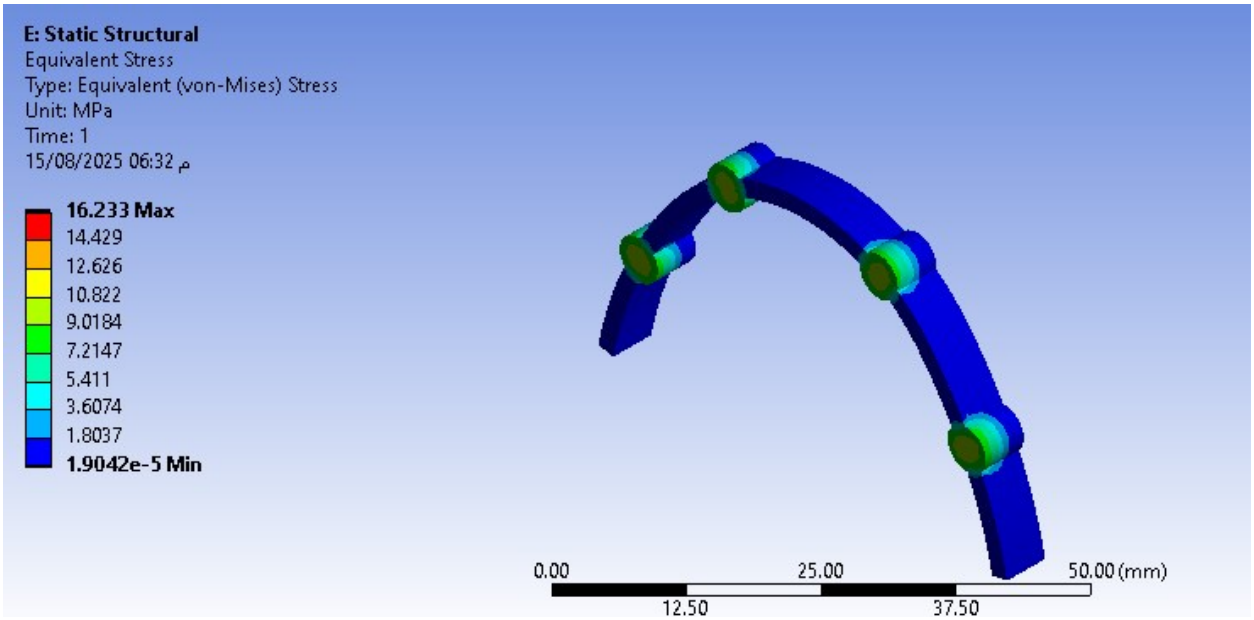
4-اجراء تحليل ستاتيكي وحساب الاجهادات والتشوهات لكل حالة تحميل.



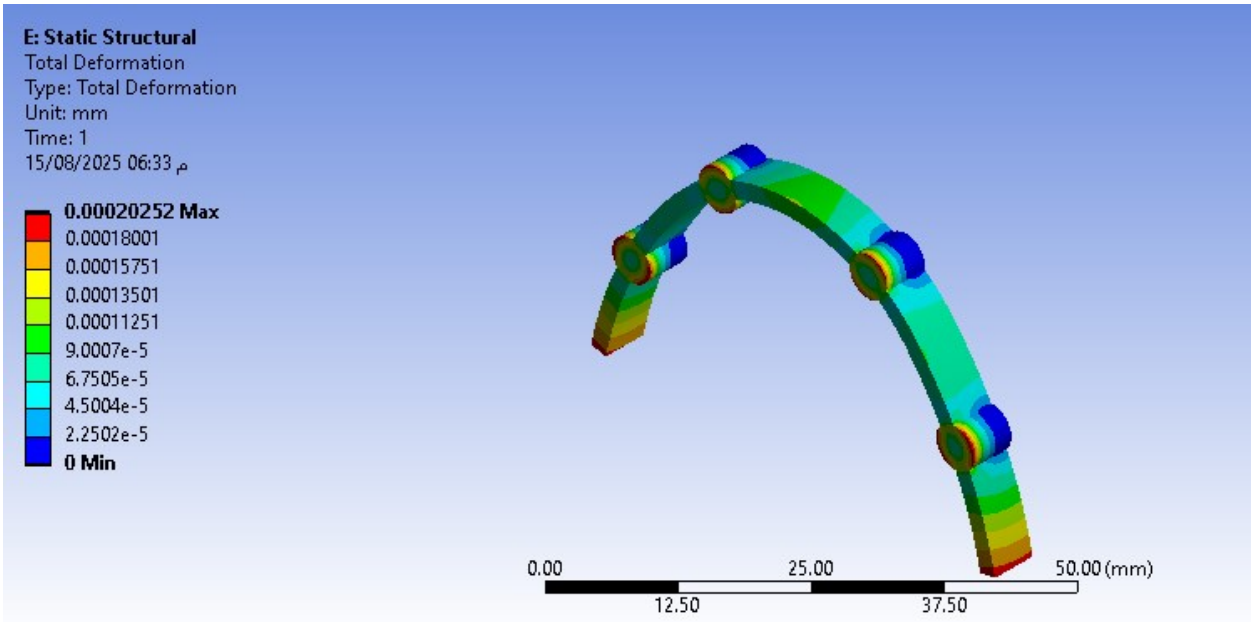
الشكل (3-6): الاجهادات الناتجة عن حالة التحميل الأولى



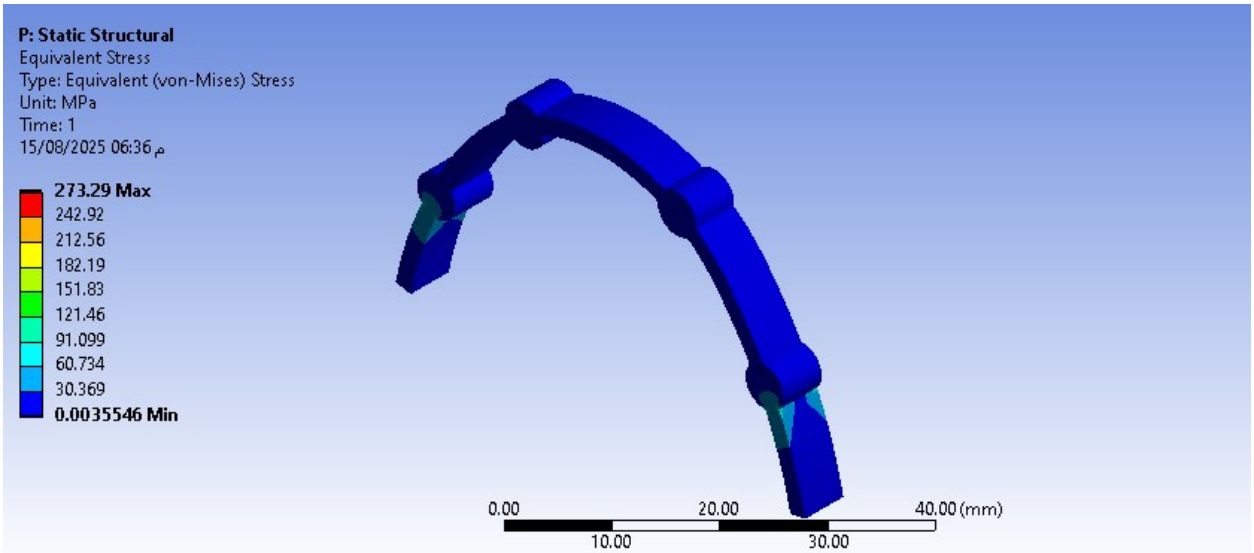
الشكل (3-7): التشوهات الناتجة عن حالة التحميل الأولى.



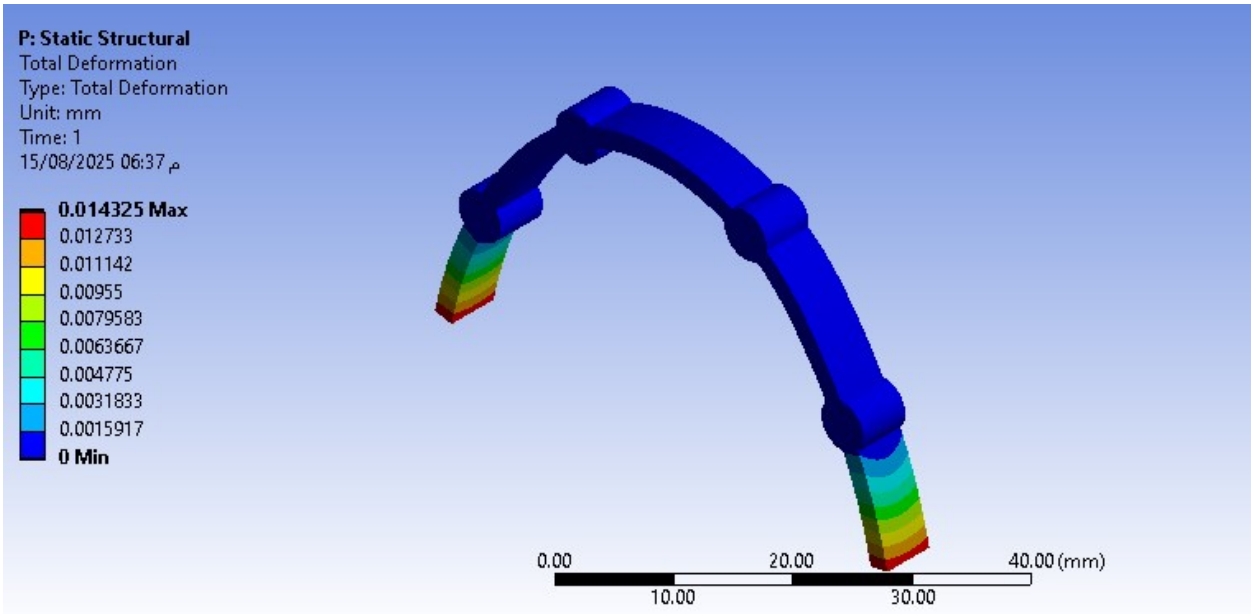
الشكل (3–8): الاجهادات الناتجة عن حالة التحميل الثانية.



الشكل (3–9): التشوهات الناتجة عن حالة التحميل الثانية.

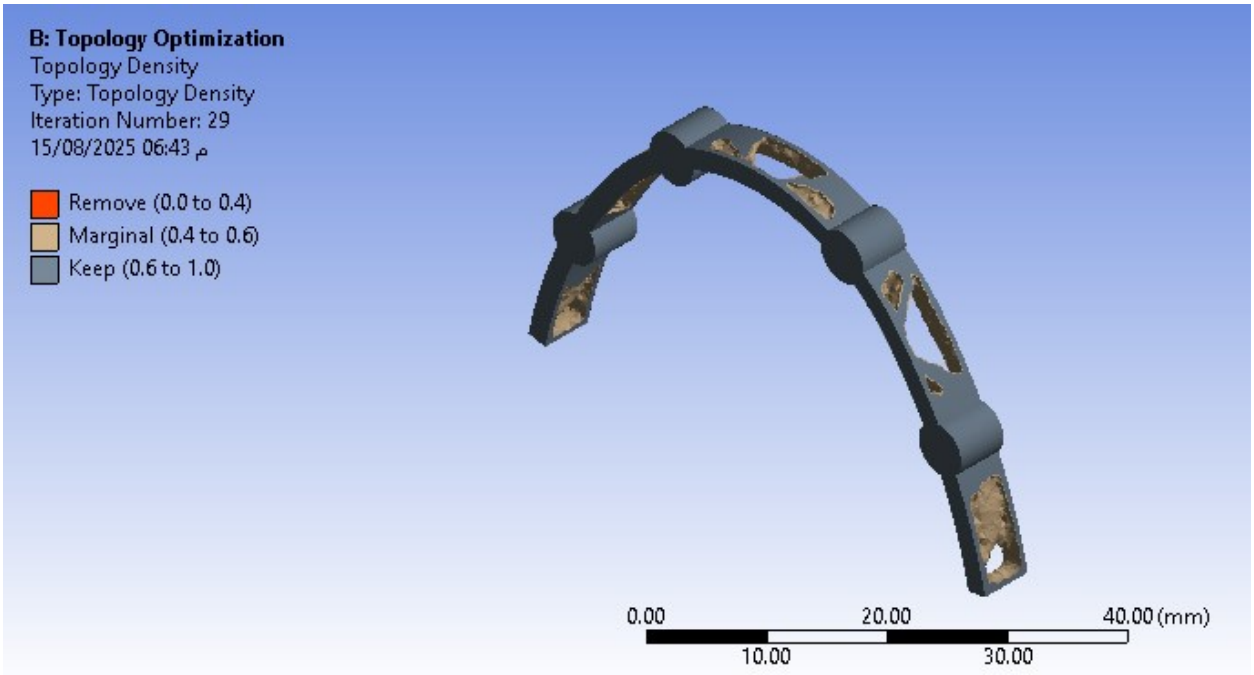


الشكل (3-10): الاجهادات الناتجة عن حالة التحميل الثالثة.

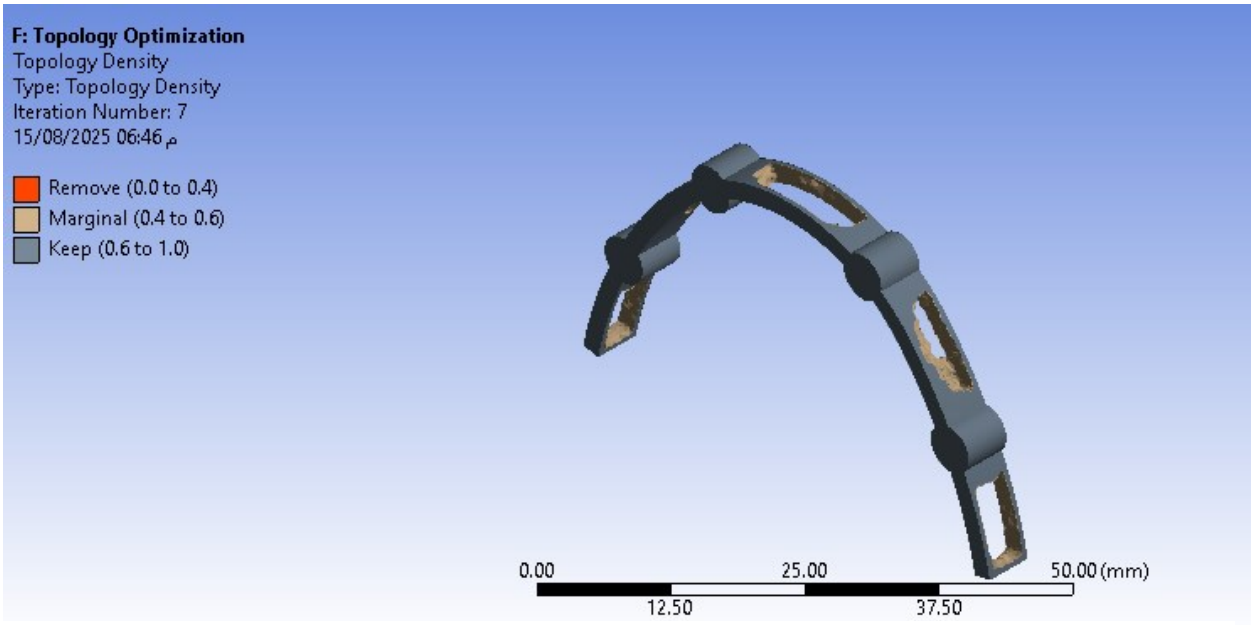


الشكل (3-11): التشوهات الناتجة عن حالة التحميل الثالثة.

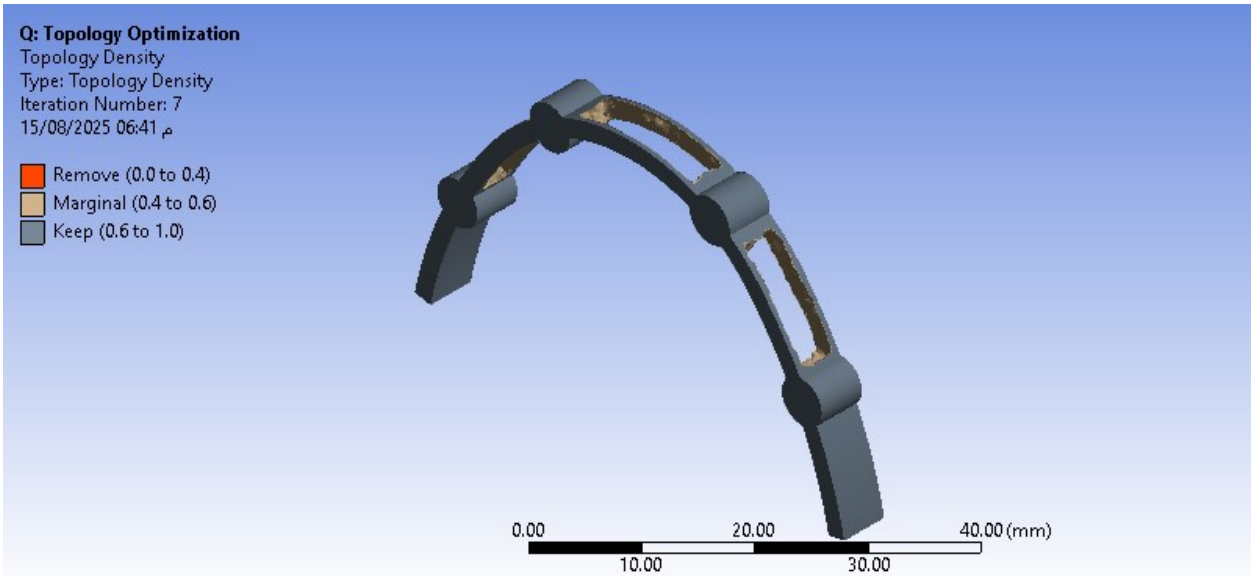
5- اجراء الأمثلة الهيكلية عند حالات التحميل الثلاثة وذلك بتطبيق تابع الهدف وهو تصغير المطيلية وحذف 60% من كتلة المادة باعتماد خوارزمية الكثافة.



الشكل (3-12): الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الأولى.

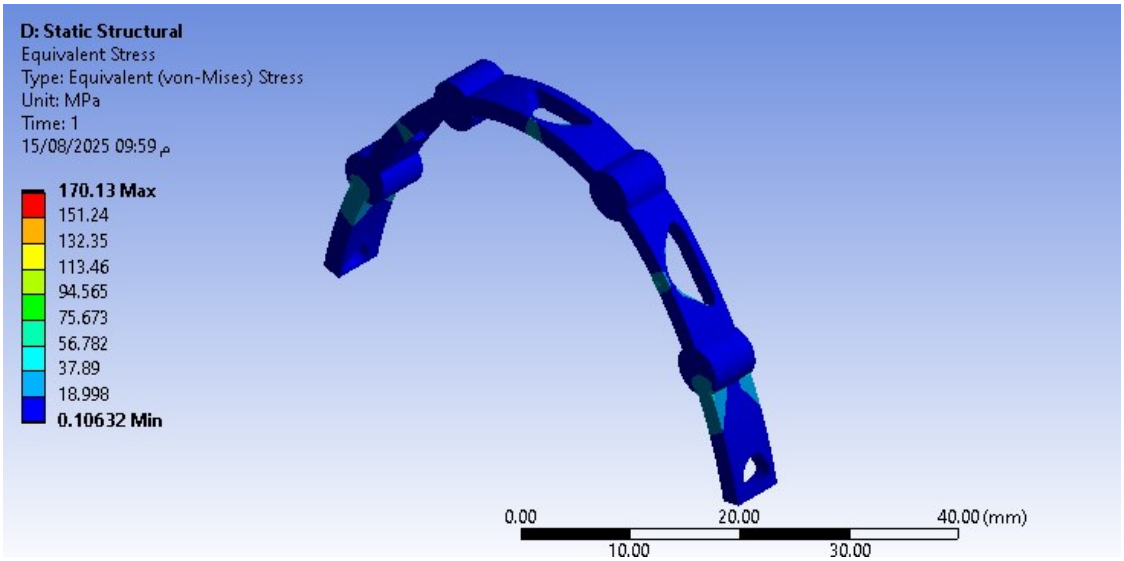


الشكل (3-13): الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثانية.

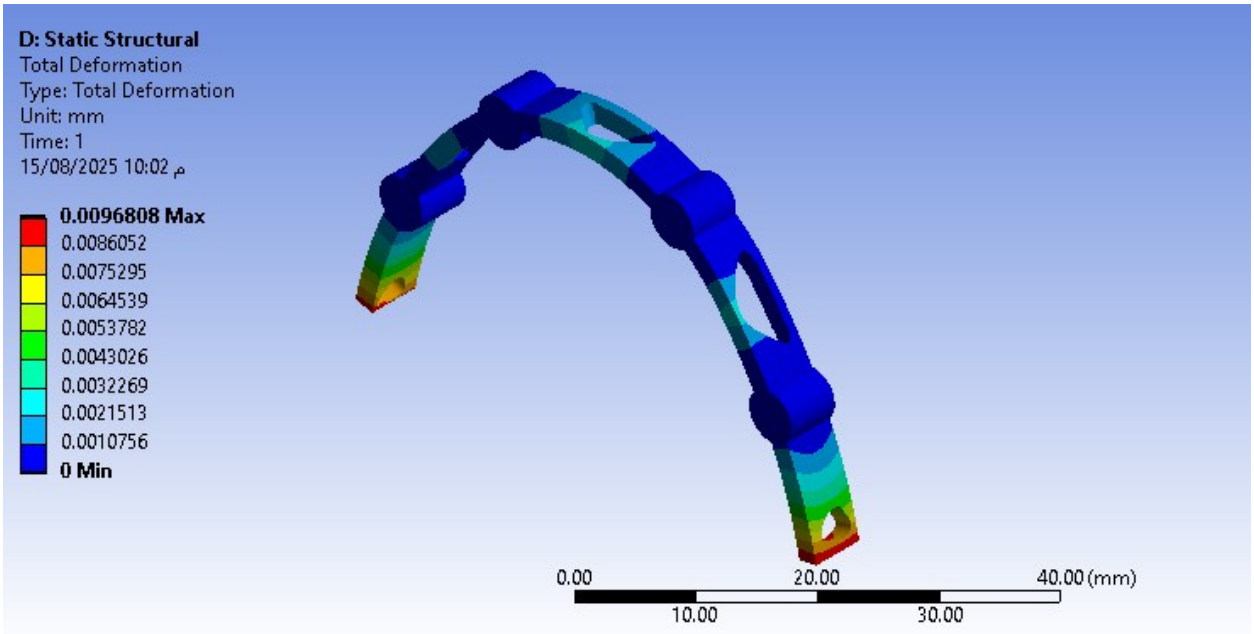


الشكل (3-14): الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثالثة.

