Ministry of Higher Education
and Scientific Research
Syrian Virtual University
Program Master of BIMM

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
الجامعة الافتراضية السورية
برنامج نمذجة معلومات البناء
وإدارتها BIMM

تصميم المباني القابلة للتفكيك باستخدام جوازات المواد الرقمية

The Design of Buildings for Disassembly Using Digital Material Passports

بحث مقدم لنيل درجة ماجستير التأهيل والتخصص في إدارة ونمذجة معلومات البناء BIMM

إعداد الطالبة

حلا أحمد

Hala_280089

إشراف الدكتورة المهندسة

د.سونيا أحمد

2025

كلمة شكر

أتوجَّه بخالص الشكر والامتنان إلى أساتذتي الكرام في برنامج ماجستير إدارة ونمذجة معلومات البناء في الجامعة الافتراضية السورية، الذين أثروا مسيرتي العلمية بما قدّموه من علمٍ ومعرفة، وأسهموا بجهودهم المخلصة في إغناء سنوات دراستي وصقل خبرتي.

كما أتقدّم بأسمى آيات الشكر والتقدير إلى مشرفتي الدكتورة المهندسة سونيا أحمد، التي كان لتوجيهاتها العلمية الرصينة، وملاحظاتها القيّمة، ودعمها المتواصل، الأثر البالغ في توجيه مسار هذا البحث وتذليل ما اعترضه من صعوبات.

كما أتوجّه بجزيل الشكر إلى السادة أعضاء لجنة المناقشة على تفضّلهم بقبول تحكيم هذا العمل، وتخصيص جزء من وقتهم الثمين لقراءته وتقييمه.

وأتوجّه بأعمق مشاعر الامتنان إلى عائلتي الغالية، التي غمرتني بحبها ورعايتها، وكانت الملاذ الآمن والداعم الأكبر لي في مسيرتي حتى إتمام هذا العمل.

وأخصّ بالشكر أصدقائي وزملائي الأعزّاء الذين لم يبخلوا عليّ بالنصح والمشورة والتشجيع طوال فترة إعداد هذه الرسالة.

ملخص البحث باللغة العربية :

في ظل التوجه العالمي نحو الاقتصاد الدائري والاستدامة في قطاع البناء، يبرز التصميم لأجل التفكيك **DfD** كمنهجية أساسية لبناء مبانٍ مرنة وقابلة لإعادة الاستخدام. ولكن تطبيقه، خاصة في السياق العربي، لا يزال يواجه تحديات تتمثل في غياب أدوات التقييم الكمي والمؤتمتة التي تدمج مبادئ **DfD** ضمن بيئة نمذجة معلومات البناء **BIM** بشكل فعال.

يهدف هذا البحث إلى تطوير وتطبيق إطار عمل متكامل يواجه هذه المشكلة، من خلال تصميم وتقييم المباني القابلة للتفكيك باستخدام الأدوات الرقمية. تم تحقيق ذلك عبر منهجية تطبيقية بدأت بتصميم حالة دراسية في بيئة **Autodesk Revit** ، وإثرائها بالبيانات من خلال إنشاء "جوازات مواد رقمية" باستخدام المعلمات المشتركة والجداول.

للانتقال من التوثيق الوصفي إلى التحليل الكمي، تم تطوير نموذج حسابي مبتكر لتقييم قابلية التفكيك، يقوم على ثلاثة معايير موزونة: طريقة التثبيت، سهولة التفكيك، ودرجة إعادة الاستخدام. تمت أتمتة هذا النموذج الحسابي من خلال بناء سكربت مخصص في **Dynamo** ، يقوم بقراءة بيانات جوازات المواد، وحساب "مؤشر قابلية التفكيك **Disassembly Index** لكل عنصر، ومن ثم تحديث نموذج **BIM** بالنتائج.

تُختتم هذه العملية بإنشاء خريطة أداء لوني **Performance Color Map** تحليلية داخل **Revit** ، وهي أداة بصرية فعالة تُقدم تغذية راجعة فورية حول نقاط القوة والضعف في التصميم، وتعمل كأداة دعم قرار استباقية. يخلص البحث إلى تقديم سير عمل **Workflow** متكامل وواضح، يحول نموذج **BIM** من مجرد مستودع ثابت للبيانات إلى أداة تحليل ديناميكية، مما يفتح آفاقًا جديدة للمصممين والمهندسين لتبني مبادئ التصميم الدائري بشكل فعال ومبني على البيانات في المنطقة.

يؤكد هذا البحث مساهمته في تعزيز الاستدامة والاقتصاد الدائري في قطاع البناء من خلال تمكين إعادة استخدام مكوّنات المبنى وتقليل هدر الموارد، وذلك عبر تطوير مؤشر رقمي لقابلية التفكك ودمجه بسلاسة مع جوازات المواد.

الكلمات المفتاحية للبحث :

التصميم لأجل التفكيك ، نمذجة معلومات البناء، جوازات المواد الرقمية ، مؤشر قابلية التفكيك

Abstract

In light of the global trend towards a circular economy and sustainability in the construction sector, Design for Disassembly **DfD** emerges as a fundamental methodology for building flexible and reusable structures. However, its application, especially in the Arab context, still faces challenges due to the absence of quantitative and automated assessment tools that effectively integrate **DfD** principles within a Building Information Modeling **BIM** environment.