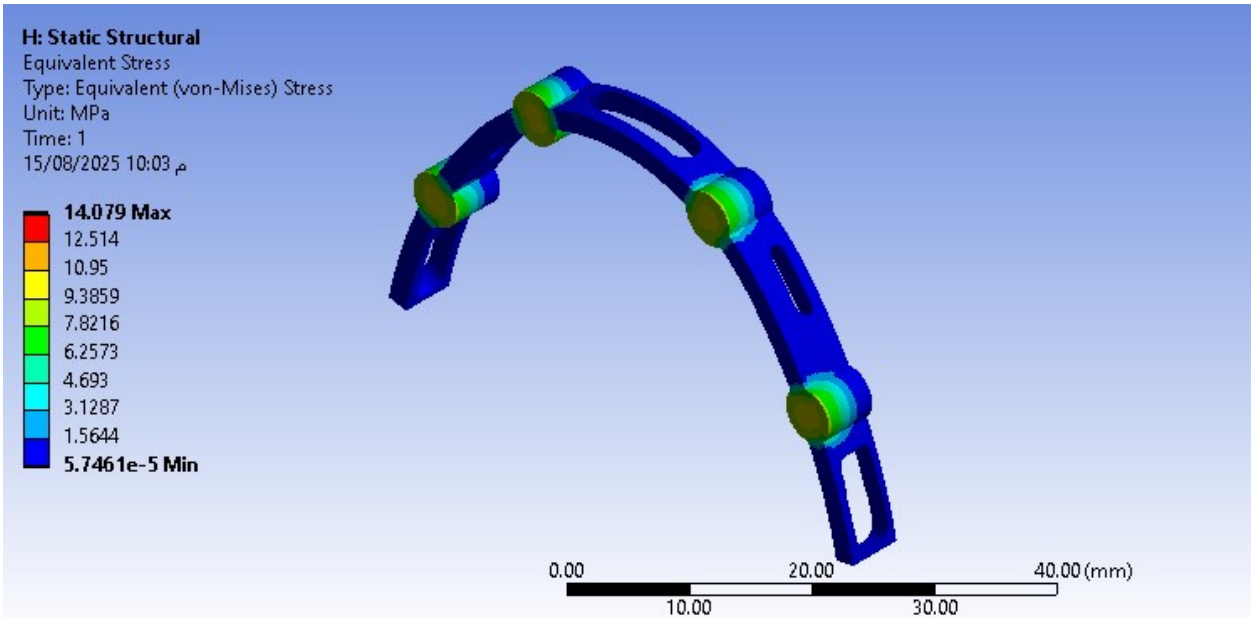
6- تم تعديل التصاميم الناتجة عن الأمثلة الهيكلية باستخدام برنامج Spaceclaim لتصبح صالحة للطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد، ومن ثم اجراء تحليل ستاتيكي وحساب الاجهادات والتشوهات لجميع الحالات.



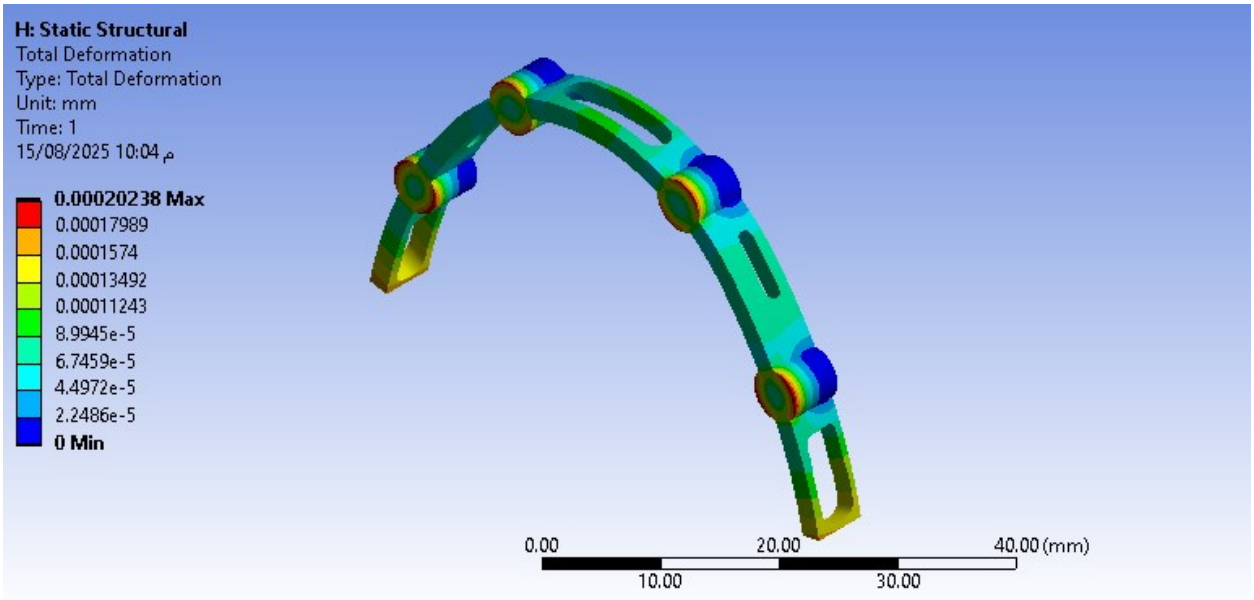
الشكل (3-15): الاجهادات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الأولى.



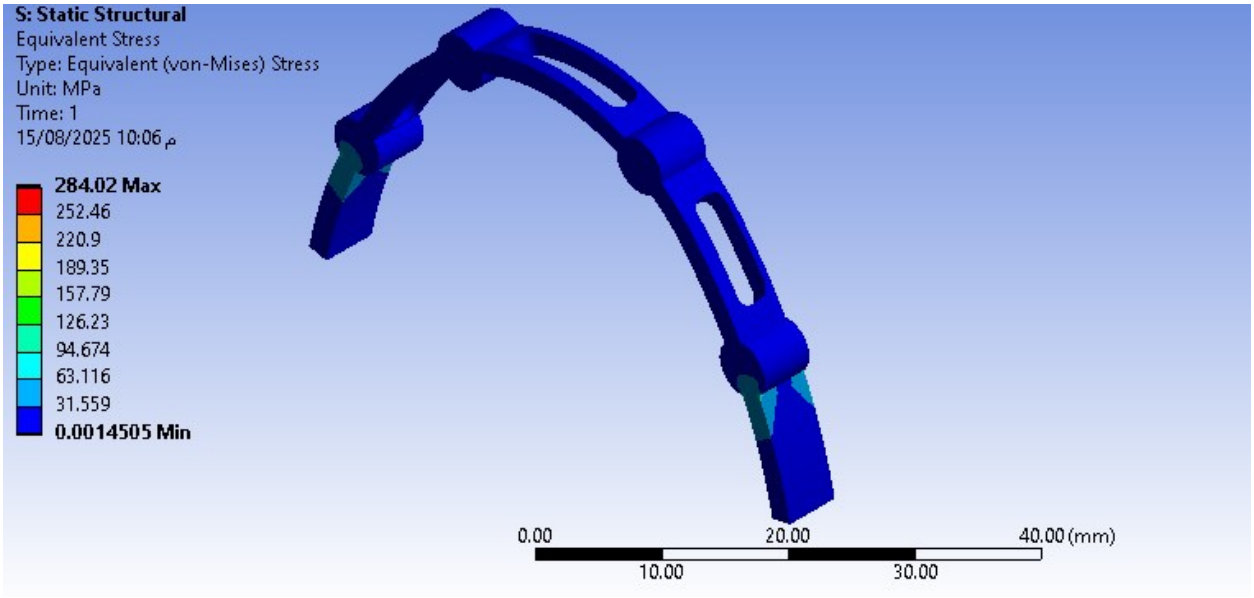
الشكل (3-16): التشوهات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الأولى.



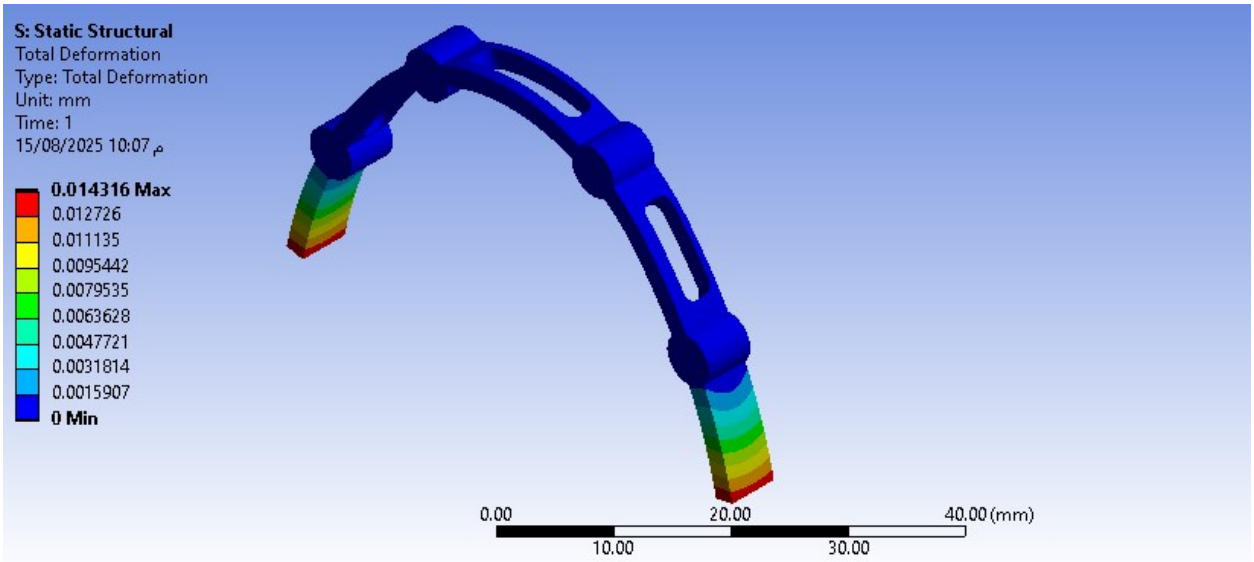
الشكل (3-17): الاجهادات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثانية.



الشكل (3-18): التشوهات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثانية

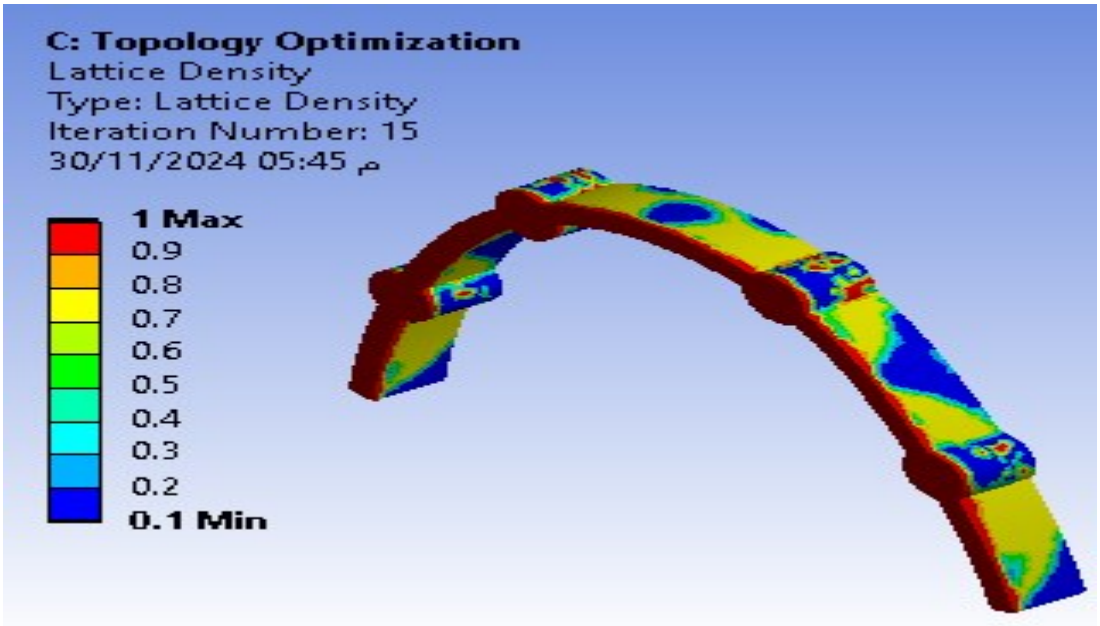


الشكل (3-19): الاجهادات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثالثة.



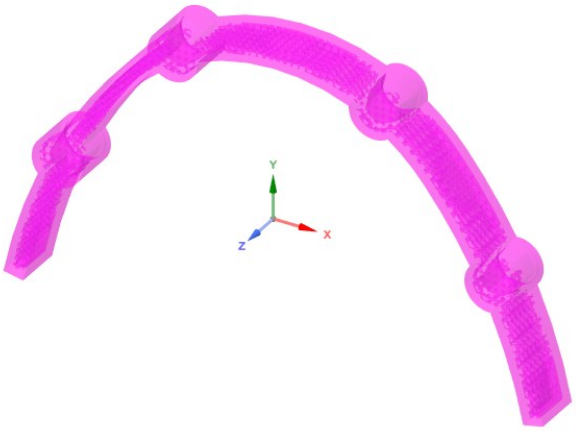
الشكل (3–20): التشوهات لحالة الأمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثالثة

7– تم اجراء الأمثلة الخلوية بالاعتماد على تحليل العناصر المنتهية، حيث تم تعديل خوارزمية الحل الى خوارزمية الأمثلة الخلوية واعتماد الشكل المكعب لنوع الخلايا وبطول 0.7mm للخلية وذلك عند تطبيق التحميل في الحالة الأولى. والشكل(3–21) يبين كثافة توزع الخلايا.



الشكل (3-21): كثافة توزع الخلايا بالاعتماد على تحليل العناصر المنتهية.

8- تم استيراد الحل الناتج الى برنامج Spaceclaim والاستفادة من تعليمة shell للحصول على بنية خلوية متوافقة مع نتائج التحليل بطريقة العناصر المنتهية حيث بلغت نسبة ملء الخلايا 61% كما في الشكل (3-22).



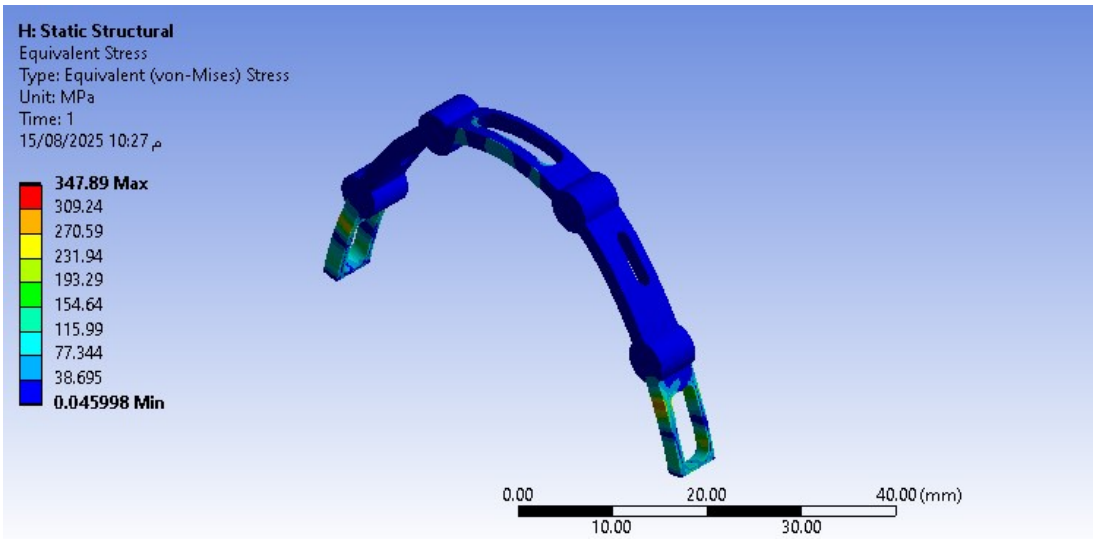
الشكل (3-22): توزع الخلايا الناتجة من تحليل العناصر المنتهية.

ويظهر الجدول (3-1) مقارنة بين الاوزان والاجهادات وتشوهات الهيكل قبل وبعد عملية الأمثلة لحالات التحميل الثالثة وحالة الأمثلة الخلوية.

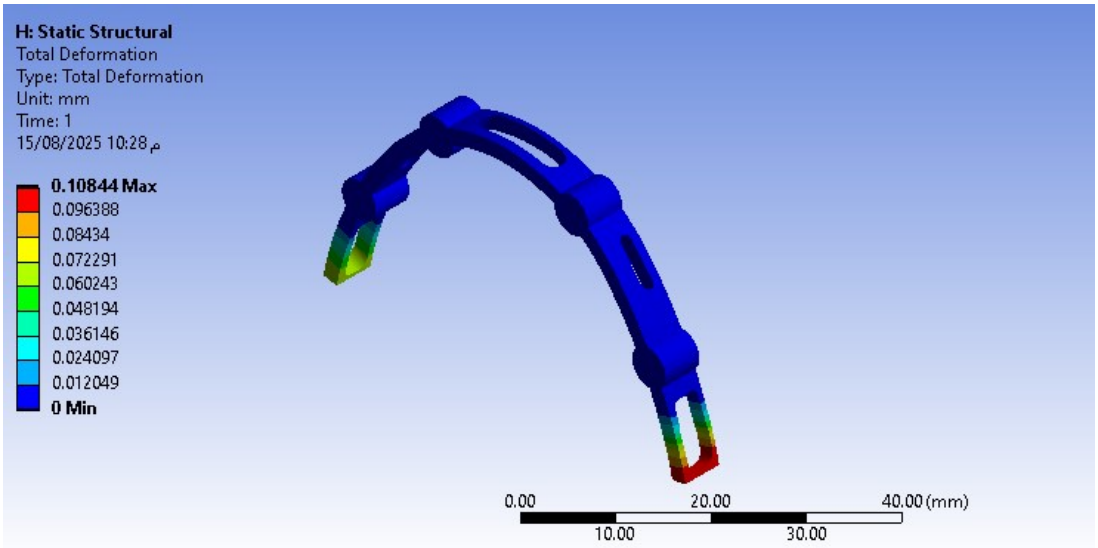
جدول (3−1): مقارنة بين نتائج الأمثلة لحالات التحميل الثلاثة وحالة الأمثلة الخلوية

حالة التحميل	**الوزن** g	**الاجهادات** MPa	**تشوهات** الهيكل mm
حالة التحميل الاولى	قبل عملية الأمثلة 4	قبل عملية الأمثلة 162.26	قبل عملية الأمثلة $8.52\cdot 10^{-3}$
	بعد عملية الأمثلة 3.3	بعد عملية الأمثلة 170.13	بعد عملية الأمثلة $9.68\cdot 10^{-3}$
	النسبة %17.5	النسبة +4.85%	النسبة +13.61%
حالة التحميل الثانية	قبل عملية الأمثلة 4	قبل عملية الأمثلة 16.233	قبل عملية الأمثلة $0.2\cdot 10^{-3}$
	بعد عملية الأمثلة 2.9	بعد عملية الأمثلة 14.079	بعد عملية الأمثلة $0.2\cdot 10^{-3}$
	النسبة 27.5%	النسبة −13.26%	النسبة 0%
حالة التحميل الثالثة	قبل عملية الأمثلة 4	قبل عملية الأمثلة 273.29	قبل عملية الأمثلة $14.3\cdot 10^{-3}$
	عملية الأمثلة 3.1	بعد عملية الأمثلة 284.02	بعد عملية الأمثلة $14.3\cdot 10^{-3}$
	النسبة %22.5	النسبة +3.92%	النسبة 0%
الأمثلة الخلوية لحالة التحميل الأولى	قبل عملية الأمثلة 4	قبل عملية الأمثلة 162.26	قبل عملية الأمثلة $8.5\cdot 10^{-3}$
	بعد عملية الأمثلة 3.4	بعد عملية الأمثلة 164.02	بعد عملية الأمثلة $4.4\cdot 10^{-3}$
	النسبة 15%	النسبة +1.08%	النسبة −48.23%

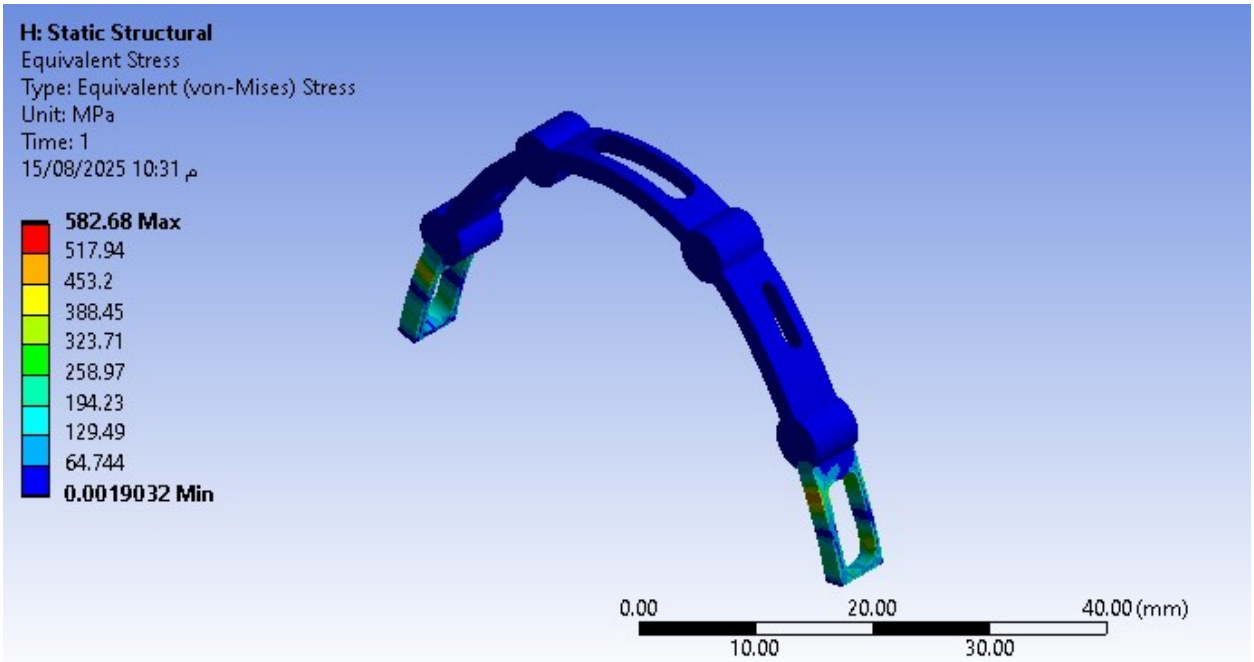
نلاحظ أن حالة التحميل الثانية هي أفضل حالة من حالات الأمثلة الهيكلية من حيث تخفيض وزن الهيكل وانخفاض الاجهادات في الهيكل مع بقاء التشوهات نفسها قبل وبعد عملية الأمثلة، وبالتالي يمكن اعتبار هذا التصميم هو التصميم الأمثل للهيكل. وللتحقق من صلاحية هذا التصميم تم إعادة نمذجته وفق حالة التحميل الأولى والثالثة وحساب الاجهادات والتشوهات.



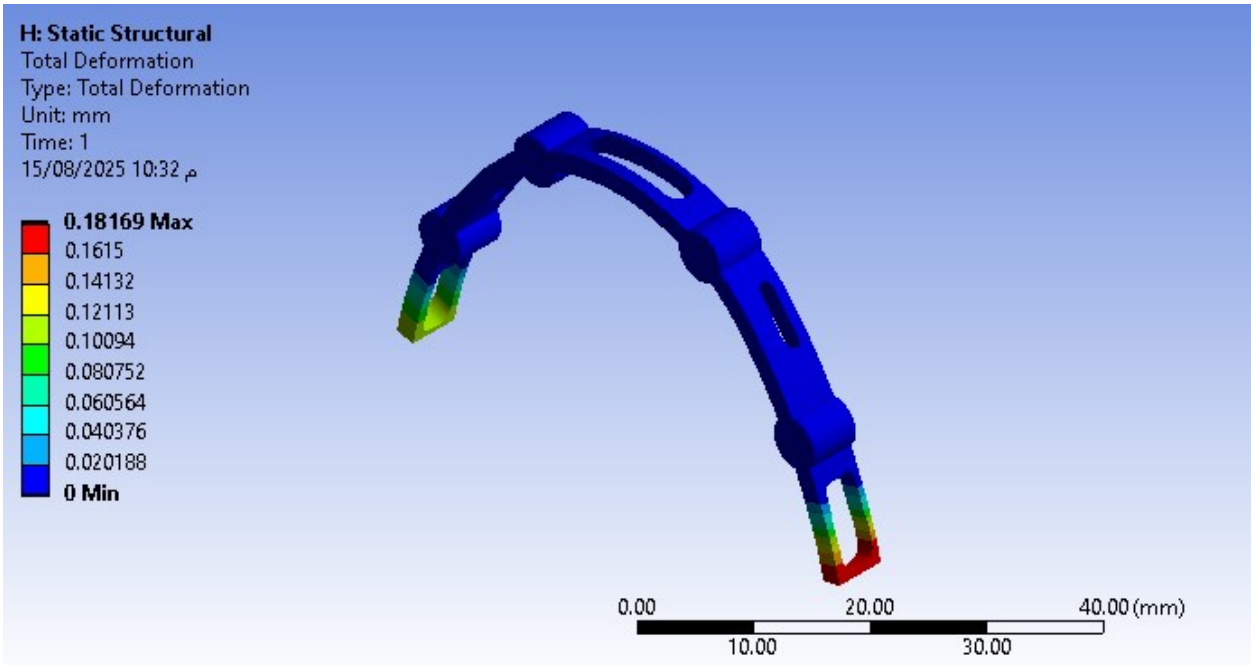
الشكل (3-23): الاجهادات الناتجة من حالة التحميل الأولى.



الشكل (3-24): التشوهات الناتجة من حالة التحميل الأولى.



الشكل (3-25): الاجهادات الناتجة من حالة التحميل الثالثة.



الشكل (3-26): التشوهات الناتجة من حالة التحميل الثالثة.

3-1-1 الدراسة التجريبية:

تم تنفيذ العينات المقترحة من الأمثلة الهيكلية والخلوية على طابعة من نوع Riton D-150 واجراء الطباعة عند البارامترات الموضحة بالجدول (3-2):

جدول (3-2): بارامترات الطابعة المعدنية

شدة الليزر	165W
سرعة الليزر	1050mm/s
سماكة طبقة الترسيب	0.03mm
درجة حرارة المعالجة الحرارية	550^{o}
زمن الإبقاء	ساعة
زمن التبريد	ثلاث ساعات



الشكل (3-27): العينة الناتجة عن حالة التحميل الأولى.



الشكل (3-28): العينة الناتجة عن حالة التحميل الثانية.



الشكل (3-29): العينة الناتجة عن حالة التحميل الثالثة.

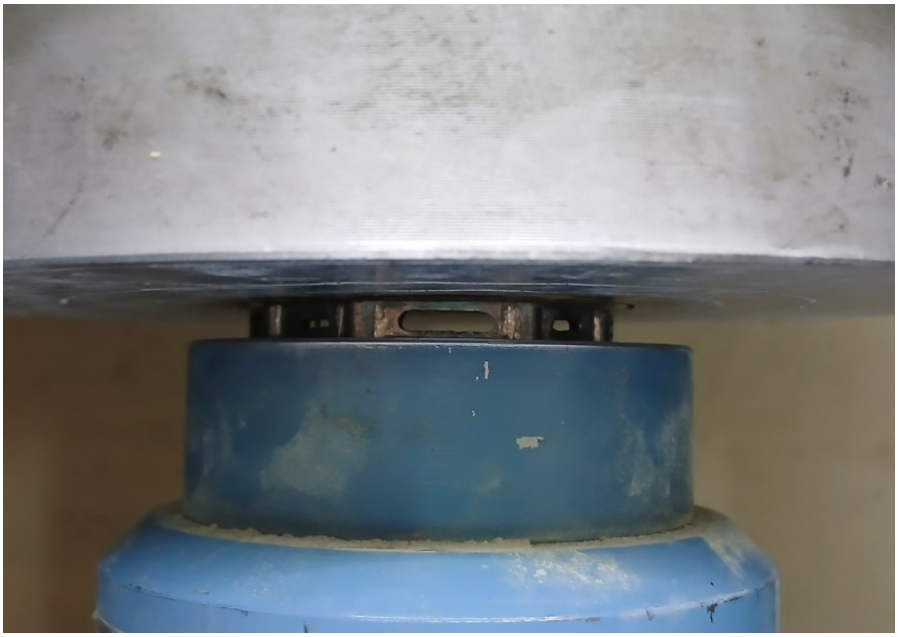


الشكل (3-30): العينة الناتجة عن الأمثلة الخلوية.

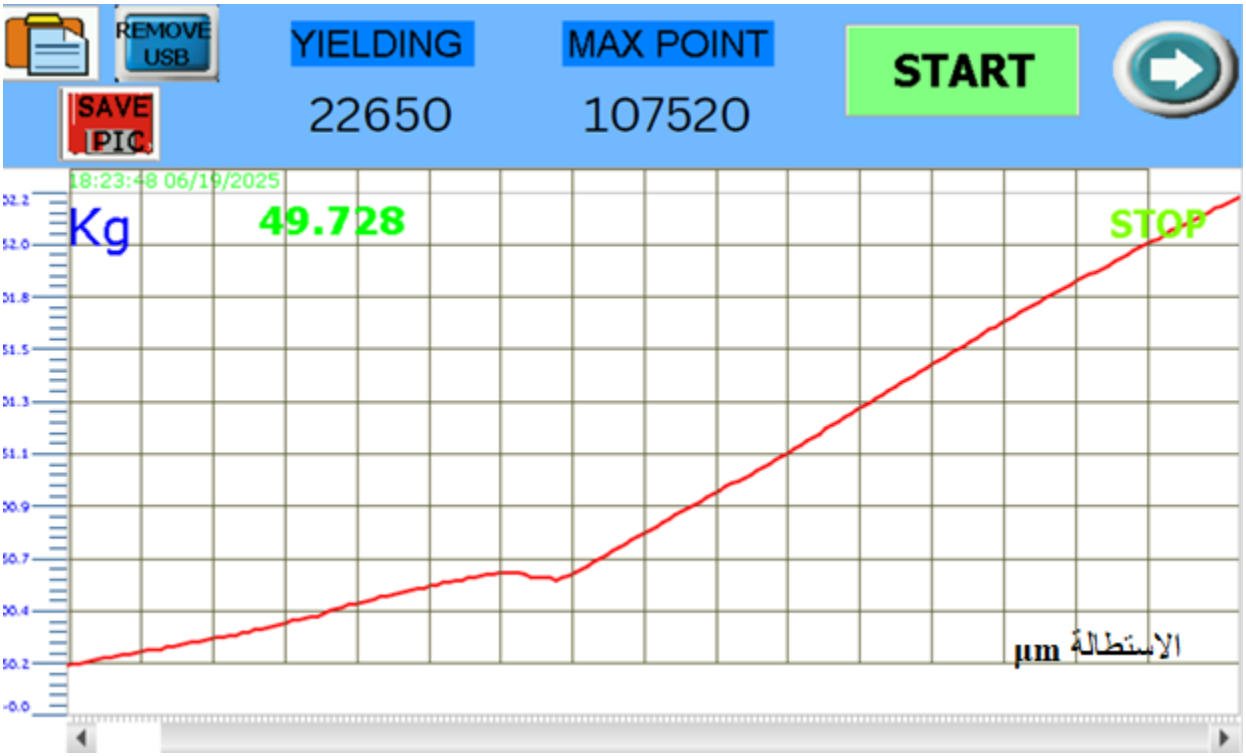
لتتحقق من متانة هذه العينات تم اجراء اختبار ضغط على هذه العينات باستخدام Forney الموجود ضمن مخبر المواد في نقابة المهندسين فرع دمشق وذلك عند سرعة ضغط 2 mm/min وتم رسم منحني قوة مع استطالة وتحديد قوة الخضوع وحد الخضوع وقوة التحطم وحد التحطم للعينات السابقة.



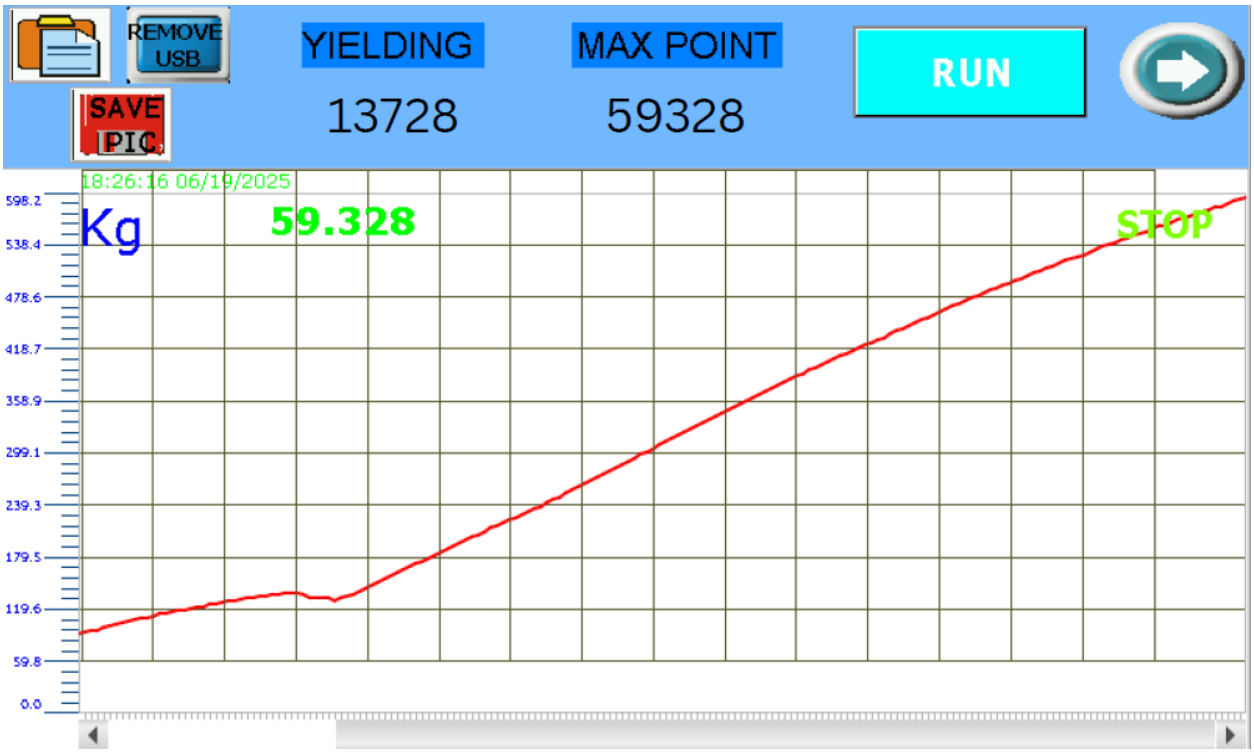
الشكل (3-31): آلة الاختبار Forney



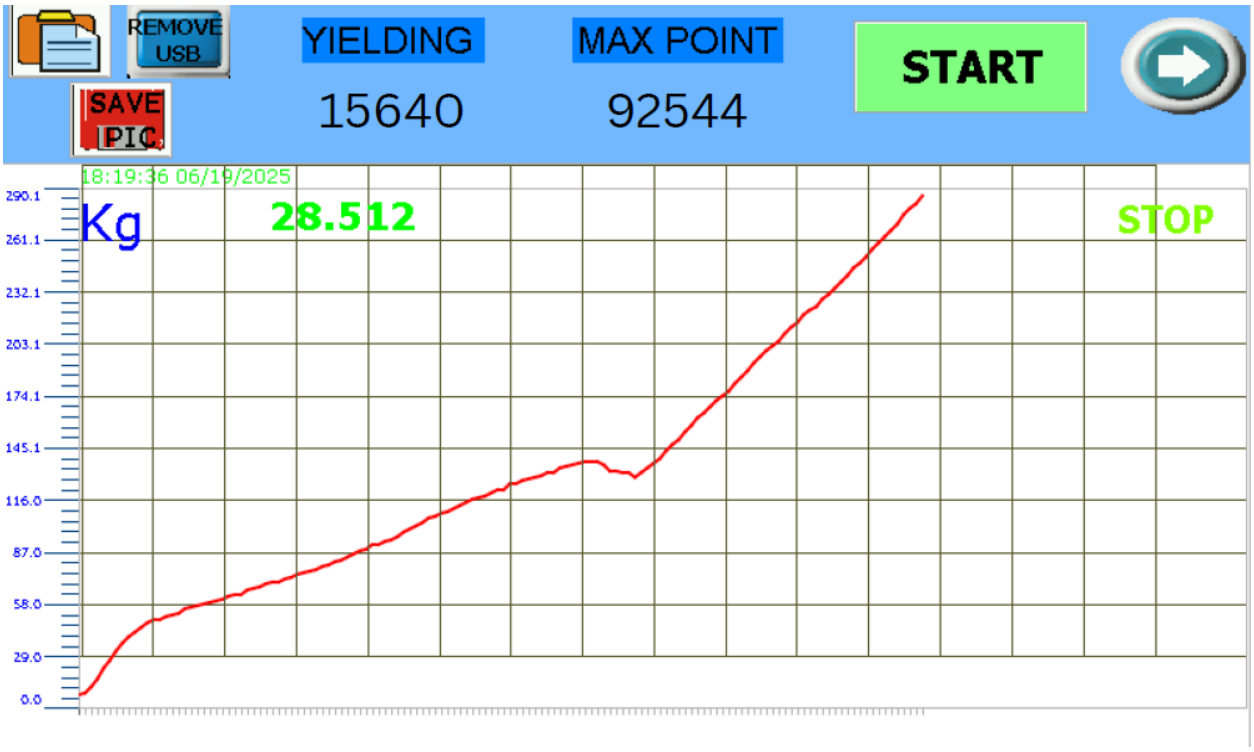
الشكل (3-32): طريقة اختبار العينات.



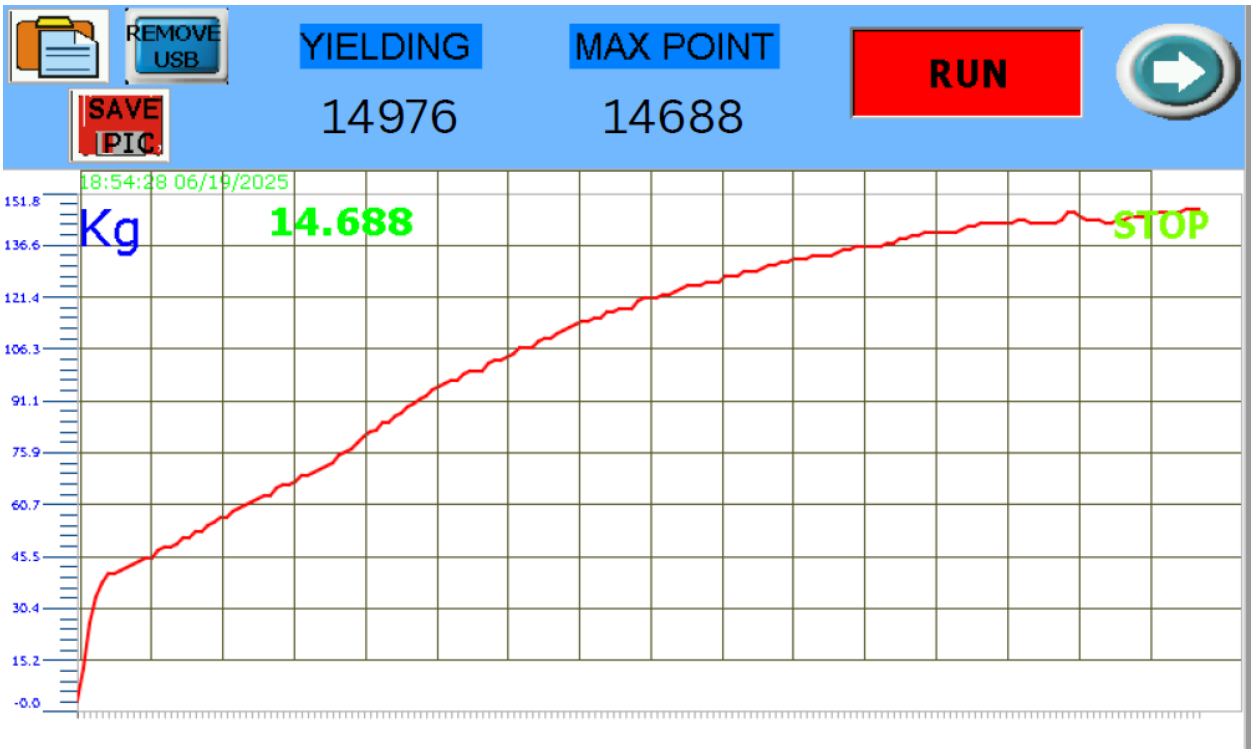
الشكل (3-33): منحني قوة – استطالة الناتج عن اختبار العينة المؤمثلة الناتجة عن حالة التحميل الأولى.



الشكل (3–34): منحني قوة – استطالة الناتج عن اختبار العينة المؤمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثانية.



الشكل (3–35): منحني قوة – استطالة الناتج عن اختبار العينة المؤمثلة الناتجة عن حالة التحميل الثالثة.



الشكل (3–36): منحني قوة – استطالة الناتج عن اختبار العينة المؤمثلة الناتجة عن حالة الأمثلة الخلوية.

جدول (3-3): نتائج اختبار العينات

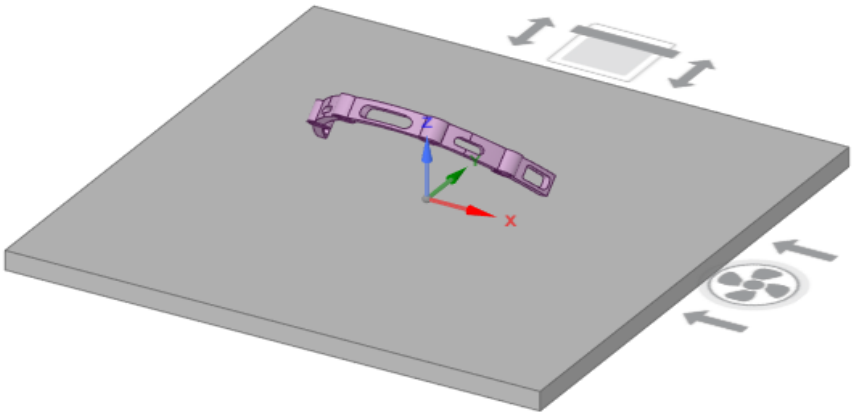
العينة / نوع القراءة	(a)	(b)	(c)
قوة الخضوع KN	222.1206	134.62569	153.376
اجهاد الخضوع MPa	1639.5	1289.51	1467.12
قوة التحطم KN	105441	907.54661	100.35144
اجهاد التحطم MPa	7782.77	8692.97	9603
مساحة العينات mm^2	135.480	104.400	104.542

نلاحظ أن حد الخضوع لجميع العينات التي تم طباعتها أعلى من حد الخضوع لخليطة التيتانيوم والذي يبلغ 1170 MPa، وبالتالي جميع العينات متينة ويمكن اعتبار العينة b الناتجة عن الأمثلة لحالة التحميل الثانية والتي تحقق أعلى نسبة تخفيض في الوزن والتي بلغت 27.5% فقد كانت متينة حاسوبياً وتجريبياً ، وتعتبر هي العينة الأمثل التي يمكن اختيارها واجراء الجزء الثاني من الدراسة وهو اختيار الاتجاه الأمثل للطباعة.

3-2 اختيار الاتجاه الأمثل للطباعة:

تم استيراد العينة الأمثل (حامل الزرعات) الى أدوات محاكاة عملية التصنيع بالإضافة وهي ANSYS Additive wizard وذلك بهدف اجراء تحليل لعملية الطباعة عند الزوايا (0^o,30^o,45^o,90^o) لمعرفة تأثير زاوية البناء على الاجهادات المتبقية والتشوهات على النموذج بعد طباعته مباشرة وبعد اجراء المعالجة الحرارية اللازمة وبعد نزع الدعائم لتحديد الاتجاه الأمثل للبناء، وقد تم تحديد بارامترات الطباعة بعد العودة إلى مواصفات الطابعة Riton D-150 التي تتم الطباعة عليها والواردة في الجدول (3-2)، وتم اجراء هذا التحليل وفق الخطوات التالية:

1. استيراد حامل الزرعات المؤمثل الى برنامج Spaceclaim والاستفادة من تبويب Addtive لإنشاء قاعدة البناء وتحديد موقع القطعة المدروسة على القاعدة وارتفاع القطعة المدروسة وتحديد زاوية البناء كما هو موضح بالشكل (3-35).