This research aims to develop and implement an integrated framework to address this problem by designing and evaluating disassemblable buildings using digital tools. This was achieved through an applied methodology that began with designing a case study in an Autodesk Revit environment and enriching it with data by creating "digital material passports" using shared parameters and schedules.

To transition from descriptive documentation to quantitative analysis, an innovative computational model for assessing disassemblability was developed, based on three weighted criteria: fastening method, ease of disassembly, and degree of reusability. This computational model was automated by building a dedicated script in Dynamo, which reads material passport data, calculates a "Disassembly Index" for each element, and then updates the **BIM** model with the results.

This process concludes with the creation of an analytical Performance Color Map within Revit, an effective visual tool that provides immediate feedback on the design's strengths and weaknesses and serves as a proactive decision-support tool. The research concludes by presenting a comprehensive and clear workflow that transforms the **BIM** model from a static data repository into a dynamic analytical tool, opening new horizons for designers and engineers to effectively adopt data-driven circular design principles in the region.

This research emphasizes its contribution to advancing sustainability and the circular economy in the construction sector by enabling the reuse of building components and minimizing resource waste. This is achieved through the development of a digital disassembly index and its seamless integration with material passports.

Keywords:

Design for Disassembly, Building Information Modeling, Digital Material Passports, Disassembly Index

جدول المحتويات

ملخص البحث باللغة العربية : ٣

Abstract ٤

1- الفصل الأول : ١٠

١-١ المقدمة : ١٠

١-٢ مشكلة البحث : ١٠

١-٣ أسئلة البحث: ١١

١-٤ أهداف البحث: ١١

١-٥ فرضية البحث: ١٢

١-٦ أهمية البحث : ١٢

١-٧ مناهج البحث : ١٣

١-٨ أدوات البحث : ١٣

١-٩ حدود البحث: ١٤

٢- الفصل الثاني: الإطار النظري ١٥

٢-١ تحليل الدراسات السابقة ١٥

٢-١-١ التحليل الكمي للدراسات السابقة **Bibliometric Analysis**: ١٥

٢-١-٢ التحليل النوعي للدراسات السابقة **Content analysis** ١٩

٢-٢ التصميم لأجل التفكيك (**Design for Disassembly – DfD**) ٣٢

٢-٢-١ مفهوم التصميم لأجل التفكيك ٣٢

٢-٢-٢ مبادئ واستراتيجيات **DfD** ٣٣

٢-٢-٣ معايير تقييم القابلية للتفكيك (**Deconstructability Criteria**) ٣٣

٢-٢-٤ دور التصميم لأجل التفكيك **DfD** في دعم الاقتصاد الدائري ٣٤

٢-٢-٥ مستويات **LOD** ومتطلبات المعلومات في **DfD** ٣٥

٢-٢-٦ تحديات تطبيق **DfD** في السياق العربي ٣٦
٢-٣ نمذجة معلومات البناء (**BIM**) ٣٦
٢-٣-١ مفهوم وأساسيات نمذجة معلومات البناء **BIM** ٣٦
٢-٣-٢ مزايا نمذجة معلومات البناء **BIM** في التصميم المستدام ٣٧
٢-٣-٣ دمج نمذجة معلومات البناء **BIM** مع مبادئ التصميم لأجل التفكيك **DfD** ٣٨
٢-٣-٤ استخدام **BIM** في تقييم نهاية دورة الحياة ٣٨
٢-٣-٥ أدوات **BIM** الداعمة ٣٩
٢-٤ جوازات المواد الرقمية (**Digital Material Passports**) ٣٩
٢-٤-١ تعريف ومفهوم جواز المواد الرقمي (**Digital Material Passport – DMP**) ٣٩
٢-٤-٢ المعايير والمعلومات التي يحتويها جواز المادة ٤٠
٢-٤- ٣ العلاقة بين جواز المادة والاقتصاد الدائري ٤٠
٢-٤-٤ طرق إنشاء وربط الجوازات داخل نماذج **BIM** ٤١
٢-٤-٥ أمثلة منصات داعمة لجوازات المواد الرقمية ٤١
٣- الفصل الثالث :المنهجية ٤٢
٣-١ توظيف جوازات المواد (**Material Passports**) ضمن نموذج **BIM** ٤٢
٣-١-١ إعداد النموذج الرقمي القابل للتفكيك (**DfD**) باستخدام **Revit** ٤٢
٣-١-٢ تطوير جوازات المواد الرقمية داخل **Revit** ٤٤
٣-١-٣ إنشاء جداول جوازات المواد (**Schedules**) داخل **Revit** ٥١
٣-١-٤ رفع جوازات المواد إلى منصة **Google Drive** وربطها بالنموذج الرقمي ٦٠
٣-١-٥ تصميم بطاقات جواز المواد لاستخدامها في الموقع ٦٠
٣-١-٦ بطاقات الجوازات الرقمية للمواد ٦١
٣-٢ تطوير مؤشر قابلية التفكيك **Disassembly Index** وتحليله باستخدام **Dynamo** ٦٢
٣-٢-١ إنشاء بارامتر "مؤشر قابلية التفكيك" في **Revit** : ٦٣