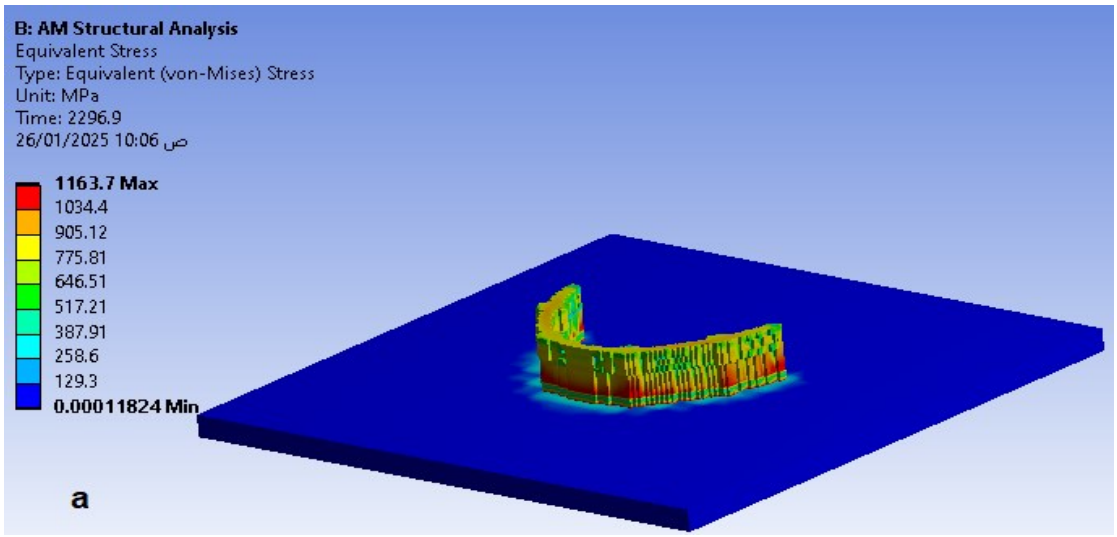


الشكل (3-37): ضبط وضعية القطعة في برنامج Spaceclaim.

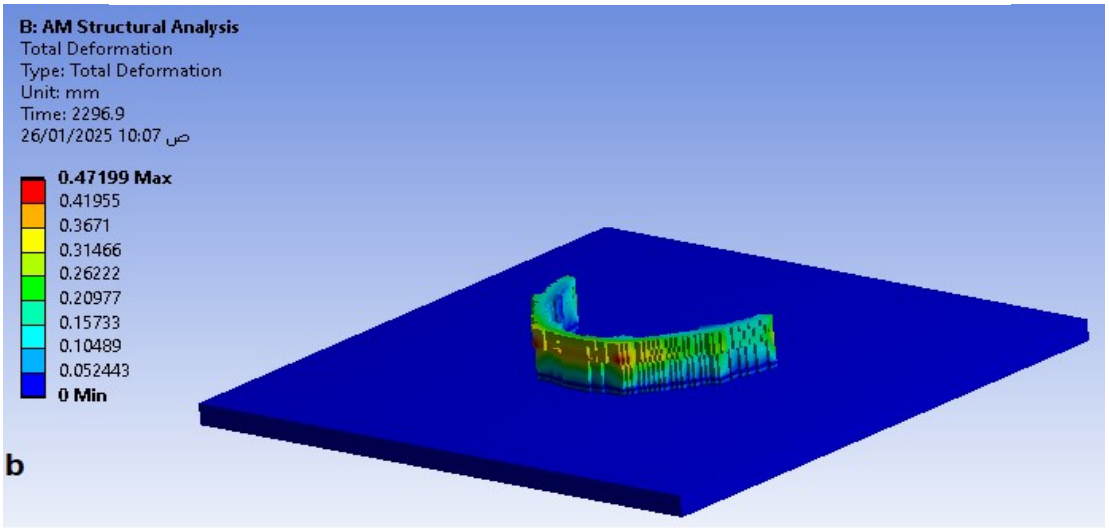
2. الانتقال الى ضبط خطوات الطباعة ضمن تبويب Ansys additive wizard والتي تضمن خطوات تحديد الجسم المطبوع واختيار القاعدة وتحديد الدعائم، وفي هذه الدراسة تم بناء الدعائم بشكل افتراضي من قبل البرنامج، وتحديد نوع العناصر المنتهية وحجمها، وتم اختيار عناصر من نوع Cartesian وبحجم 0.7mm للجسم المطبوع وبحجم 6 mm لعناصر القاعدة، كما تم اختيار مادة الجسم المطبوع من التيتانيوم Ti_6AL_4V ومادة قاعدة البناء من الفولاذ الانشائي ومن ثم إضافة سمك طبقة الترسيب وسرعة الليزر واختيار طريقة التحليل إما بدون معالجة حرارية ودون نزع للدعائم أو تفعيل هذه الخيارات.
3. تم اجراء تحليل لأربع زوايا بناء وهي (0^o, 30^o, 45^o, 90^o) وعند ثلاث حالات بناء:

- طباعة من دون معالجة حرارية ودون نزع دعائم.
- طباعة مع معالجة حرارية وبدون نزع دعائم.
- طباعة مع معالجة حرارية ونزع دعائم.

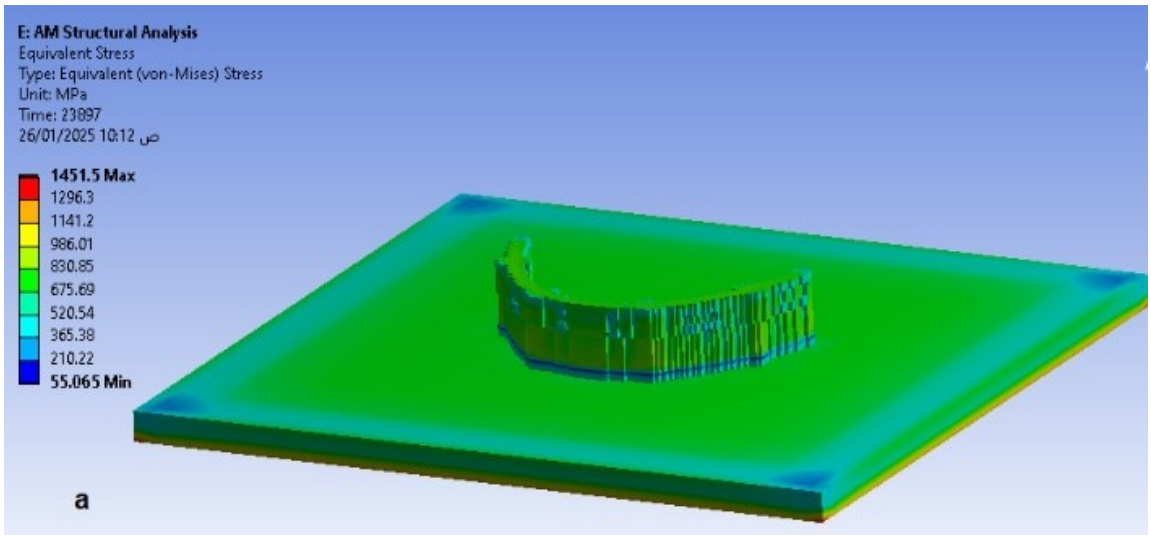
وذلك لمعرفة أثر عملية الطباعة عند هذه الشروط والزوايا على الاجهادات المتبقية والتشوهات على المنتج كما يظهر في الأشكال التالية:



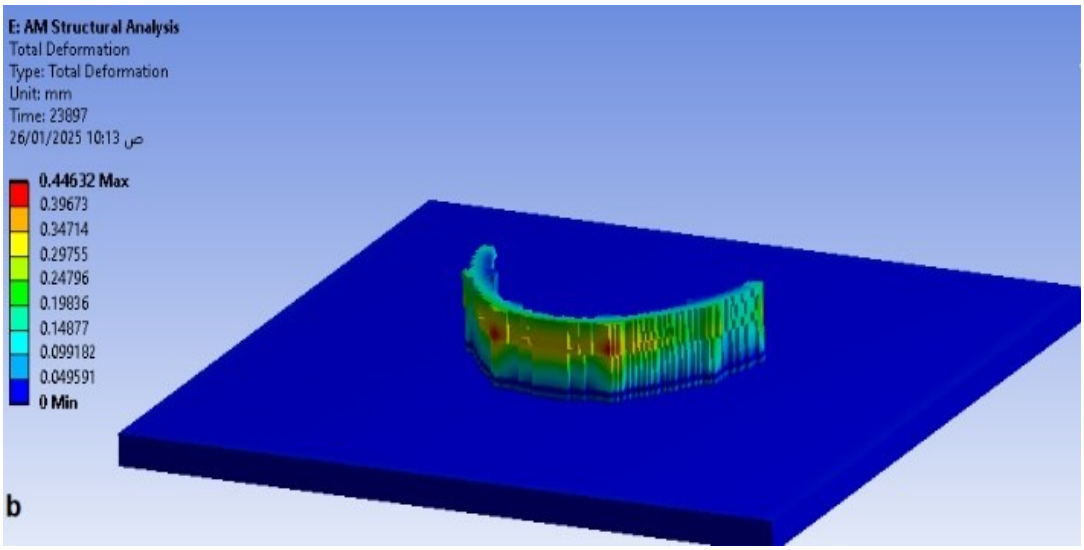
الشكل (3-38): الاجهادات عند الزاوية 0° بدون معالجة حرارية.



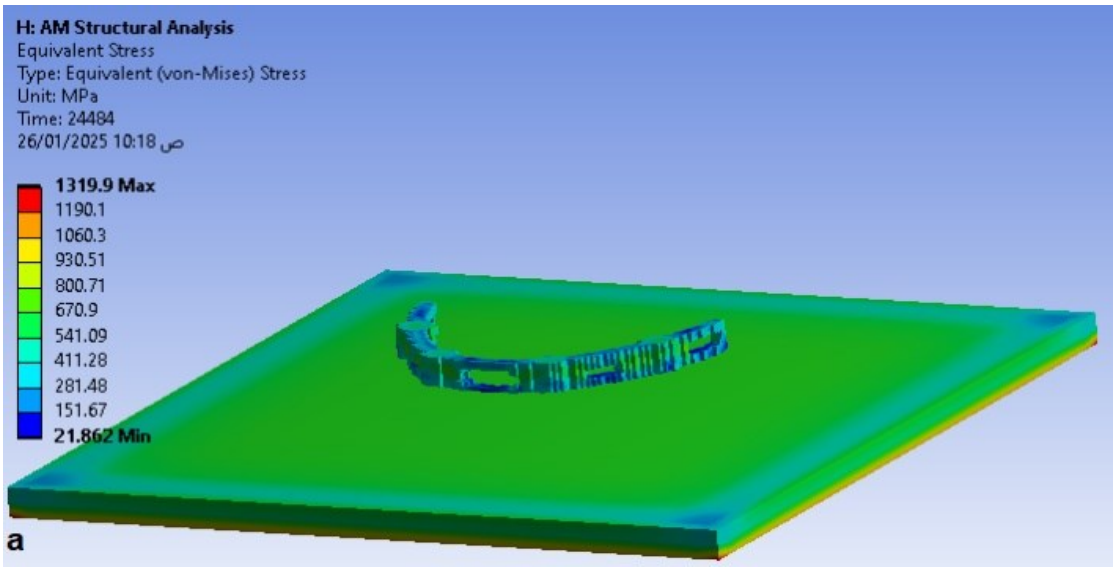
الشكل (3-39): التشوهات عند الزاوية 0° بدون معالجة حرارية.



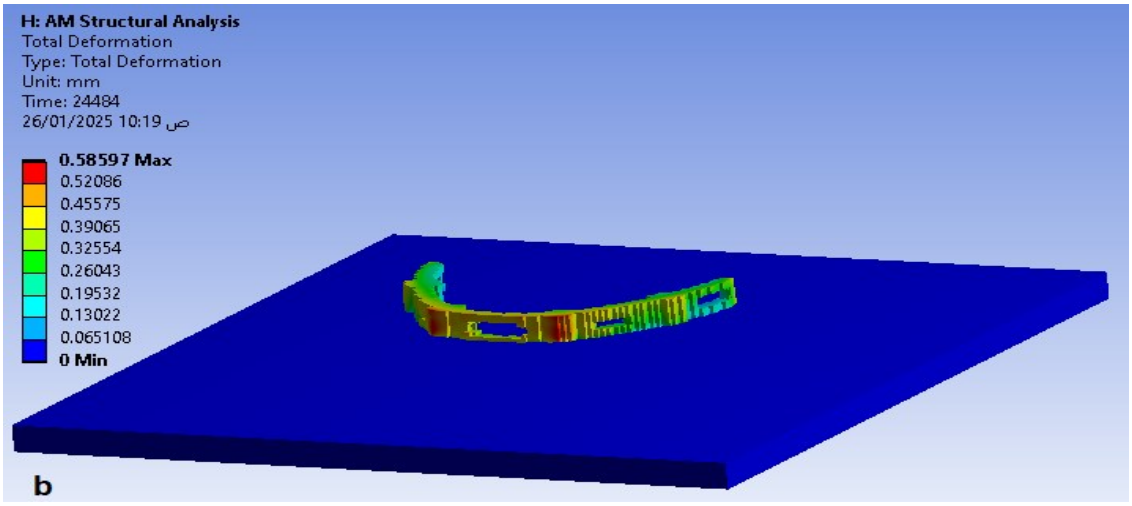
الشكل (3-40): الاجهادات عند الزاوية 0° مع معالجة حرارية.



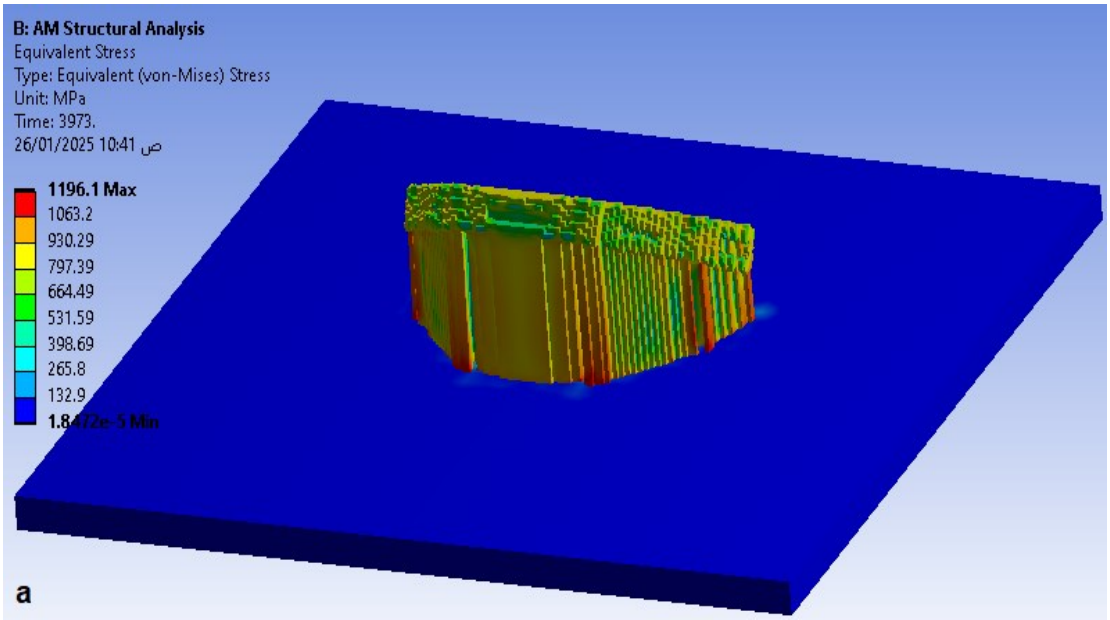
الشكل (3-41): التشوهات عند الزاوية 0° مع معالجة حرارية.



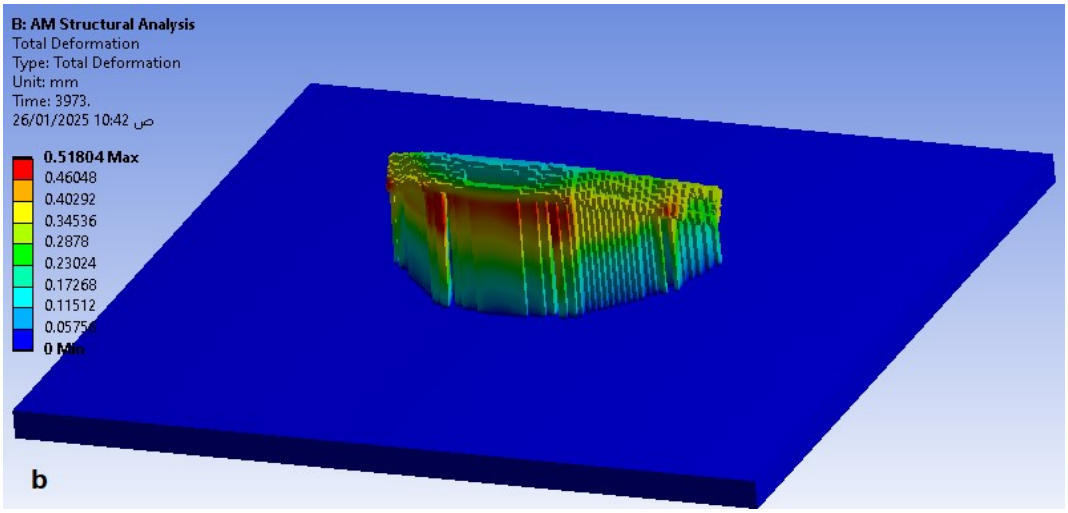
الشكل (3-42): الاجهادات عند الزاوية 0°مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم.



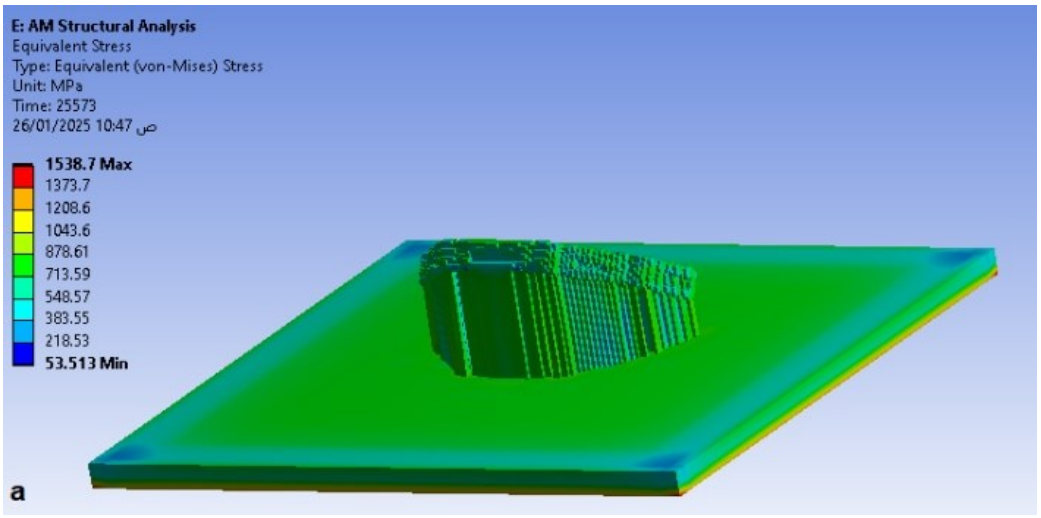
الشكل (3-43): التشوهات عند الزاوية 0° مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم.



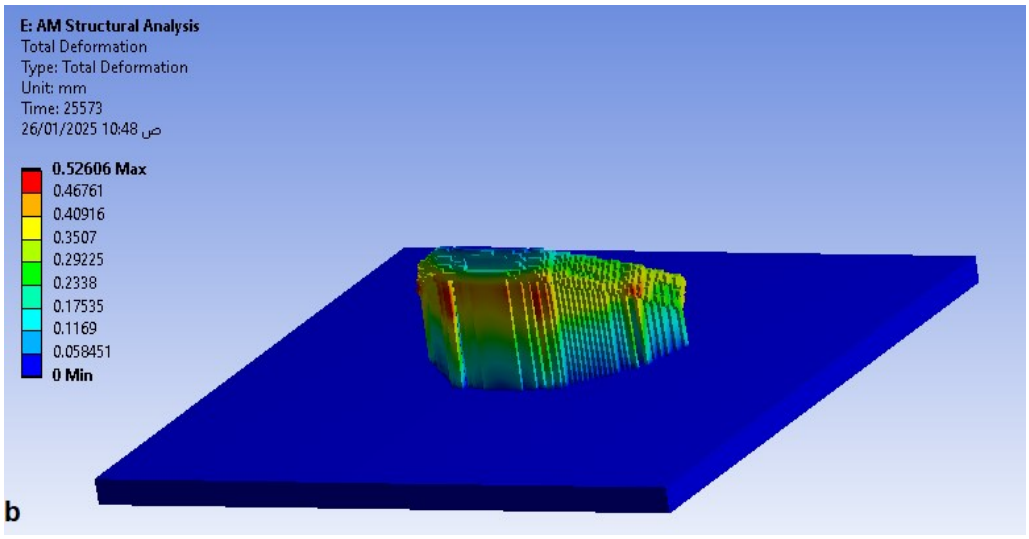
الشكل (3-44): الاجهادات عند الزاوية 30° بدون معالجة حرارية.



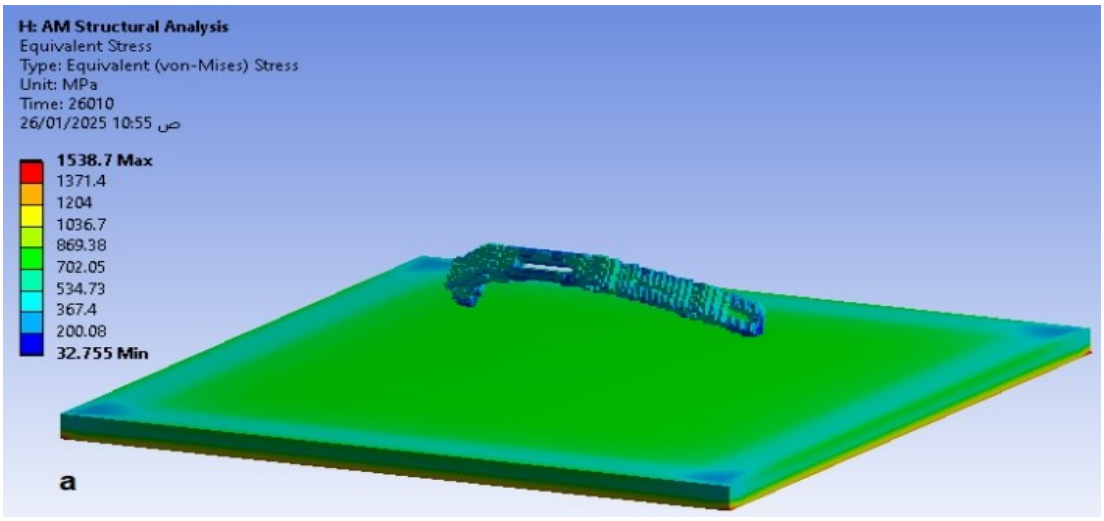
الشكل (3-45): التشوهات عند الزاوية30° بدون معالجة حرارية.



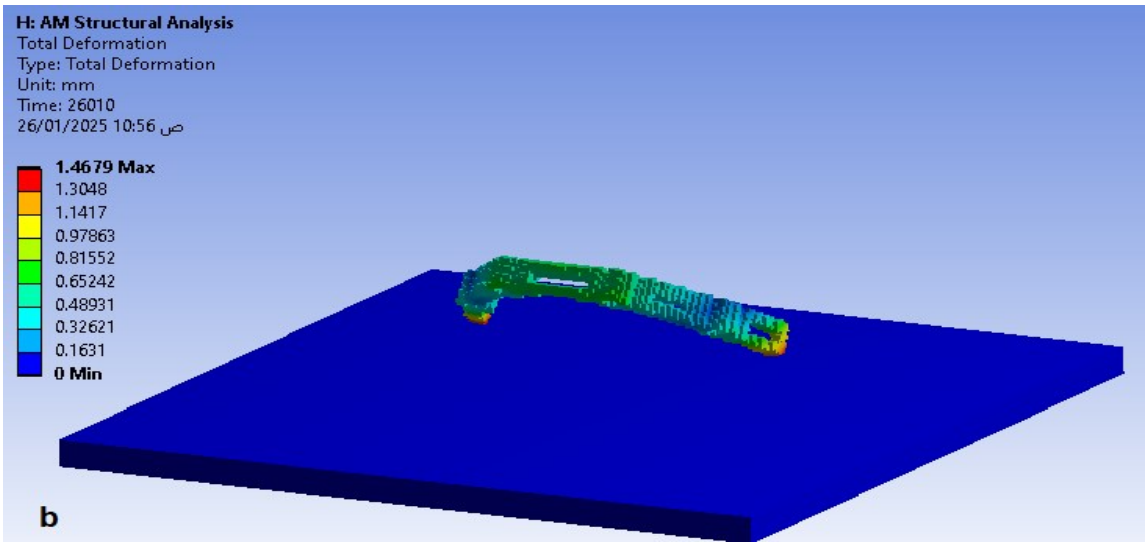
الشكل (3-46): الاجهادات عند الزاوية30 °مع معالجة حرارية.



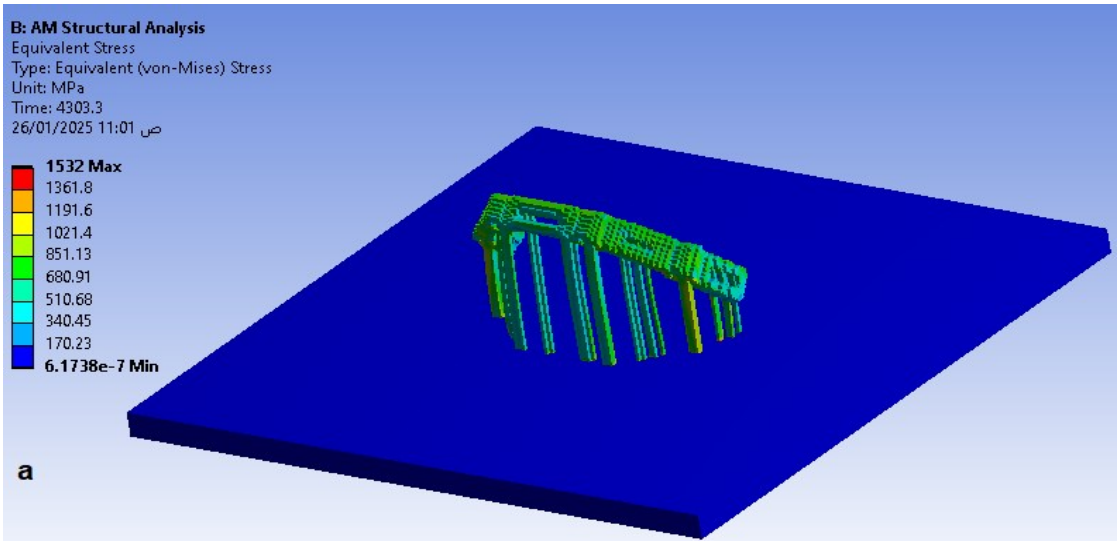
الشكل (3-47): التشوهات عند الزاوية30 °مع معالجة حرارية.



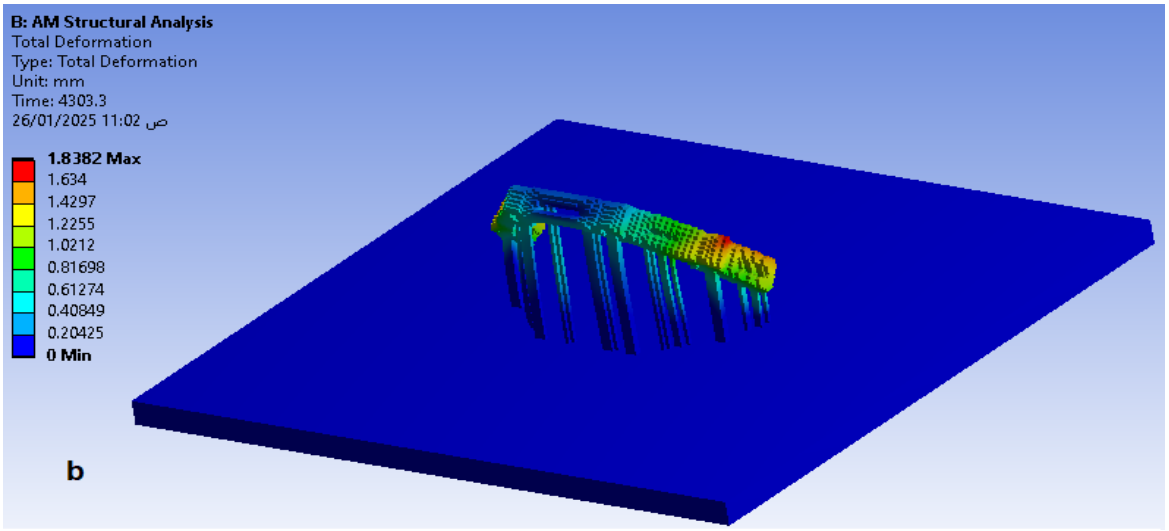
الشكل (3-48): الاجهادات عند الزاوية30 °مع معالجة حرارية ونزع دعائم.



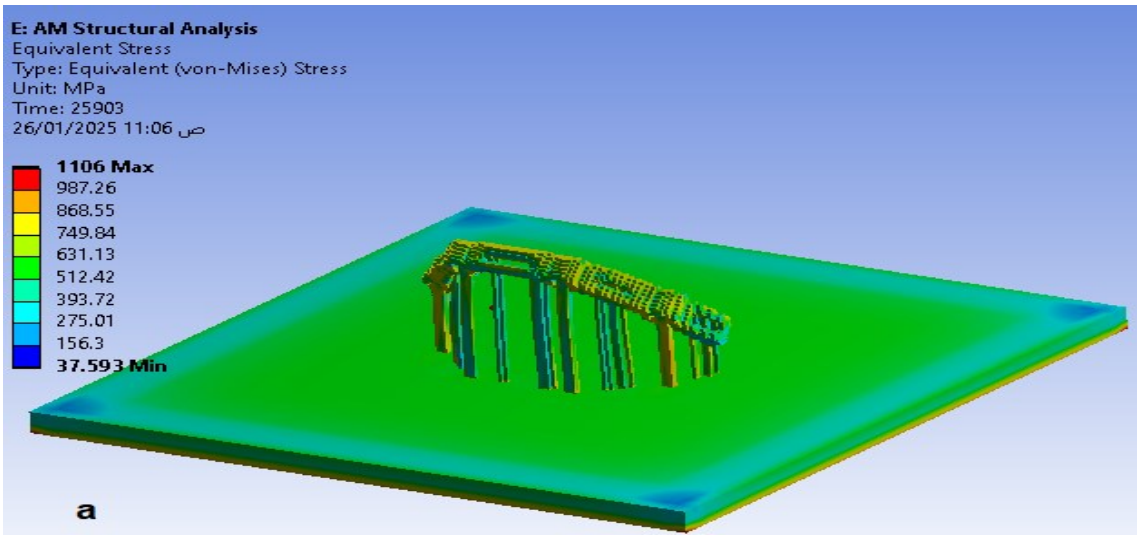
الشكل (3-49): التشوهات عند الزاوية30 °مع معالجة حرارية ونزع دعائم.



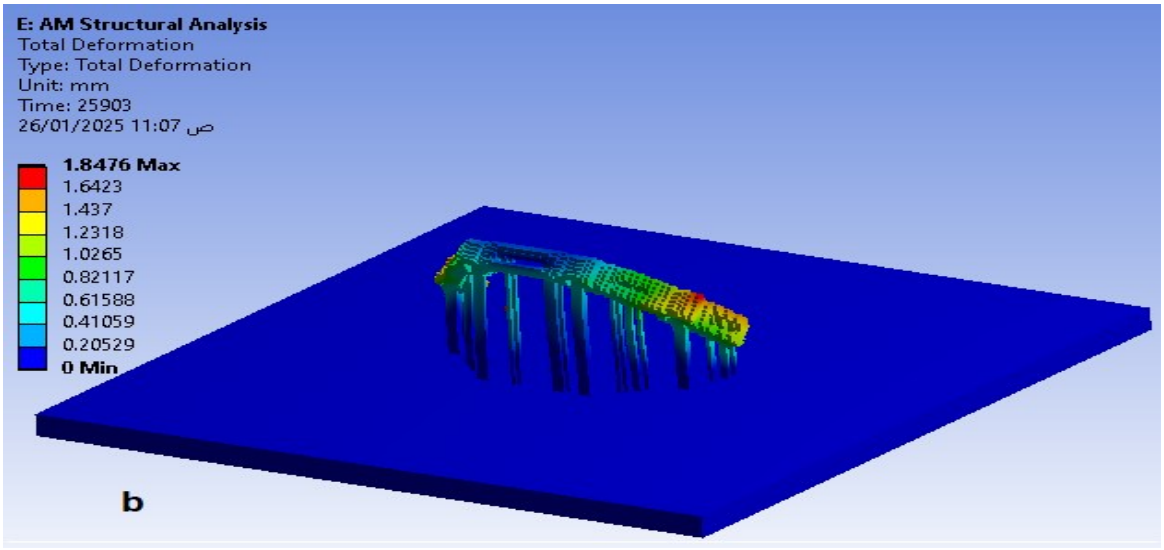
الشكل (3-50): الاجهادات عند الزاوية45 °بدون معالجة حرارية.



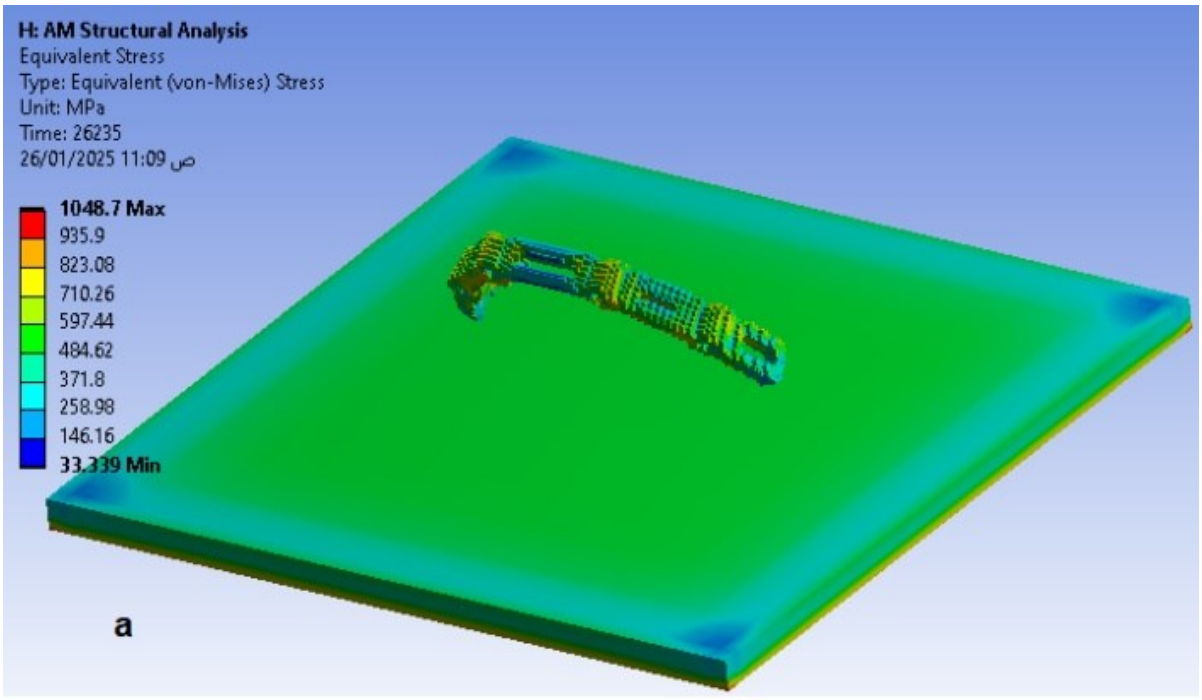
الشكل (3-51): التشوهات عند الزاوية45 °بدون معالجة حرارية.



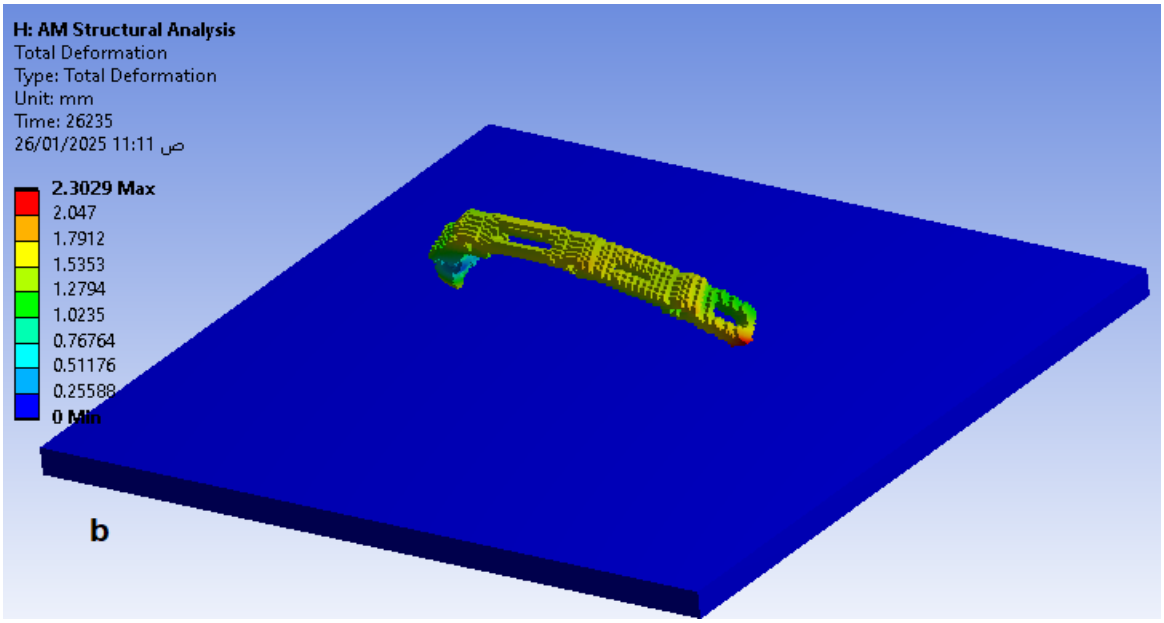
الشكل (3-52): الاجهادات عند الزاوية45 °مع معالجة حرارية.



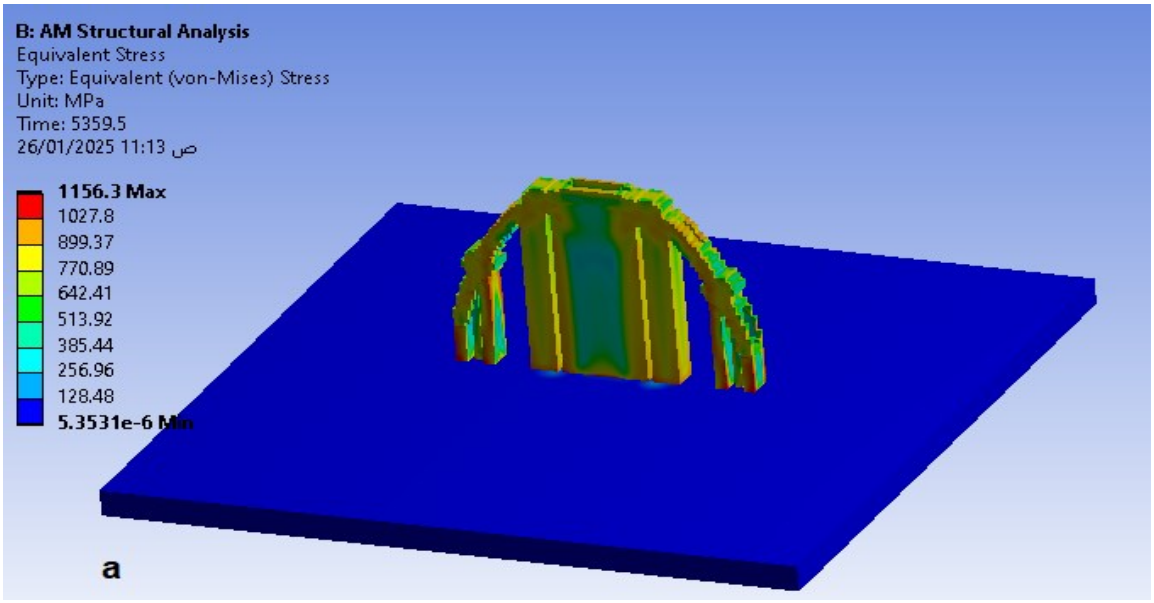
الشكل (3-53): التشوهات عند الزاوية45 °مع معالجة حرارية.



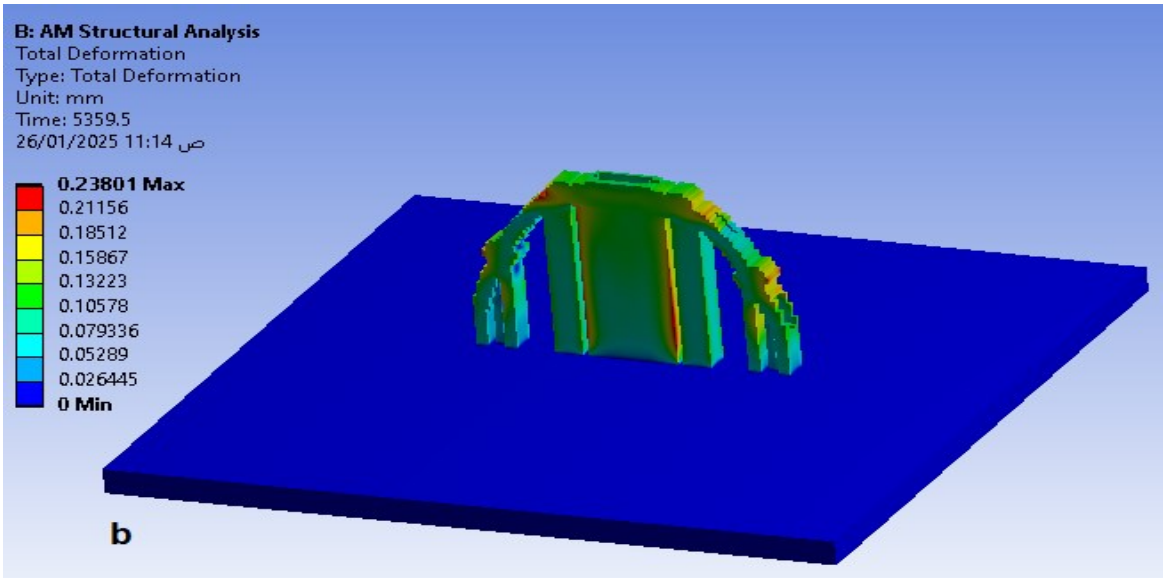
الشكل (3-54): الاجهادات عند الزاوية45 °مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم.



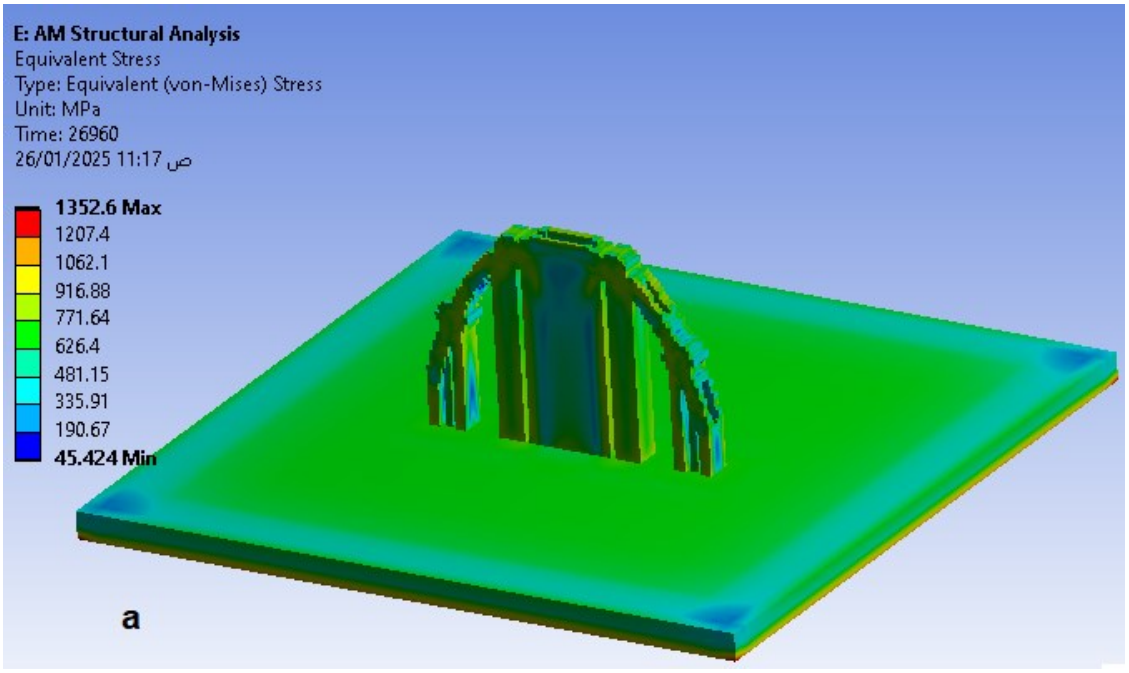
الشكل (3-55): التشوهات عند الزاوية45 °مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم.