٣-٢-٢ تطوير النموذج الحسابي لمؤشر قابلية التفكيك..... ٦٤
٣-٢-٣ أتمتة النموذج الحسابي باستخدام **Dynamo** ٦٦
٣-٢-٤ عرض النتائج وتحليلها البصري..... ٧٠
٣-٣ تفعيل الوصول إلى المعلومات في الموقع عبر بطاقة هوية المشروع الرقمية ٧٢
٤- الفصل الرابع: النتائج والتوصيات ٧٤
٤-١ عرض النتائج ومناقشتها ٧٤
٤-١-١ المقدمة ٧٤
٤-١-٢ عرض النتائج..... ٧٤
٤-١-٣ مناقشة النتائج: ٧٥
٤-٢ التوصيات والأعمال المستقبلية ٧٦
٤-٢-١ توصيات على الصعيد المهني والأكاديمي ٧٦
٤-٢-٢ مقترحات لأعمال بحثية مستقبلية ٧٧
٤-٢-٣ الخاتمة ٧٨
المراجع ٧٩

فهرس الجداول :

الجدول ١:أكثر المؤلفين استشهاداً..... ١٦

الجدول ٢: المقالات الأكثر استشهاداً ١٧

الجدول ٣ :التحليل النوعي الدراسة الأولى ٢٠

الجدول ٤ : التحليل النوعي الدراسة الثانية ٢٢

الجدول ٥ : التحليل النوعي الدراسة الثالثة ٢٤

الجدول ٦ : التحليل النوعي الدراسة الرابعة ٢٦

الجدول ٧ : التحليل النوعي الدراسة الخامسة ٢٨

الجدول ٨ : التحليل النوعي الدراسة السادسة ٢٩

الجدول ٩: التحليل النوعي الدراسة السابعة ٣٢

الجدول ١٠: المواد المستخدمة في عناصر النموذج ٤٣

الجدول ١١: هيكل البيانات للمعلمات المشتركة **Shared Parameters** المستخدمة في جوازات المواد الرقمية. ٤٨

الجدول ١٢: قيم البارامترات الخاصة بالجدار **Glue-Laminated Timber** ٤٩

الجدول ١٣: قيم البارامترات الخاصة بالجدار **glass clear glazing temper** ٤٩

الجدول ١٤ : قيم البارامترات الخاصة بالعمود **m.glulam southern pie** ٥٠

الجدول ١٥: قيم البارامترات الخاصة بالبلاطة **Glulam C24** ٥٠

الجدول 16 : جدول الجواز الرقمي لمادة **Glulam 24c** ٥٥

الجدول 17: جدول الجواز الرقمي لمادة **Glass Clear Glazing Temper** ٥٧

الجدول 18: جدول الجواز الرقمي لمادة **Glue Laminated Timber** ٥٩

الجدول ١٩: نظام الدرجات **Scoring System** المعتمد لتحويل المعايير الوصفية إلى قيم رقمية ٦٥

الجدول ٢٠: عتبات التقييم اللوني لنتائج مؤشر قابلية التفكيك ٧٠

فهرس الأشكال

الشكل ١:الدراسات والأبحاث المنشورة ١٦
الشكل ٢ أكثر مصادر النشر نشراً ١٧
الشكل ٣ أكثر الدول استشهاداً ١٨
الشكل ٤ : أكثر الجامعات استشهاداً ١٨
الشكل5 : النموذج ثلاثي الأبعاد للمبنى ٤٤
الشكل6 : البارمترات المضافة ٤٧
الشكل7 جواز مادة **Glue- Laminated Timber** ٦١
الشكل8 جواز مادة **Glass Clear Glazing Temper** ٦٢
الشكل9 جواز مادة **Glulam 24c** ٦٢
الشكل10 قمية مؤشر قابلية التفكيك الناتجة من **Dynamo** ٦٩
الشكل11 الخريطة اللونية للنموذج ٧١
الشكل12 البطاقة الرقمية للمشروع ٧٣

١- الفصل الأول :

١-١ المقدمة :

يشهد قطاع البناء تحولًا رقميًا متسارعًا نتيجة للضغوط المتزايدة لتحقيق الاستدامة والكفاءة في استخدام الموارد. وفي هذا السياق، برزت تقنية نمذجة معلومات البناء **BIM** كأداة محورية لإعادة تعريف الطريقة التي تُصمم وتُنفذ بها المباني. توفر **BIM** بيئة رقمية موحدة يتم من خلالها توثيق ودمج مختلف جوانب المشروع المعماري والإنشائي والإداري، مما يتيح التعاون بين مختلف التخصصات، ويعزز الدقة في اتخاذ القرارات، بدءًا من مرحلة التخطيط وحتى التشغيل والصيانة.

من جهة أخرى، ظهرت مفاهيم جديدة تدعم الاقتصاد الدائري في قطاع البناء، من أبرزها ما يُعرف بـ جوازات المواد الرقمية . **Digital Material Passports** وهي أدوات رقمية تهدف إلى توثيق معلومات دقيقة وشاملة عن المواد المستخدمة في عناصر البناء، مثل نوعها، خصائصها الفيزيائية والبيئية، إمكانية تفكيكها وإعادة استخدامها، طريقة تثبيتها، وعمرها الافتراضي. وتُمثل هذه الجوازات أساسًا معرفيًا يُمكّن من اتخاذ قرارات مسؤولة تتعلق بإعادة الاستخدام أو إعادة التدوير، مما يقلل من النفايات ويطيل عمر المواد ضمن الدورة الاقتصادية.