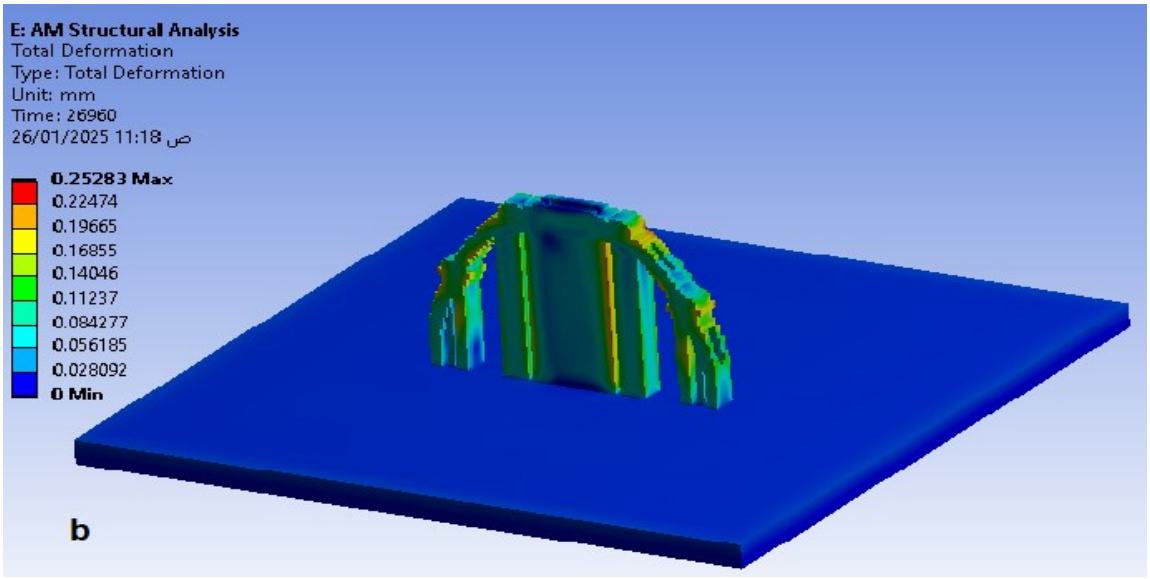
الشكل (3-56): الاجهادات عند الزاوية90 °بدون معالجة حرارية.



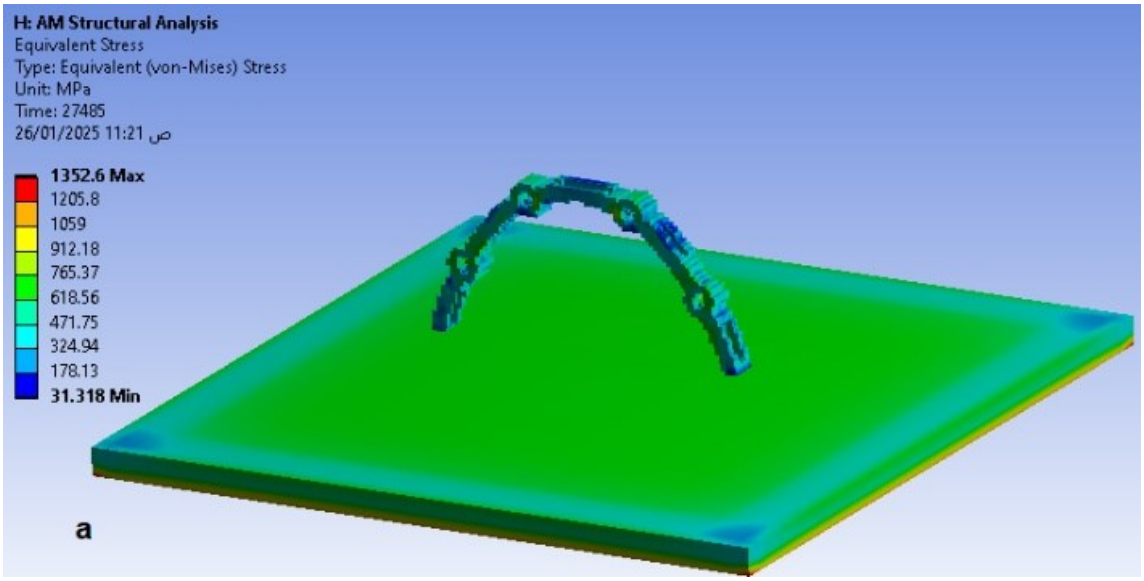
الشكل (3-57): التشوهات عند الزاوية90 oبدون معالجة حرارية.



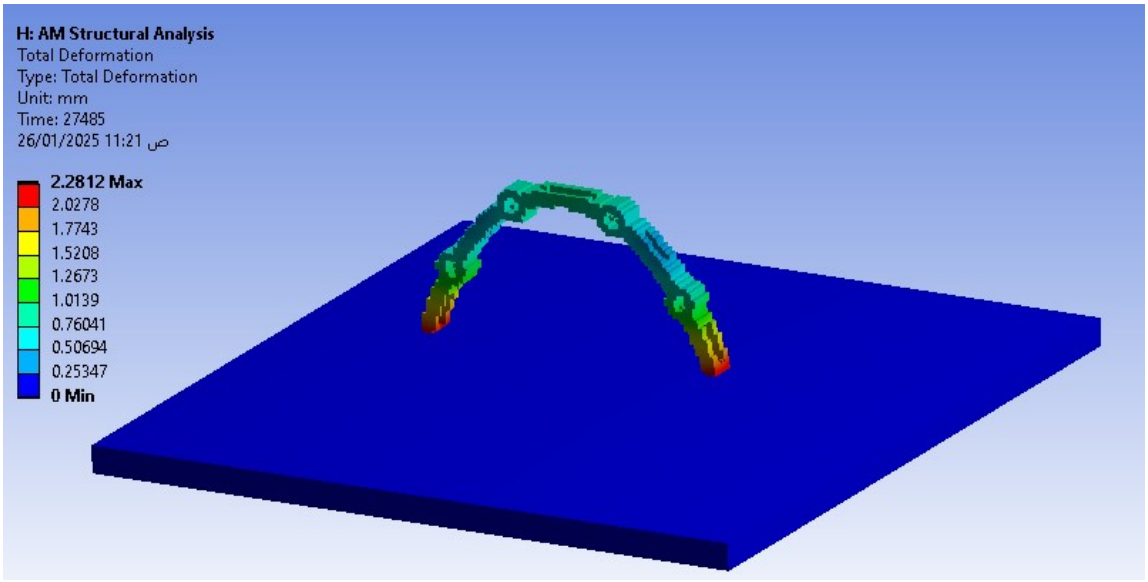
الشكل (3-58): الاجهادات عند الزاوية90 °مع معالجة حرارية.



الشكل (3-59): التشوهات عند الزاوية90 °مع معالجة حرارية.



الشكل (3-60): الاجهادات عند الزاوية90 °مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم.

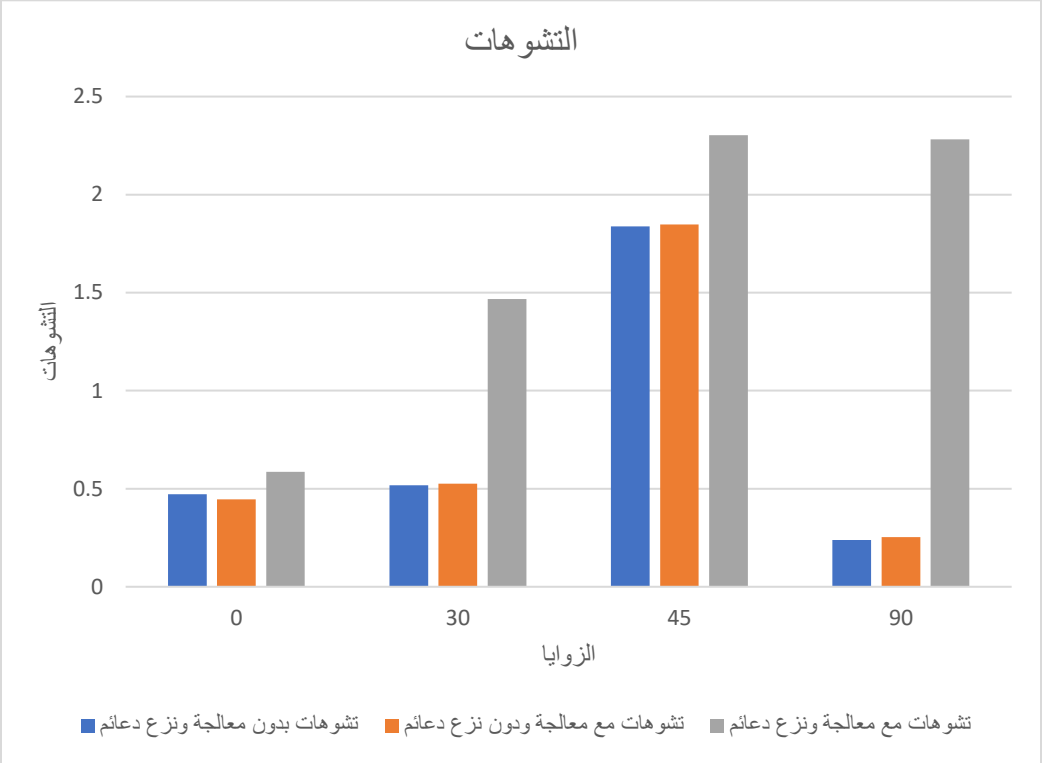


الشكل (3-61): التشوهات عند الزاوية90 °مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم.

جدول (3-4): التشوهات في كل حالات الدراسة

	التشوهات (mm)			
	الزاوية			
	0^o	30^o	45^o	90^o
بدون معالجة حرارية	0.4719	0.51804	1.8382	0.2381
مع معالجة حرارية ودون نزع دعائم	0.4463	0.5260	1.847	0.2528
مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم	0.5859	1.467	2.302	2.281

المخطط (3-1): علاقة التشوهات بزاوية البناء.

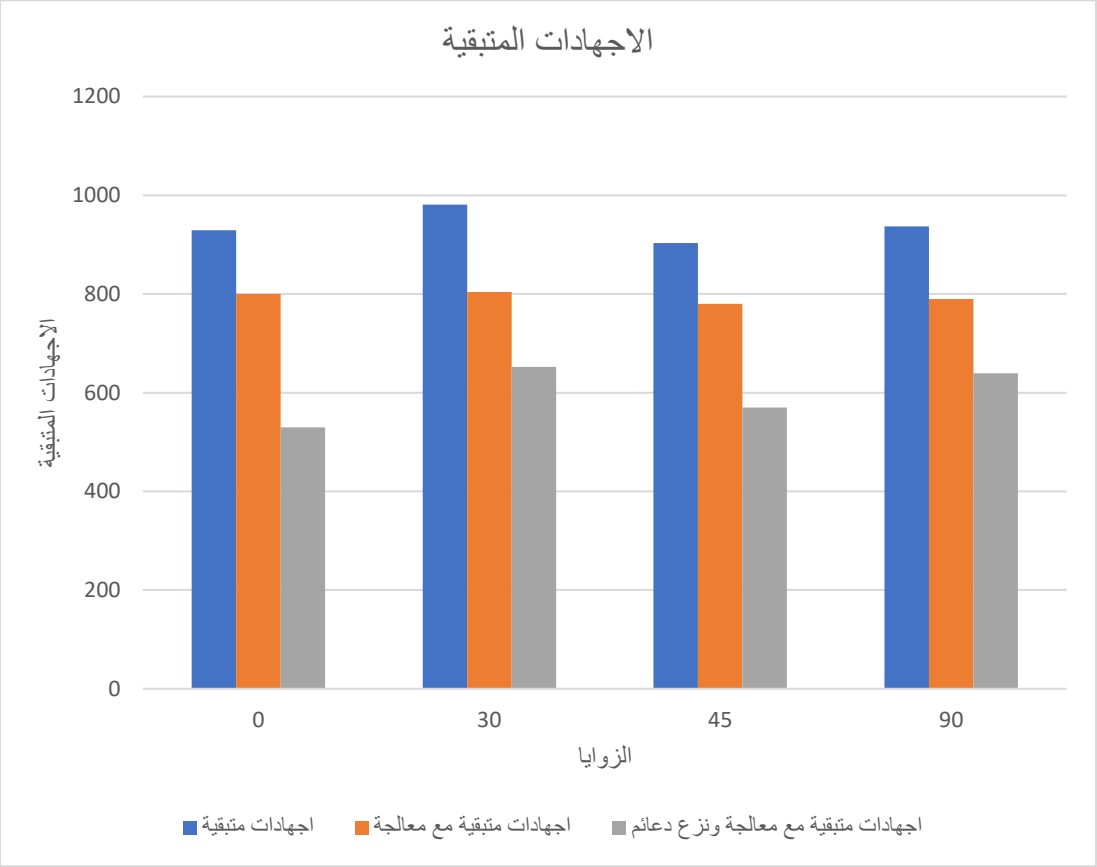


تزداد قيم التشوهات مع ازدياد زاوية البناء من 0° الى 45° لجميع الحالات المدروسة (بدون معالجة حرارية ودون نزع دعائم – مع معالجة حرارية ودون نزع دعائم– مع معالجة حرارية ونزع دعائم). أما الزاوية 90° فأعطت قيم تشوهات أقل من بقية الزوايا لحالتي البناء بدون معالجة حرارية أو مع معالجة حرارية، وهنا نلاحظ تأثير الشكل الهندسي (القوسي) في تغير حجم التشوهات، حيث عند الزاوية 90° تقل مساحة المقطع العرضي لترسيب طبقة المعدن مما يقلل مقدار التشوهات النهائية للقطعة المدروسة، لكن التشوه في حالة نزع الدعائم كان أكبر من كل الحالات السابقة وقد يعود السبب الى الحاجة الى دعائم إضافية أو تغير طريقة توزيع الدعائم مكان التشوهات المرتفعة أو ممكن يكون السبب تشوه العناصر المنتهية وإعطاء قيم مرتفعة.

جدول (3-5): الاجهادات في جميع حالات الدراسة

	الاجهادات المتبقية MPa			
الزاوية	0°	30°	45°	90°
بدون معالجة حرارية	929	981	903	937
مع معالجة حرارية ودون نزع دعائم	800	804	780	790
مع معالجة حرارية ومع نزع دعائم	530	652	570	639

المخطط (3-2): علاقة الاجهادات بزاوية البناء.



تزداد قيم الاجهادات مع ازدياد قيمة الزاوية ضمن المجال(0^o – 30^o) لجميع حالات الدراسة (بدون معالجة حرارية ودون نزع دعائم – مع معالجة حرارية ودون نزع دعائم – مع معالجة حرارية ونزع دعائم) بينما أعطت الزاوية 45^o اجهادات أقل من الزاويتين السابقتين (0^o ، 30^o) و لجميع حالات الدراسة، أما الزاوية 90^o فقد أعطت اجهادات أقل من الاجهادات التي ظهرت في كل من الزاوية 0^o و 30^o ، أما عند الزاوية 45^o فإن الاجهادات التي ظهرت كانت أعلى بقليل.

بما أن الاجهادات لكل حالات الدراسة أقل من حد الخضوع لخليطة التيتانيوم فهذا يعني أن العينة لن تنهار في حالات الدراسة لذلك يمكن اعتماد اختيار الاتجاه الأمثل للبناء بالنسبة للتشوهات هو الزاوية 90^o ومن ثم الزاوية 0^o ومن ثم 30^o ومن ثم 45^o.

3-2-1 الاجراء التجريبي:

تم تنفيذ العينات السابقة عند زوايا البناء الأربعة (0^o, 30^o, 45^o, 90^o) وذلك لدراسة علاقة الخصائص الميكانيكية بتغير زاوية البناء والتحقق من متانة العينة عند الزاوية 90^o بعد أن أظهرت نتائج النمذجة أنها الاتجاه الأمثل للبناء، وكذلك لدراسة تأثير زاوية البناء على حجم الدعائم والتي تعتبر كلفة إضافية في تصنيع المنتج.

تم تنفيذ العينات باستخدام الطابعة Riton-D 150 وعند نفس الشروط الواردة في الجدول (3-2).



الشكل (3-61):صورة للعينات المطبوعة بعد الانتهاء من تنفيذها بالزوايا الأربعة.

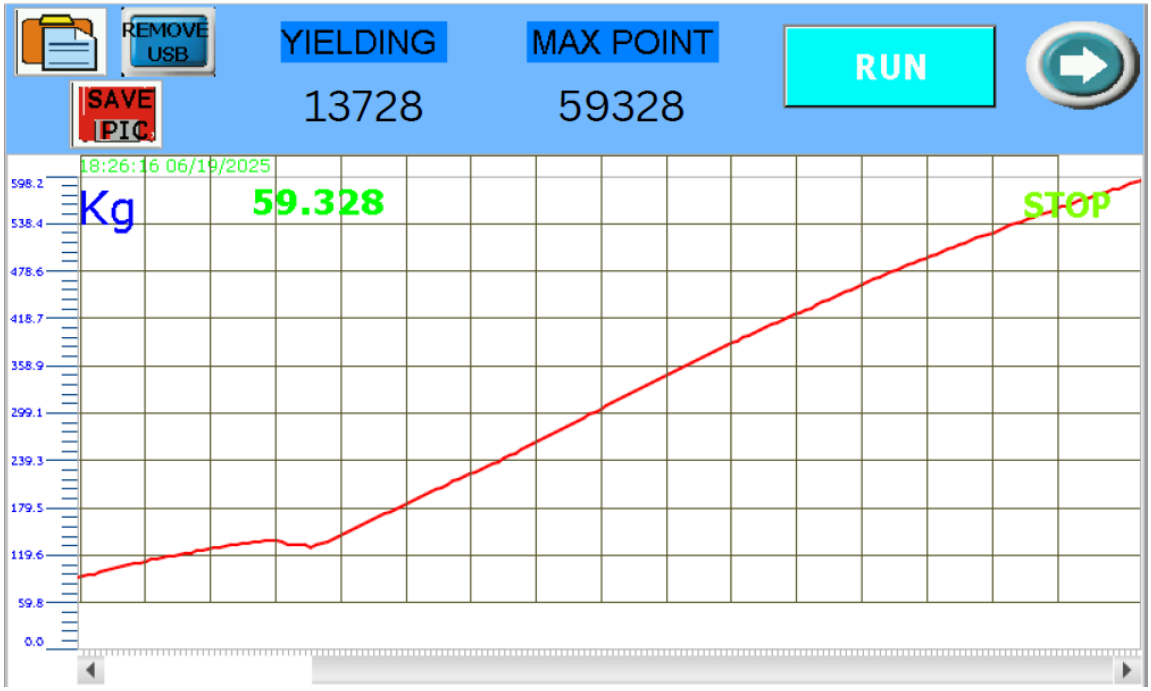
بعد نزع فك العينات من على طاولة البناء ونزع الدعائم، تم قياس وزن هذه الدعائم لكل زاوية بناء وإظهار النتائج بالجدول (3-6).

جدول (3–6): وزن الدعائم عند كل زاوية بناء

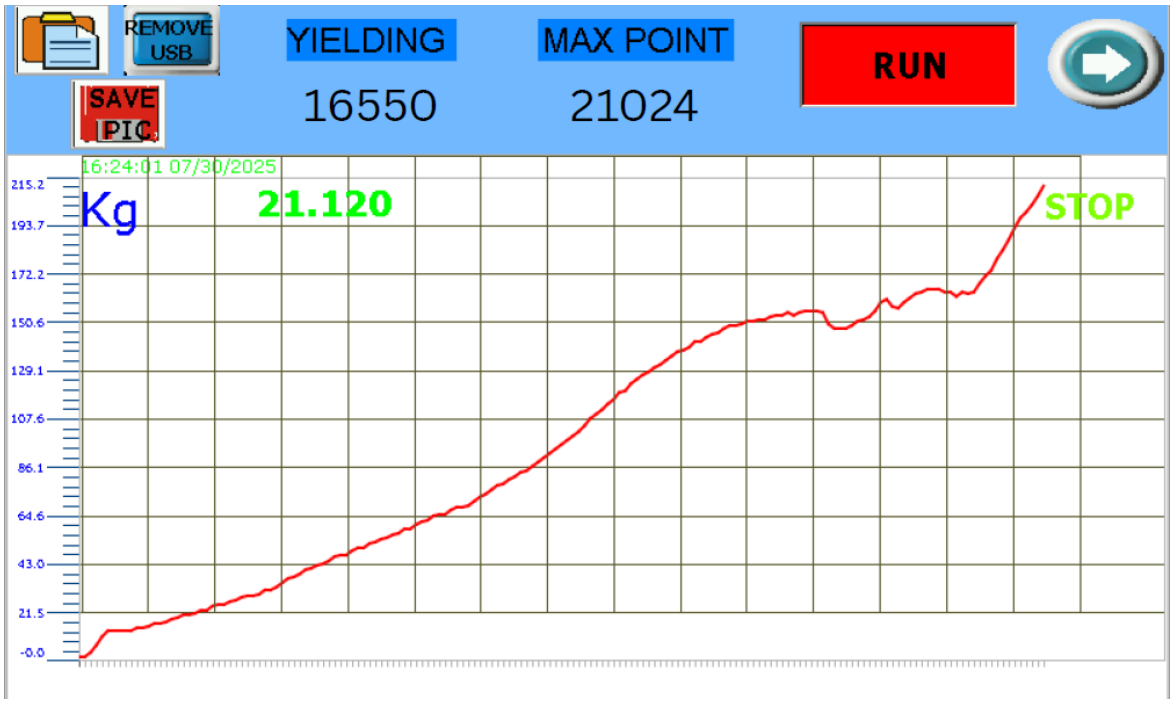
الزاوية	وزن الدعائم
0^o	5.5 g
30^o	5 g
45^o	4.5 g
90^o	4 g

تم ملاحظة تناقص وزن الدعائم بازدياد زاوية البناء، وقد تبين أن وزن الدعائم عند الزاوية 90^o كان أقلها وزناً وهو 4 g وأن وزن الدعائم قد انخفض بنسبة 30% عن وزنها عند الزاوية 0^o، وبالتالي تعتبر الزاوية 90^o هي الأفضل من حيث وزن الدعائم.

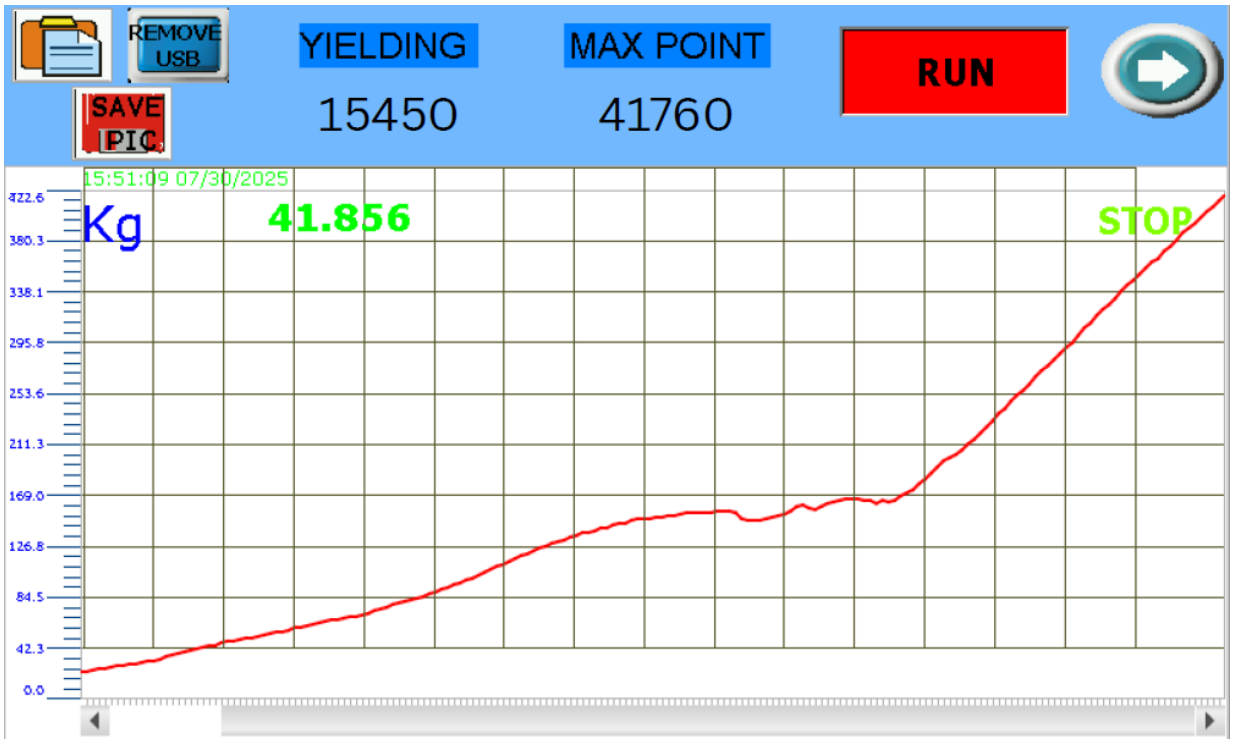
للتحقق من متانة العينات تم اجراء اختبار الضغط على نفس الجهاز السابق Forney بسرعة 2 mm/min ورسم منحني القوة – الاستطالة لمعرفة حد الخضوع لكل زاوية.



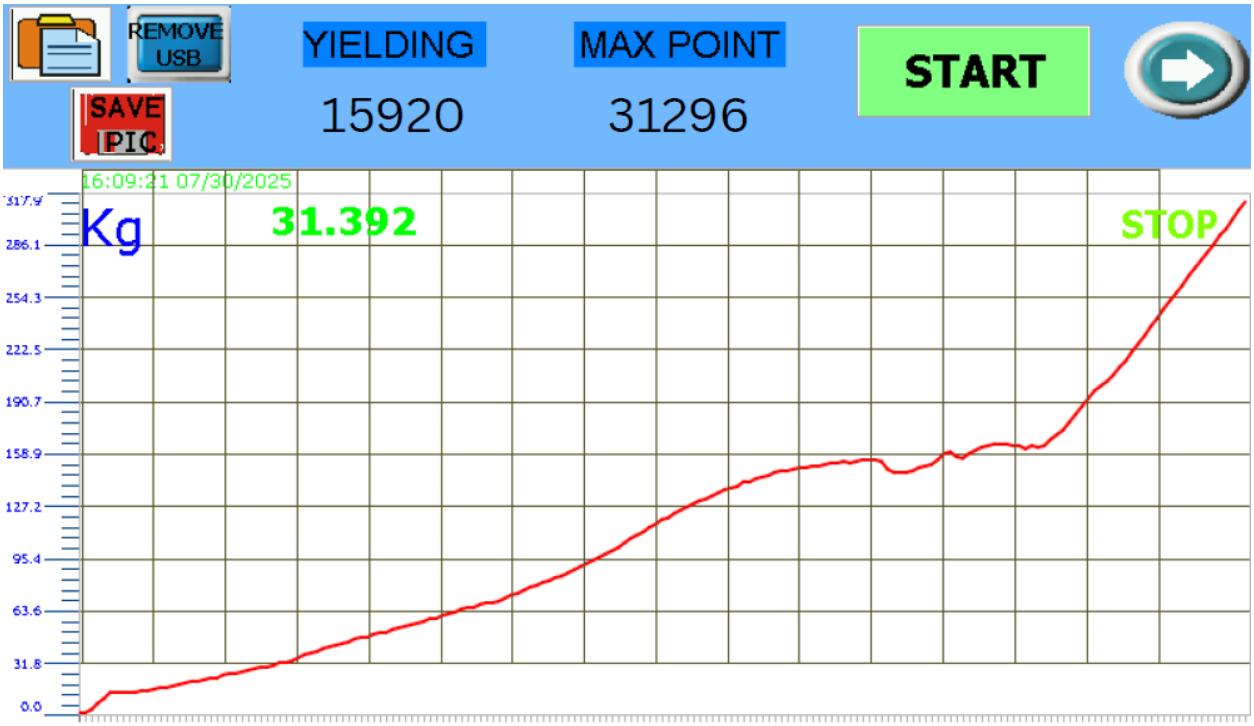
الشكل (3-62): منحني قوة-استطالة عند الزاوية 0°.



الشكل (3-63): منحني قوة-استطالة عند الزاوية 30°.



الشكل (3-64): منحني قوة-استطالة عند الزاوية 45°.



الشكل (3-65): منحني قوة-استطالة عند الزاوية 90°.

جدول (3-7): نتائج اختبار العينات عند زوايا الدراسة

90°	45°	30°	0°	الزاوية / نوع القراءة
156.121586	151.51274	162.3	134.62569	قوة الخضوع KN
1495.42	1451.27	1554.59	1289.51	اجهاد الخضوع MPa
928.72898	898.79908	977.33073	907.54661	قوة التحطم KN
8895.87	8609.18	9361.4	8692.97	اجهاد التحطم MPa

بمقارنة حد الخضوع عند الزاوية 90^o نجد أن قيمته 1495.42 MPa وهي أعلى من حد الخضوع عند الزاوية 0^o وأعلى من حد الخضوع لخليطة التيتانيوم والذي يبلغ 1170 Mpa وبالتالي تعتبر الزاوية 90^o هي الاتجاه الأمثل للبناء حاسوبياً وتجريبياً ومن حيث وزن الدعائم.

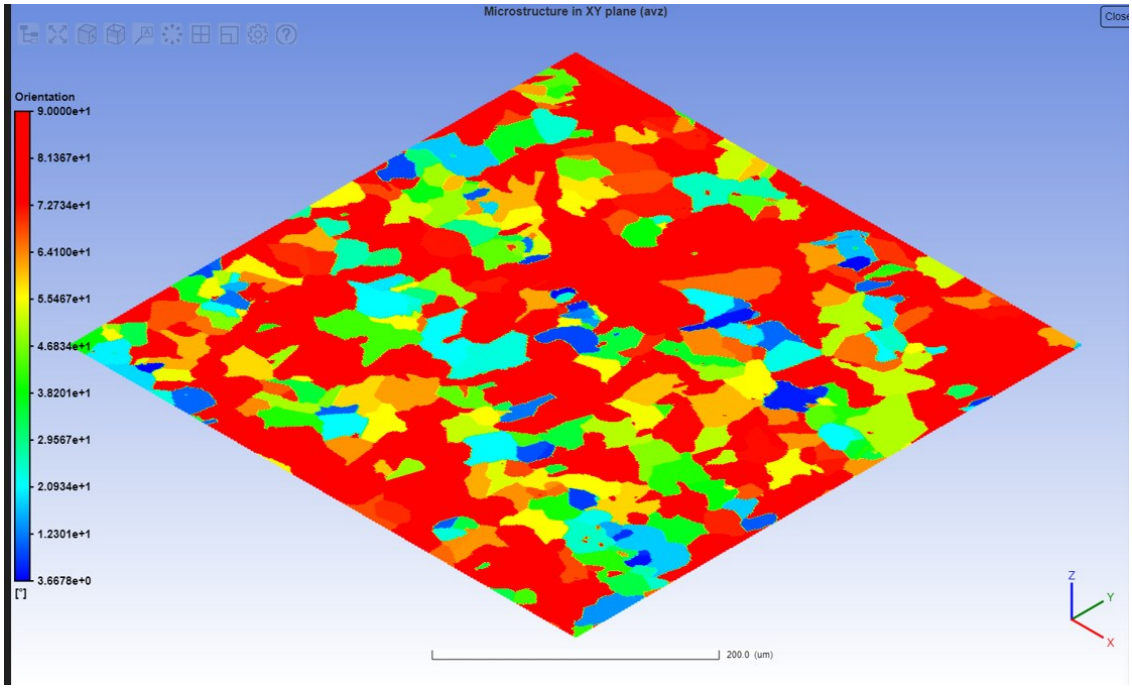
3-3 دراسة البنية المجهرية للمادة.

في المواد البلورية يتم التحكم بخواص المادة أساساً عن طريق خواص البنية المجهرية مثل حجم الحبيبات و شكل الحبيبات واتجاه الحبيبات وتركيب المادة. يمكن لهذه الخواص أن تتغير بشكل واضح عند شروط تشغيل مختلفة وبالتالي تتغير الخواص الميكانيكية للمادة. وبسبب الطبيعة المعقدة لعملية التصنيع بالإضافة حيث تتعرض المادة لدورات تسخين مختلفة يتنج بنية بلورية غير متجانسة حيث تختلف هذه البنية حسب شروط العملية وبالتالي يظهر تباين في الخواص الميكانيكية[48].

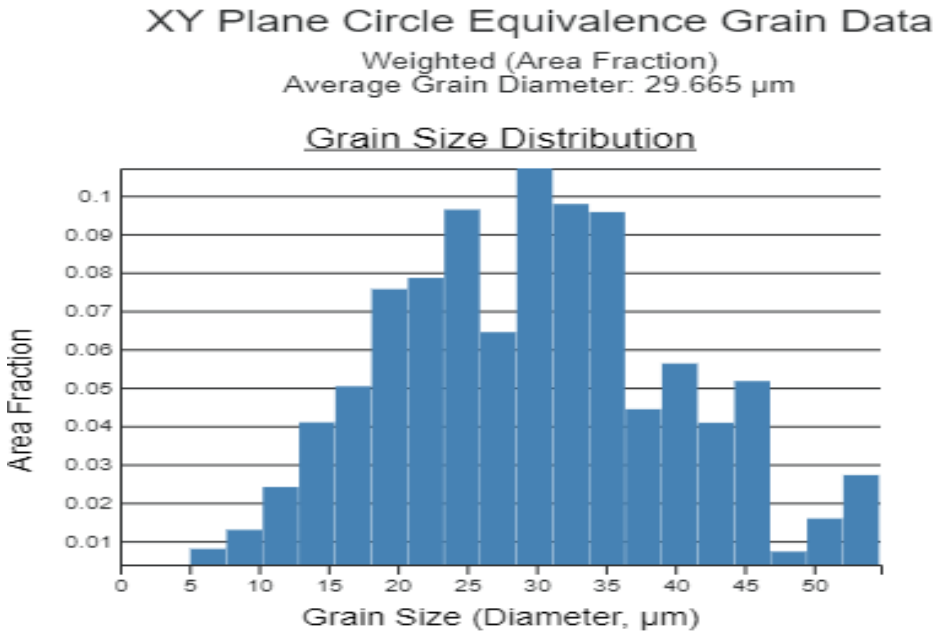
لذا فان محاكاة البنية البلورية خلال عملية التصنيع يساعد على ضبط بارامترات عملية التصنيع والحصول على بنية بلورية متجانسة.

إن لاتجاه الحبيبات دور حاسم في الخواص الميكانيكية للمنتج، لذا فإن كان حجم الحبيبات واتجاهاتها موحداً في كل المستويات، فإن الخواص الميكانيكية للمنتج تكون موحدة [48].

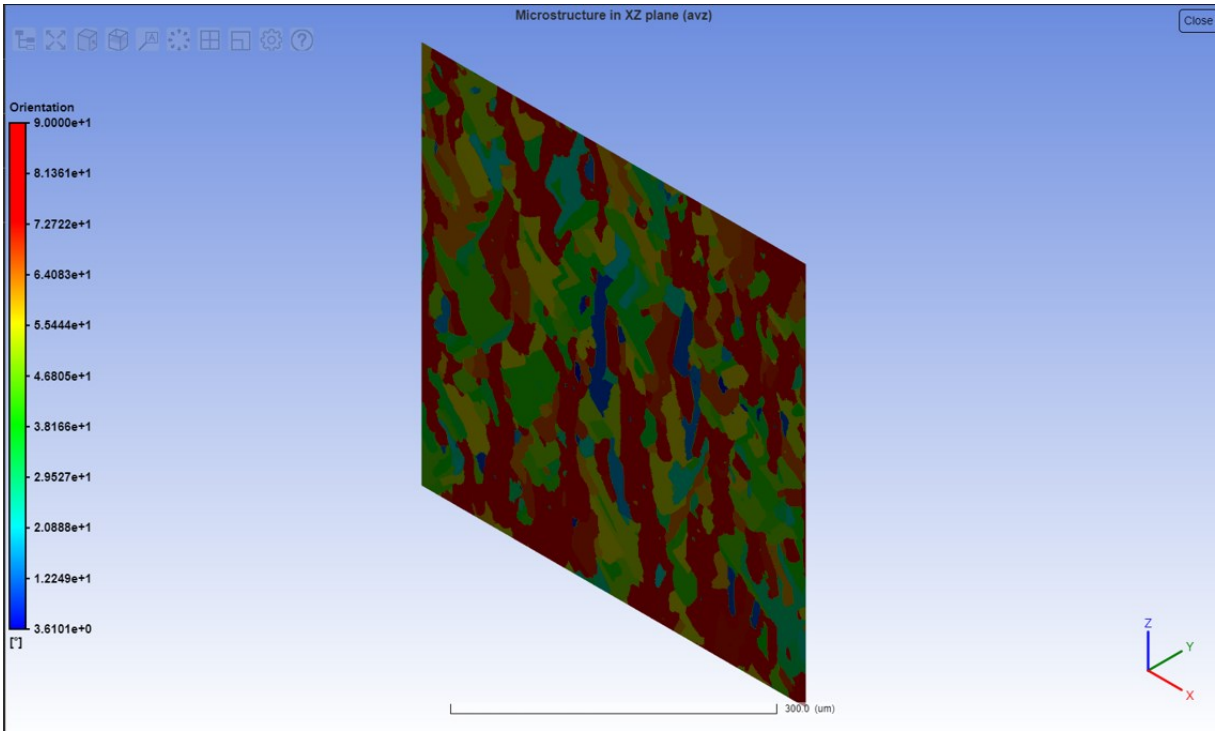
تم في هذه المرحلة تحليل البنية البلورية عن طريق استخدام Ansys additive science وحساب حجم الحبيبات واتجاهاتها في المستويات الثلاثة للتأكد من أن البارامترات المستخدمة في عملية البناء (شدة الليزر، سرعة الطباعة، قطر شعاع الليزر وسماكة طبقة البناء) تعطي بنية بلورية متجانسة وبالتالي خواص ميكانيكية جيدة [48]. وكانت النتائج كما تظهر في الأشكال التالية:



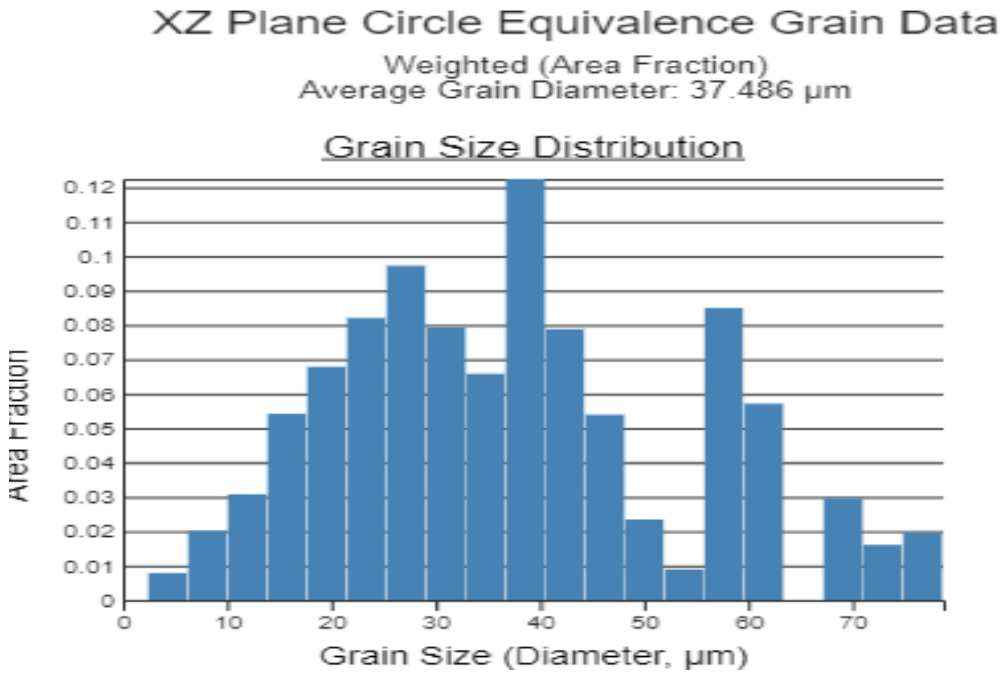
الشكل (3-66): حجم الحبيبات واتجاهاتها بالمستوي XY.



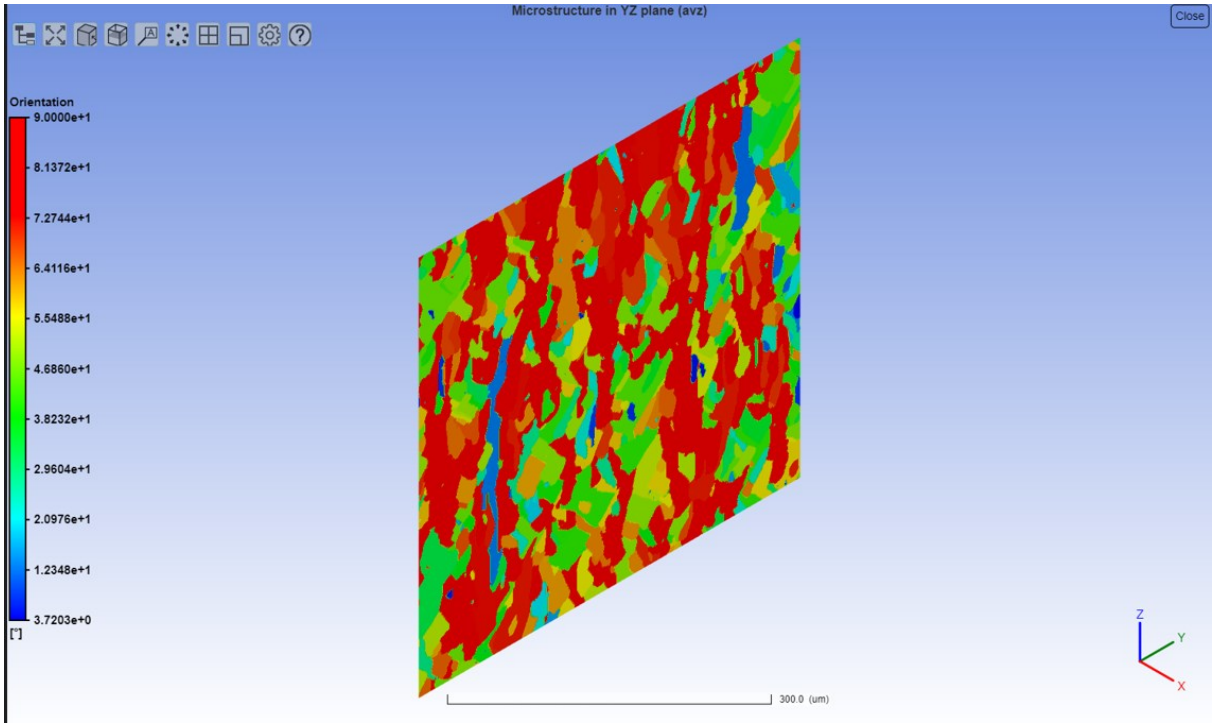
الشكل (3-67): توزع حجم الحبيبات في المستوي XY.



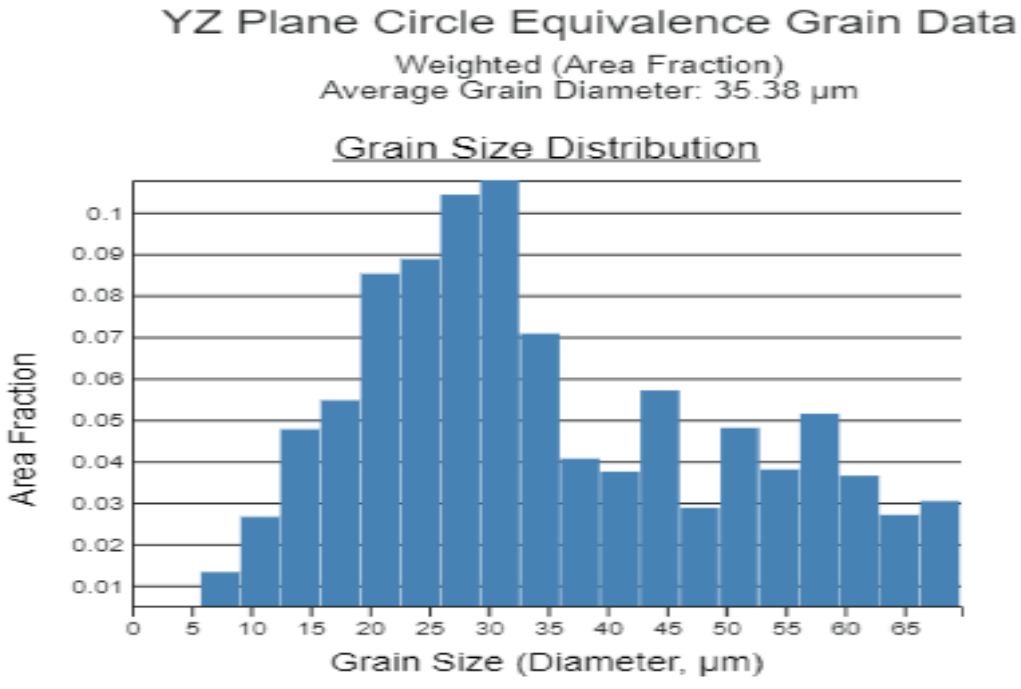
الشكل (3-68): حجم الحبيبات واتجاهاتها بالمستوي XZ.



الشكل (3-69): توزع حجم الحبيبات في المستوي XZ .



الشكل (3-70): حجم الحبيبات واتجاهاتها في المستويYZ.



الشكل (3-71): توزع حجم الحبيبات في المستوي YZ.

بعد مراجعة حجم الحبيبات وتوزعها اللوني في المستويات الثلاثة لوحظ اختلافات صغيرة بين المستويات الثلاثة، وبالتالي يمكن اعتبار أن البنية متجانسة والشروط التي تمت عندها عملية الطباعة مناسبة[48].