عند الجمع بين تقنية **BIM** وفعالية جوازات المواد الرقمية، يتم خلق بنية معرفية رقمية متكاملة تتيح تتبع كل عنصر في المبنى طوال دورة حياته. هذا التكامل يعزز مفهوم "الذكاء المادي" في العمارة، حيث لا يكون العنصر جزءًا من النموذج البصري فقط، بل يحمل معلومات متقدمة تمكن من تحليل أدائه البيئي، وسهولة تفكيكه، وإعادة دمجه في مشاريع مستقبلية. هذا التوجه يمثل خطوة أساسية نحو بناء ذكي، قابل للتكيف، ومستدام.

١-٢ مشكلة البحث :

رغم التقدم الملحوظ في مفاهيم التصميم لأجل التفكيك **DfD** عالميًا، لا يزال هناك نقص واضح في النماذج التطبيقية التي تُبيّن كيفية دمج هذه المبادئ عمليًا داخل بيئة نمذجة معلومات البناء **BIM**، خاصة في السياقات التعليمية والهندسية في العالم العربي. كما أن استخدام جوازات المواد الرقمية لتوثيق خصائص

العناصر القابلة للفصل (مثل نوع المادة، طريقة التثبيت، والعمر الافتراضي) لا يزال غائبًا في معظم المشاريع، مما يضعف قدرة المصممين على اتخاذ قرارات مستدامة مبنية على بيانات دقيقة.

وبالتالي، تبرز الحاجة إلى تطوير نموذج عملي يدمج **DfD** مع **BIM** بشكل مباشر، ويوظف أدوات التصميم الرقمي لإنشاء وتوثيق نظام متكامل يُسهم في دعم قابلية تفكيك المباني وإعادة استخدامها، مع مراعاة الخصوصية المحلية وسهولة التطبيق الأكاديمي.

١-٣ أسئلة البحث:

- كيف يمكن دمج مبادئ التصميم لأجل التفكيك **DfD** داخل نموذج معماري رقمي باستخدام أدوات **BIM**؟
- ما مدى فعالية استخدام جوازات المواد الرقمية **Digital Material Passports** في توثيق خصائص العناصر القابلة للتفكيك ضمن نموذج **Revit**؟
- كيف يمكن تطوير وتطبيق "مؤشر قابلية التفكيك" **Disassembly Index** كأداة كمية لتحليل ودعم قرارات التصميم الدائري ضمن بيئة **Revit** ؟

١-٤ أهداف البحث:

الهدف الرئيسي للبحث هو استخدام جوازات المواد الرقمية في تصميم المباني القابلة للتفكيك ويتم تحقيقه من خلال الأهداف الفرعية التالية :

١- تصميم نموذج ثلاثي الأبعاد لمبنى قابل للتفكيك باستخدام أدوات **BIM**، مع مراعاة مبادئ **DfD** .

٢- إدخال خصائص تفصيلية لكل عنصر داخل نموذج **Revit** ، تتعلق بجاهزيته للتفكيك وإعادة الاستخدام (مثل نوع المادة، طريقة التثبيت، العمر الافتراضي).

٣- إنشاء جداول توثيقية **Schedules** داخل **Revit** تعمل كجوازات مواد رقمية لتسهيل التتبع وتحليل البيانات.

٤- تطوير نموذج حسابي لـ "مؤشر قابلية التفكيك" وأتمتة تطبيقه باستخدام **Dynamo** لتقييم أداء كل عنصر بشكل كمّي.

٥- عرض نتائج التحليل بشكل بصري عبر إنشاء خريطة لونية في **Revit**، وتقديم إطار عمل متكامل لدعم اتخاذ القرارات التصميمية

١-٥ فرضية البحث:

إن دمج مبادئ التصميم لأجل التفكيك **DfD** مع تقنية نمذجة معلومات البناء **BIM**، وتوثيق خصائص العناصر من خلال جوازات المواد الرقمية، وتطوير أداة تقييم كمية مؤتمتة، سيسهم في تطوير نموذج تصميمي تطبيقي يُعزز قابلية المبنى للتفكيك وإعادة الاستخدام، ويدعم اتخاذ قرارات تصميمية مستدامة ومبنية على البيانات منذ المراحل الأولى للتخطيط.

١-٦ أهمية البحث :

الأهمية النظرية :

تنبع الأهمية النظرية لهذا البحث من كونه يُسهم في سد فجوة معرفية واضحة في الأدبيات العربية التي تناولت التكامل بين مبادئ التصميم لأجل التفكيك **DfD** وتقنية نمذجة معلومات البناء **. BIM** لا تقتصر هذه الدراسة على تقديم إطار تطبيقي لتوثيق الخصائص باستخدام جوازات المواد الرقمية فحسب، بل تتقدم خطوة أبعد من خلال تطوير وتقديم نموذج حسابي **Computational Model** لتقييم قابلية التفكيك بشكل كمّي. يعزز هذا النموذج من الفهم النظري للعلاقة بين خصائص المواد وقابلية استعادتها، ويمهد الطريق لدراسات مستقبلية تبحث في تكامل نماذج التقييم المؤتمتة مع مفاهيم الاقتصاد الدائري.

الأهمية العملية:

تبرز أهمية هذا البحث العملية في تطوير نموذج **BIM** تطبيقي لمبنى قابل للتفكيك، غني بالبيانات من خلال جوازات المواد الرقمية. لا يتوقف البحث عند توثيق البيانات فحسب، بل يُظهر كيف يمكن تحويل هذه البيانات إلى معرفة قابلة للتنفيذ من خلال أداة مؤتمتة تم تطويرها باستخدام **Dynamo .** تُتوَّج هذه العملية بإنتاج خريطة لونية تحليلية، وهي أداة بصرية عملية تُمكّن المصممين والمهندسين من تقييم قراراتهم التصميمية بشكل فوري وتحديد نقاط الضعف والقوة في قابلية المبنى للتفكيك. يقدم هذا البحث بذلك نموذجًا تطبيقيًا متكاملاً، من إدخال البيانات إلى تحليلها وعرضها، يمكن الاستفادة منه مباشرة في البيئات المهنية والأكاديمية لتطبيق معايير الاستدامة بشكل فعال ومبني على البيانات.

١-٧ مناهج البحث :

- **المنهج الوصفي التحليلي:** يُستخدم هذا المنهج في جمع وتحليل الأدبيات والدراسات السابقة المتعلقة بمفاهيم التصميم لأجل التفكيك **DfD** وتكاملها مع نمذجة معلومات البناء **BIM**، بهدف تحديد الفجوات المعرفية والتوجهات المعاصرة في توثيق خصائص العناصر القابلة لإعادة الاستخدام

- **المنهج التطبيقي (التجريبي):**

يعتمد البحث بشكل أساسي على منهج تطبيقي يدمج بين النمذجة والتجريب والتحليل الكمي. تبدأ المرحلة التطبيقية بتصميم نموذج معلومات بناء **BIM** ثلاثي الأبعاد لوحدة معمارية قابلة للتفكيك (كوخ سياحي) باستخدام برنامج **. Revit** يتم إثراء هذا النموذج بالبيانات من خلال إنشاء جوازات مواد رقمية عبر "المعلمات المشتركة **Shared Parameters** و الجداول **. Schedules** ينتقل البحث بعد ذلك إلى مرحلة التحليل الكمي المؤتمت، حيث يتم استخدام أداة البرمجة البصرية **Dynamo** لتطبيق نموذج حسابي تم تطويره لتقييم قابلية التفكيك. يقوم السكربت بحساب مؤشر قابلية التفكيك **Disassembly Index** لكل عنصر، ومن ثم يقوم بتحديث النموذج بهذه النتائج. وتُختتم المنهجية التطبيقية بمرحلة عرض النتائج، حيث يتم استخدام الفلاتر **Filters** في **Revit** لإنشاء خريطة لونية بصرية. يهدف هذا المنهج المتكامل إلى اختبار فعالية سير العمل المقترح، من إدخال البيانات إلى تحليلها وعرضها، كإطار عمل لدعم اتخاذ قرارات تصميمية مستدامة ومبنية على بيانات كمية.

١-٨ أدوات البحث :

أولاً: الدراسات السابقة

تم الاعتماد على مراجعة الأدبيات الحديثة التي تناولت التكامل بين التصميم لأجل التفكيك **DfD** وتقنية نمذجة معلومات البناء **BIM**، بالإضافة إلى الدراسات التي اقترحت استخدام جوازات المواد الرقمية داخل نماذج التصميم.

ثانيًا: أدوات التصميم والمحاكاة الرقمية

- **Autodesk Revit**

الأداة الأساسية لإنشاء نموذج معلومات البناء **BIM** ثلاثي الأبعاد للحالة الدراسية. تم استخدامه لنمذجة

العناصر، وتوثيق خصائصها عبر المعلمات المشتركة **Shared Parameters**، وإنشاء الجداول **Schedules** التي تعمل كجوازات مواد رقمية.

- **Dynamo**

أداة البرمجة البصرية المدمجة مع **Revit**، والتي تم استخدامها لأتمتة عملية التحليل الكمي. تم من خلالها بناء سكربت مخصص يقوم بقراءة بيانات جوازات المواد، تطبيق "النموذج الحسابي" المطور، وحساب "مؤشر قابلية التفكيك" لكل عنصر.

- **فلاتر الواجهة في Revit**

تم استخدامها كأداة لعرض النتائج وتحليلها بصريًا. تم من خلالها بناء قواعد منطقية لربط قيم "مؤشر قابلية التفكيك" بألوان محددة، مما نتج عنه إنشاء خريطة لونية تفاعلية للنموذج.