3-4 النتائج والمناقشة:

3-4-1 نتائج مرحلة الأمثلة:

1. ساعد تطبيق الأمثلة الهيكلية في حالة التحميل الأولى الى خفض وزن الهيكل بنسبة 17.5%. أما في حالة التحميل الثانية فقد تم تخفيض وزن الهيكل بنسبة 27.5%، وفي حالة التحميل الثالثة انخفض وزن الهيكل بنسبة 22.5%. أما بالنسبة للإجهادات ففي حالات التحميل الثلاثة بقيت اجهادات الهيكل تحت حد الخضوع لمادة التيتانيوم والذي تبلغ قيمته1170 MPa وبالتالي يمكننا القول إن التصاميم الناتجة عن الأمثلة الهيكلية صالحة للتطبيق والتنفيذ. أما بالنسبة للأمثلة الخلوية تم تخفيض وزن الهيكل بنسبة 15%.
2. حالة التحميل الثانية هي أفضل حالة من حالات الأمثلة الهيكلية من حيث تخفيض وزن الهيكل وانخفاض الاجهادات في الهيكل مع بقاء التشوهات نفسها قبل وبعد عملية الأمثلة، وبالتالي يمكن اعتبار هذه التصميم هو التصميم الأمثل للهيكل .
3. تناقص حد الخضوع للعينات المطور تصميمها باستخدام الأمثلة الهيكلية مع ازدياد نسبة تخفيض المادة. حيث يلاحظ أن أقل حد خضوع هو للعينة التي بلغ نسبة تخفيض وزنها 27.5% وهذه نتيجة منطقية، ومع ذلك بقي حد الخضوع لهذه العينة والذي قيمته 1289.51 MPa أعلى من حد الخضوع لمعدن التيتانيوم والذي قيمته 1170 MPa وذلك بسبب خضوع العينات لعملية معالجة حرارية لاحقة بعد عملية الطباعة.

3-4-2 نتائج مرحلة اختيار الاتجاه الأمثل للبناء:

1. تزداد قيم الاجهادات ضمن مجال من(30^o - 0^o) لجميع حالات الدراسة (بدون معالجة حرارية ودون نزع دعائم - ومع معالجة حرارية ودون نزع دعائم - ومع معالجة حرارية ونزع دعائم- بينما أعطت الزاوية 45^o اجهادات أقل من الزاويتين السابقتين ولكل حالات الدراسة، أما الزاوية 90^o فقد أعطت اجهادات أقل من الزاوية 0^o و30^o وأعلى بقليل من الزاوية 45^o.
2. قيم التشوهات تسلك نفس منحى سلوك الاجهاد. إذ تزداد قيم التشوهات مع ازدياد زاوية البناء لحالات الزوايا من 0^o الى 45^o وفي جميع حالات الدراسة (بدون معالجة حرارية ودون نزع - دعائم ومع معالجة حرارية ودون نزع دعائم - ومع معالجة حرارية ونزع دعائم). أما الزاوية 90^o فأعطت قيم تشوهات أقل من جميع الزوايا لحالة البناء بدون معالجة حرارية أو مع معالجة حرارية، وهذا أظهر أن الشكل الهندسي (القوسي) له دورٌ في تغير حجم التشوهات، فعند الزاوية 90^o تقل مساحة المقطع العرضي لترسيب طبقة المعدن مما يقلل مقدار التشوهات النهائية للقطعة المدروسة، لكن التشوه في حالة نزع الدعائم كان أكبر من كل الحالات السابقة، والسبب في ذلك قد يعود الى الحاجة الى دعائم إضافية أو تغيير طريقة توزيع الدعائم بأماكن التشوهات المرتفعة أو يمكن أن يكون السبب تشوه في العناصر المنتهية فأعطت قيم مرتفعة.
3. بما أن الاجهادات لكل حالات الدراسة أقل من حد الخضوع لمعدن التيتانيوم فهذا يعني أن العينة لن تنهار في جميع حالات الدراسة، لذلك يمكن اعتماد اختيار الاتجاه الأمثل للبناء بالنسبة للتشوهات الزاوية 90^o ومن ثم الزاوية 0^o ومن ثم 30^o ومن ثم 45^o.
4. يزداد حد الخضوع للعينات مع ازدياد زاوية البناء إلى الزاوية 30^o، وقد انخفض قليلاً حتى الزاوية 45^o، ثم عاود الارتفاع حتى الزاوية 90^o، حيث يعود هذا الانخفاض الى الاجهادات

المتبقية، علماً بأن العينات أعطت نفس السلوك مما يدل على وجود علاقة بين حد الخضوع والاجهادات المتبقية.

5. يساعد تغير زاوية البناء على تقليل حجم الدعائم حيث بلغ وزن الدعائم 5.5g عند الزاوية 0^o أما عند الزاوية 30^o فقد بلغ 5g، وعند الزاوية 45^o بلغ 4.5g وعند الزاوية 90^o بلغ 4g.

وبذلك نستنتج أن تغيير زاوية البناء أدى إلى توفير 30% من وزن الدعائم وهذا يعد توفيراً إضافي في تكلفة تصنيع العينات. وبمقارنة قيمة حد الخضوع عند الزاوية 90^o والتي بلغت 1495.42 MPa نجد أنها أعلى من حد الخضوع عند الزاوية 0^o وأعلى من حد الخضوع لمادة التيتانيوم، وبالتالي تعتبر الزاوية 90^o هي الزاوية الأمثل لتصنيع هذه العينة حاسوبياً وتجريبياً ومن حيث وزن الدعائم.

3-5 مقارنة نتائج هذه الدراسة مع الدراسات المرجعية:

بالعودة للأبحاث المتعلقة بالأمثلة الهيكلية لقطع من التيتانيوم ذات التطبيقات الحيوية فإن أعلى نسبة تخفيض بالوزن وردت في الدراسة (Carnicero et al 2021) وهي 25%، بينما في هذا البحث فقد تم تخفيض وزن المنتج بنسبة 27.5% .

أما بالنسبة للأبحاث التي قدمت دراسة أمثلة للهيكل ومن ثم نمذجة عملية الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد كما جاء في البحث (Weinhold et al 2021) فقد اقتصر البحث على دراسة علاقة التشوهات بتغير زوايا البناء، ولم يتطرق لدراسة الاجهادات المتبقية، بينما قدمنا في بحثنا دراسة شاملة لعلاقة التشوهات والاجهادات المتبقية بزاوية البناء.

أما البحث (Sedlacek et al 2023) وبالرغم من تشابه المنهجية المتبعة فيه مع الدراسة المقدمة في هذا البحث الا أنه اقتصر فقط على النمذجة عند زاوية بناء 45^o ودراسة هذه الحالة بدون معالجة حرارية ونمذجة مع معالجة حرارية ونمذجة مع معالجة حرارية ونزع دعائم، بينما تم في هذا البحث دراسة أربع زوايا للبناء لجميع الحالات السابقة، وهذا أدى إلى تحديد زاوية البناء الأمثل التي تحقق أقل تشوهات وأقل اجهادات متبقية. وتنفيذ العينة عند هذه الزوايا ودراسة

أثر الزوايا على وزن الدعائم وهذا مالم تطرقه جميع الدراسات السابقة واختبار العينة بالإضافة إلى اختبار الضغط للتحقق من متانتها، وبالتالي اختيار الاتجاه الأمثل الذي تتطابق فيه النتائج الحاسوبية مع التجريبية من حيث وزن الدعائم.

أما بالنسبة للدراسات السابقة التي تطرقت الى دراسة أثر زاوية البناء على الخصائص الميكانيكية للخليطة المدروسة Ti-6Al-4V بشكل تجريبي ولم يتم التطرق الى دراسة أثر تغيير زاوية البناء على الخصائص الميكانيكية للمنتج الحقيقي، بل تم دراسة أثر التغيير فقط على عينات نظامية.

لقد ساعدت دراسة أثر تغير زاوية البناء على الخصائص الميكانيكية لمنتج حقيقي وربطه مع نتائج النمذجة الى الاستنتاج بوجود علاقة بين الاجهادات المتبقية التي تم حسابها بواسطة النمذجة وحد الخضوع الذي تم حسابه تجريبياً . إضافة الى ذلك فقد تطرق البحث إلى دراسة للبنية المجهرية بشكل حاسوبي لمعرفة مدى تجانس البنية المجهرية والتأكد من بارامترات الطباعة.

6-3 الاستنتاجات:

1. أظهرت الدراسة فعالية تطبيق الأمثلة الهيكلية على عينة الدراسة حيث تم تخفيض وزن الهيكل بنسبة 27.5% وهي أعلى من نسب تخفيض الوزن الواردة ضمن الدراسات السابقة، مع انخفاض اجهادات التصميم في النموذج الأمثل بنسبة 13.26% مع ضمان متانة التصميم المقترح، وذلك عن طريق اجراء اختبار الضغط ومقارنة حد الخضوع للعينة مع حد الخضوع لمعدن التيتانيوم حيث كان حد الخضوع للعينة أعلى من حد الخضوع للمعدن.
2. ساعد التحليل باستخدام طريقة العناصر المنتهية الى فهم معمق لآلية البناء ودراسة الاحتمالات الممكنة عند تغير زوايا البناء ولشروط عملية الطباعة شروط المعالجة الحرارية المطبقة للتخلص من الاجهادات المتبقية المرتفعة.

3. ساعد التحليل باستخدام طريقة العناصر المنتهية الى فهم معمق في الية البناء ودراسة الاحتمالات الممكنة عند تغير زوايا البناء، وشروط عملية الطباعة والمعالجة الحرارية المطبقة للتخلص من الاجهادات المتبقية المرتفعة.
4. ساعد تغير زاوية البناء على تخفيض وزن الدعائم في عملية الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد وذلك بنسبة 30% والتي تعد كلفة إضافية وتم التحقق من متانة العينة عند الزاوية 90^o والتي تحقق أقل وزن للدعائم عن طريق اجراء اختبار ضغط ومقارنة حد الخضوع عند الزاوية 90^o مع حد الخضوع لمعدن التيتانيوم وكان حد الخضوع للعينة المطبوعة أعلى من حد الخضوع للمعدن وبالتالي تعتبر الزاوية 90^o مناسبة لهذه العينة.
5. ساعد تحليل الخواص الميكانيكية عند زوايا بناء مختلفة الى معرفة السلوك الميكانيكي للقطع المصنعة بالطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد إذ أظهرت الدراسة وجود علاقة بين حد الخضوع والاجهادات المتبقية.
6. بعد مراجعة حجم الحبيبات وتوزعها اللوني في المستويات الثلاثة لوحظ أن الاختلافات بين المستويات الثلاثة كانت صغيرة، وبالتالي يمكن اعتبار أن البنية متجانسة والشروط التي تمت عندها عملية الطباعة مناسبة.

3-7 التوصيات:

1. تطوير العمل على نتائج هذه الدراسة ودراسة أثر تغير شدة الليزر وسرعة المسح واستراتيجية المسح وسماكة طبقة الترسيب على خواص المنتجات المصنعة بالطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية عن طريق محاكاة أثر تغير هذه البارامترات باستخدام طريقة العناصر المنتهية قبل تنفيذ المنتج واختيار البارامترات المثلى لعملية التصنيع وذلك للتمكن من الحصول على منتج صحيح من المرة الأولى للطباعة.
2. اتباع المنهجية المقترحة في هذه الدراسة على أنواع أخرى من طرق الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية كون النسخ الحديثة من برنامج ANSYS قد طورت حزم برمجية منفصلة لكل نوع من أنواع الطباعة ثلاثية الابعاد المعدنية وبالتالي يمكن أمثلة بارامترات عملية التصنيع قبل البدء بتنفيذ العينة وذلك للحصول على منتج صحيح من المرة الأولى للطباعة.

3. يمكن الاستفادة من طريقة العناصر المنتهية في التحقق من صلاحية خلائط معدنية جديدة لاستخدامها في طريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية.
4. تطوير البحث من خلال برنامج ANSYS Additive science والاستفادة من الإمكانات الحسابية المتطورة التي يوفرها في أمثلة بارامترات عملية الطباعة للحصول على بنية ميكروية متجانسة، ثم ربط النتائج المستخلصة من هذا البرنامج مع أدوات الذكاء الصنعي من أجل استنتاج الخواص الميكانيكية من خلال تحليل صور البنية الميكروية.

3-8 الخاتمة:

قدم هذا البحث منهجية متكاملة لدراسة عملية الطباعة المعدنية ثلاثية الأبعاد باستخدام طريقة العناصر المنتهية من خلال دراسة كل المراحل بدءاً من تطوير تصميم المنتج عن طريق تطبيق الأمثلة الهيكلية عليه، ثم تخفيف وزنه وبالتالي التقليل من كلفة تصنيعه، ومن ثم محاكاة لعملية الطباعة ثلاثية الأبعاد مع دراسة أثر تغير زاوية البناء على كل من الاجهادات المتبقية والتشوهات. بذلك فإن هذا العمل يسهم في اختيار الاتجاه الأمثل للبناء، ومن ثم التحقق من تجانس البنية المجهرية والتأكد من عدم وجود حبيبات غير منصهرة، وبالتالي التحقق من صلاحية بارامترات الطباعة.

وبالتنفيذ التجريبي أظهرت العينة المؤمثلة متانة عالية عند الاختبار الميكانيكي وذلك عند تطابق النتائج الحاسوبية مع الاختبار الميكانيكي، وكذلك تطابق الاتجاه الأمثل الذي تم التوصل له حاسوبياً مع الاتجاه الأمثل تجريبياً والذي أعطى متانة أكبر مع تحقيق أقل وزن للدعائم.

بينت هذه الدراسة فعالية التخطيط لعملية التصميم وتصنيع منتجات الطباعة ثلاثية الأبعاد المعدنية باستخدام طريقة العناصر المنتهية ودورها برفع كفاءة عملية الطباعة، حيث ساهمت بخفض وزن المنتج بنسبة 27.5% ووزن الدعائم بنسبة 30% مع المحافظة على متانة المنتج.

المراجع:

[1] Maintz, M., Seiler, D., Thieringer, F. M., & de Wild, M. (2022). Topology-optimized patient-specific osteosynthesis plates.

[2] Weinhold, B., Heck, B., Albright, A., Wang, K., Grote, J. M., Adeniji, E., ... & Thompson, S. (2021). Simulation of the Laser-Powder Bed Fusion Process for Determining the Effects of Part-to-Substrate Location and Orientation on Distortion in a Connecting Rod.

[3] Baghi, A. D., Nafisi, S., Hashemi, R., Ebendorff-Heidepriem, H., & Ghomashchi, R. (2021). Experimental realisation of build orientation effects on the mechanical properties of truly as-built Ti-6Al-4V SLM parts. *Journal of Manufacturing Processes*, *64*, 140-152.

[4] Murchio, S., Dallago, M., Zanini, F., Carmignato, S., Zappini, G., Berto, F., ... & Benedetti, M. (2021). Additively manufactured Ti–6Al–4V thin struts via laser powder bed fusion: Effect of building orientation on geometrical accuracy and mechanical properties. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *119*, 104495.

[5] Hartunian, P., & Eshraghi, M. (2018). Effect of build orientation on the microstructure and mechanical properties of selective laser-melted Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, *2*(4), 69.

[6] Koper, D. C., Leung, C. A., Smeets, L. C., Laeven, P. F., Tuijthof, G. J., & Kessler, P. A. (2021). Topology optimization of a mandibular reconstruction plate and biomechanical validation. *journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, *113*, 104157.

[7] Kremer, R., Khani, S., Appel, T., Palkowski, H., & Foadian, F. (2022). Selective laser melting of CuSn10: Simulation of mechanical properties, microstructure, and residual stresses. *Materials*, *15*(11), 3902.

[8] Ren, S., Chen, Y., Liu, T., & Qu, X. (2019). Effect of build orientation on mechanical properties and microstructure of Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *50*(9), 4388-4409.

[9] Palmeri, D., Buffa, G., Pollara, G., & Fratini, L. (2021). The effect of building direction on microstructure and microhardness during selective laser melting of Ti6Al4V titanium alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *30*(12), 8725-8734.

[10] Yan, L., Zhang, Y., & Liou, F. (2018). A conceptual design of residual stress reduction with multiple shape laser beams in direct laser deposition. *Finite Elements in Analysis and Design*, *144*, 30-37.

[11] Ali, M. H., & Han, Y. S. (2023). A Finite element analysis on the effect of scanning pattern and energy on residual stress and deformation in wire arc additive manufacturing of EH36 steel. *Materials*, *16*(13), 4698.

[12] Sedlacek, F., Kalina, T., & Stepanek, M. (2023). Optimization of components with topology optimization for direct additive manufacturing by DLMS. *Materials*, *16*(15), 5422.

[13] Nicali, A., Pradal, G., & Carrassi, A. (2021). Topological optimization of implant-prosthetic structures. *International Journal of Computerized Dentistry*, *24*(2).

[14] Park, J., Lee, D., & Sutradhar, A. (2019). Topology optimization of fixed complete denture framework. *International journal for numerical methods in biomedical engineering*, *35*(6), e3193.

[15] Carnicero, A., Peláez, A., Restoy-Lozano, A., Jacquott, I., & Perera, R. (2021). Improvement of an additively manufactured subperiosteal implant structure design by finite elements based topological optimization. *Scientific Reports*, *11*(1), 15390.

[16] Les Kalman, B. H. (2022). 3D Fabrication Workflow: Solid & Lattice-Structured Titanium Alloy Dental Implant Overdenture Bars.

[17] Diegel, O., Nordin, A., & Motte, D. (2019). *A practical guide to design for additive manufacturing* (pp. 978-981). Singapore: Springer Singapore.

[18] Leary, M. (2019). *Design for additive manufacturing*. Elsevier.

[19] Roucoules, L., Paredes, M., Eynard, B., Camo, P. M., & Rizzi, C. (Eds.). (2021). *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing III: Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing, JCM 2020, June 2-4, 2020*. Springer Nature.

[20] Bendsøe, M. P. (2008). Topology optimization. In *Encyclopedia of Optimization* (pp. 3928-3929). Springer, Boston, MA.

[21] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.

[22] Fischer-Griffiths, P. E. (2021). *Mechanical Responses of Topology and Lattice Optimized Structures in Experiment and Simulation* (Bachelor's thesis, NTNU).

[23] Pires, M. M. (2021). *Finite Element Analysis of Residual Stresses in Metallic Parts Produced Byadditive Manufacturing* (Master's thesis, Universidade do Porto (Portugal)).

[24] Cattenone, A. (2018). Analysis and Simulation of Additive Manufacturing Processes. *University of Pavia: Pavia, Italy*.

[25] Charles, C. (2016). *Microstructure model for Ti-6Al-4V used in simulation of additive manufacturing* (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).

[26] Toscano, A. (2019). *Topology Optimization and Design for Additive Manufacturing: the case study of a hydraulic module for automotive application* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).

[27] Wang, Q., Saint Jalme, M., Schuman, C., Lecomte, J. S., Desrayaud, C., Favre, J., ... & Dumont, C. (2021). Parent beta grain reconstruction of globularized Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design*, *212*, 110280.

[28] De Leon, E., Riensche, A., Bevans, B. D., Billings, C., Siddique, Z., & Liu, Y. (2025). A Review of Modeling, Simulation, and Process Qualification of Additively Manufactured Metal Components via the Laser Powder Bed Fusion Method. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, *9*(1), 22.

[29] Salsi, E., Chiumenti, M., & Cervera, M. (2018). Modeling of microstructure evolution of Ti6Al4V for additive manufacturing. *Metals*, *8*(8), 633.

[30] Shrestha, S., Panakarajupally, R. P., Kannan, M., Morscher, G., Gyekenyesi, A. L., & Scott-Emuakpor, O. E. (2021). Analysis of microstructure and mechanical properties of additive repaired Ti–6Al–4V by Direct Energy Deposition. *Materials Science and Engineering: A*, *806*, 140604.

[31] Plocher, J., & Panesar, A. (2019). Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. *Materials & Design*, *183*, 108164.

[32] Jihong, Z. H. U., Han, Z. H. O. U., Chuang, W. A. N. G., Lu, Z. H. O. U., & Shangqin, Y. U. A. N. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, *34*(1), 91-110.

[33] Rosen, D. W. (2007). Design for additive manufacturing: a method to explore unexplored regions of the design space.

[34] Tyflopoulos, E., & Steinert, M. (2020). Topology and parametric optimization-based design processes for lightweight structures. *Applied Sciences*, *10*(13), 4496.

[35] Moreno Nieto, D., & Moreno Sánchez, D. (2021). Design for additive manufacturing: Tool review and a case study. *Applied Sciences*, *11*(4), 1571.

[36] Pagac, M., Hajnys, J., Halama, R., Aldabash, T., Mesicek, J., Jancar, L., & Jansa, J. (2021). Prediction of model distortion by FEM in 3D printing via the selective laser melting of stainless steel AISI 316L. *Applied sciences*, *11*(4), 1656.

[37] Liu, S., Li, Q., Liu, J., Chen, W., & Zhang, Y. (2018). A realization method for transforming a topology optimization design into additive manufacturing structures. *Engineering*, *4*(2), 277-285.

[38] Baiges, J., Chiumenti, M., Moreira, C. A., Cervera, M., & Codina, R. (2021). An adaptive finite element strategy for the numerical simulation of additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*, *37*, 101650.

[39] Xu, Y., Wang, Z., Gong, S., & Chen, Y. (2021). Reusable support for additive manufacturing. *Additive manufacturing*, *39*, 101840.

[40] Mayer, T., Brändle, G., Schönenberger, A., & Eberlein, R. (2020). Simulation and validation of residual deformations in additive manufacturing of metal parts. *Heliyon*, *6*(5).

[41] Tyflopoulos, E., & Steinert, M. (2020). A comparative study between traditional topology optimization and lattice optimization for additive manufacturing. *Material Design & Processing Communications*, *2*(6), e128.

[42] Balasubramanian, K. R., & Senthilkumar, V. (Eds.). (2020). *Additive manufacturing applications for metals and composites*. IGI Global.

[43] Ebeling-Rump, M., Hömberg, D., Lasarzik, R., & Petzold, T. (2021). Topology optimization subject to additive manufacturing constraints. *Journal of mathematics in industry*, *11*(1), 19.

[44]Ansys, inc (2020). Mechanical User's Guide.

[45] Simonelli, M., Tse, Y. Y., & Tuck, C. (2014). Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A*, *616*, 1-11.

[46] Wiberg, A. (2019). *Towards Design Automation for Additive Manufacturing-A multidisciplinary optimization approach*. Linkopings Universitet (Sweden).

[47]Ansys, inc (2020). ANSYS Workbench Additive Manufacturing Analysis Guide.

[48]Ansys, inc (2021). Additive User's Guide (Print and Science).

SR23001759

Syrian Arab Republic

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Department of Mechanical design engineering

Automation Of Designing And Manufacturing 3D Printing Products By Using Finite Elements Method (Case Study: 3D Printing Metal)

A Dissertation Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of PhD in Production Automation Engineering

By

Eng. Rasha Mohammed Naser Alkayali

Scientific Supervisor

Dr. Abd Alwahhab Alwattar

Co-Supervisor

Dr. Mohammed Bassam Abouharb

Academic Year

2025/2026