١-٩ حدود البحث:

الحدود المكانية : محافظة اللاذقية – الجمهورية العربية السورية

الحدود الزمانية : من شهر أيار حتى آخر شهر آب حوالي ثلاثة أشهر

الحدود الموضوعية : يركز هذا البحث على تطوير إطار عمل رقمي لتصميم وتقييم المباني القابلة للتفكيك، ويُطبّق عمليًا على مبنى حالة دراسية من فئة الوحدات الصغيرة/المعيارية (كوخ سياحي) وعلى الأبنية المساعدة التي تسمح بالفك وإعادة التركيب أو النقل. لا يتناول البحث المباني الخرسانية الثابتة أو متعددة الطوابق، إذ يتطلب تطبيقه عليها إعادة ضبط لقواعد البيانات ومعايير التقييم.

٢- الفصل الثاني: الإطار النظري

٢-١ تحليل الدراسات السابقة

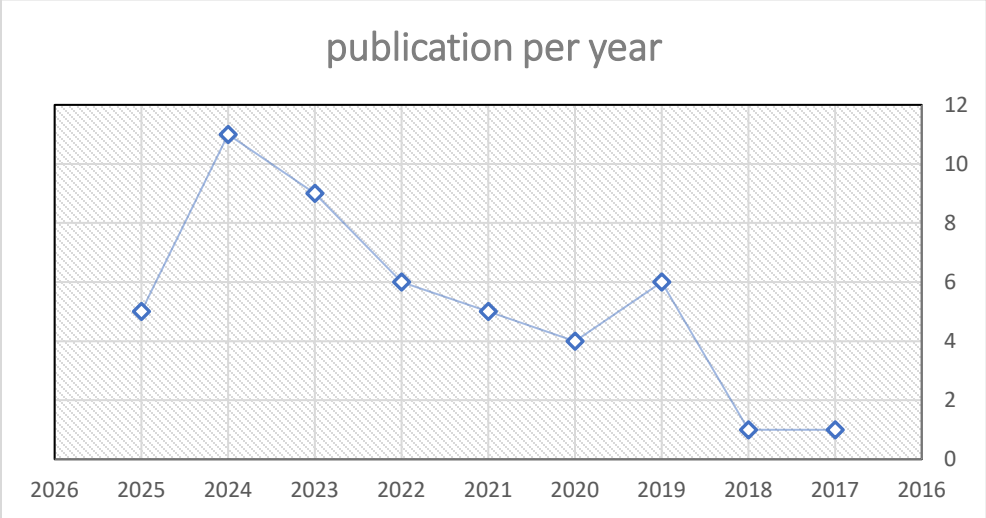
أُجريت العديد من الدراسات لاستكشاف مفهوم جوازات المواد **Material Passport** وأهميتها في قطاع البناء، بهدف تقييم مدى تأثيرها على الاستدامة وتعزيز الاقتصاد الدائري. لتحقيق هذا الهدف، تم اعتماد الأساليب الببلومترية كوسيلة للتحليل، حيث تتيح هذه الأساليب تتبع الأبحاث المتعلقة بموضوع محدد وتحليلها بناءً على خصائص مختلفة مثل الموضوع، والمنهجية، والنتائج.

للبحث عن الدراسات ذات الصلة، تم استخدام قاعدة بيانات **Google Scholar** باعتبارها مصدرًا رئيسيًا للوصول إلى المقالات العلمية. تم التركيز على الكلمات المفتاحية في عناوين الدراسات فقط، مما ساهم في تضييق نطاق البحث وتحديد الدراسات الأكثر صلة بالموضوع. الكلمة المفتاحية الأساسية التي تم استخدامها هي **Material Passport**، بالإضافة إلى مجموعة من العبارات والكلمات المرتبطة بها مثل:
Circular Economy , Building Information Modeling, Sustainable Construction, DfD.

أظهرت نتائج قاعدة البيانات أن كلمة "**Material Passport**" ظهرت في عناوين ٥٥ دراسة. تم اختيار هذه الدراسات بناءً على معايير دقيقة للقبول والإقصاء، حيث تم تضمين المقالات التي تتناول موضوع جوازات المواد بشكل مباشر وتقدم محتوى ذا صلة بالأهداف البحثية. كما تم استبعاد الدراسات غير الواضحة أو التي لا تتوافق مع متطلبات الجودة المطلوبة.

٢-١-١ التحليل الكمي للدراسات السابقة Bibliometric Analysis:

عدد الدراسات والأبحاث المنشورة خلال الأعوام من ٢٠١٧ – ٢٠٢٥ : **Publication per year chart**



١:الدراسات والأبحاث المنشورة

Most cited Authors أكثر المؤلفين استشهاداً

Name	cites
M. Honic	403
M.R. Munaro	130
I. Atta	92
L.M. Luscuere	72
A. Almusaed	63
S. Çetin	59
R.H.E.M. Koppelaar	56
L. Wu	53

الجدول ١:أكثر المؤلفين استشهاداً

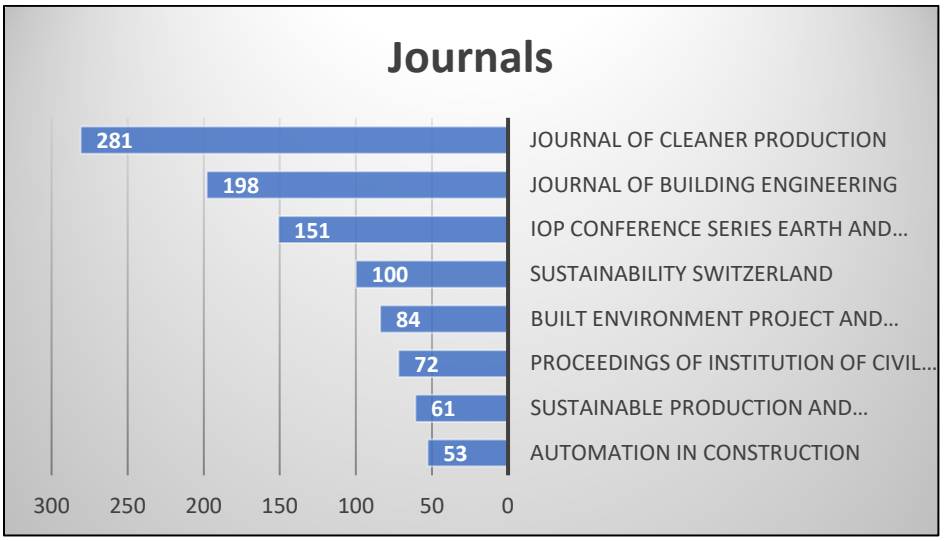
Most cited article المقالات الأكثر استشهاداَ

Cites	Authors	Title	Year
147	M. Honic	Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study	2019
105	M. Honic	Material Passports for the end-of-life stage of buildings: Challenges and potentials	2021
97	M. Honic	Data- and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports	2019
92	I. Atta	Digitizing material passport for sustainable construction projects using BIM	2021

81	**M.R. Munaro**	**Materials passport's review: challenges and opportunities toward a circular economy building sector**	**2021**
72	**L.M. Luscuere**	**Materials Passports: Optimising value recovery from materials**	**2017**
59	**S. Çetin**	**Data requirements and availabilities for material passports: A digitally enabled framework for improving the circularity of existing buildings**	**2023**

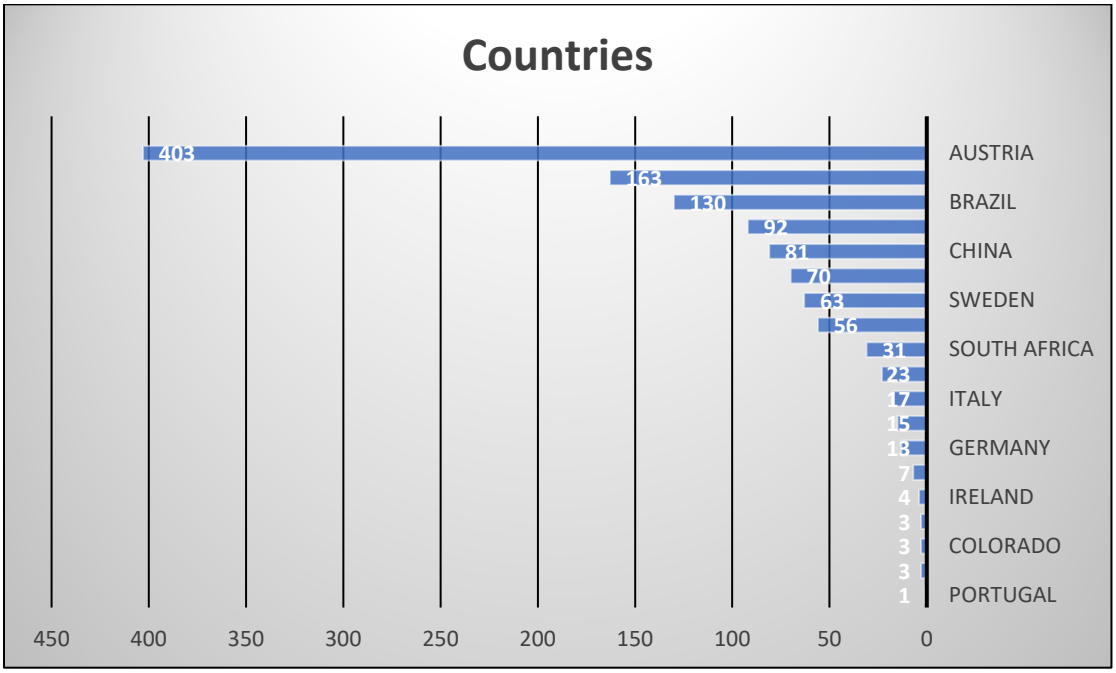
الجدول ٢: المقالات الأكثر استشهاداً

أكثر مصادر النشر نشراً **Most cited journals**



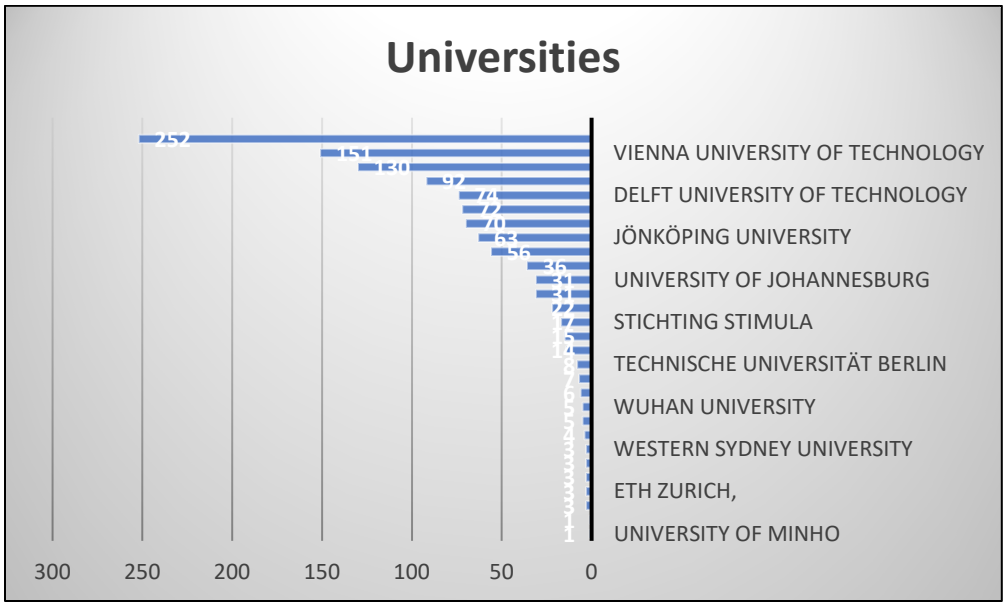
الشكل ٢ أكثر مصادر النشر نشراً

أكثر الدول استشهاداً **Most cited Countries**



الشكل ٣ أكثر الدول استشهاداً

أكثر الجامعات استشهاداً **Most cited Universities**



الشكل ٤ : أكثر الجامعات استشهاداً

٢-١-٢ التحليل النوعي للدراسات السابقة Content analysis

الدراسة الأولى :

عنوان البحث	**Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study**
المؤلف	**M. Honic**
تاريخ النشر	٢٠١٩
الموقع الجغرافي للحالة الدراسية	**Austria**
نوع المبنى	مبنى سكني يتكون من خمس طوابق
المتغير المستقل	نوع الهيكل الإنشائي للمبنى. تم تحديده في نسختين: النسخة أ (الخشب) والنسخة ب (الخرسانة)
المتغير التابع (المشكلة)	إمكانات إعادة التدوير والأثر البيئي للمبنى. المشكلة هي كيفية تقييم هذه المتغيرات بشكل متكامل، حيث قد يكون هناك تعارض بينهما (مثل مادة قابلة للتدوير ولكن ذات أثر بيئي سيء). البحث يقيس كيف يؤثر تغيير نوع الهيكل (المتغير المستقل) على كمية النفايات والأثر البيئي (المتغير التابع).
أهداف البحث	تطوير منهجية عملية لتجميع جواز سفر المواد يمكن استخدامها كأداة لتحسين التصميم إثبات صحة المفهوم من خلال تطبيقه على دراسة حالة حقيقية (مبنى سكني) تقييم ومقارنة إمكانات إعادة التدوير والأثر البيئي لنسختين من نفس المبنى (خشب مقابل خرسانة) باستخدام جواز السفر.

	إظهار قدرة جواز السفر على دعم اتخاذ قرارات أفضل في المراحل المبكرة من التصميم.
النتائج الرئيسية من البحث	الخرسانة (النسخة ب) لديها نسبة إعادة تدوير أعلى (٥٢٪) مقارنة بالخشب (النسخة أ) (٣٤٪). ولكن، الخرسانة تنتج كمية نفايات إجمالية أكبر بكثير (١٧٩٧ طن) مقارنة بالخشب (١١٢٣ طن)، وذلك بسبب كتلتها الأعلى بكثير. الخشب (النسخة أ) له أثر بيئي أقل بكثير من الخرسانة، وخاصة في مؤشر الاحتباس الحراري (**GWP**)، حيث إن الخشب يخزن ثاني أكسيد الكربون. - الاستنتاج النهائي هو أنه على الرغم من أن الخرسانة قابلة لإعادة التدوير بنسبة أعلى، إلا أن النسخة الخشبية هي الخيار الأفضل بشكل عام عند النظر إلى إجمالي حجم النفايات والأثر البيئي المنخفض.
التوصيات	يجب على المصممين استخدام جوازات سفر المواد لتحقيق التوازن بين المؤشرات المختلفة (إعادة التدوير، حجم النفايات، العمر الافتراضي، الأثر البيئي) بدلاً من التركيز على مؤشر واحد فقط. يوصى بتطبيق منهجية جواز السفر على مشاريع حقيقية قيد التنفيذ لتحديد العقبات العملية التي قد تظهر، حيث إن الدراسة الحالية كانت على نموذج فقط. هناك حاجة لوجود خبير أو "مستشار جواز سفر المواد" لمساعدة المهندسين المعماريين في عملية مطابقة المواد وجمع البيانات، لأنها عملية معقدة وتستغرق وقتًا. - يوصى بشدة بأتمتة عملية تجميع جواز السفر من خلال ربط نماذج **BIM** بقواعد بيانات خارجية لتجنب الإدخال اليدوي للبيانات وتقليل الأخطاء والوقت المستغرق.

الجدول ٣ :التحليل النوعي الدراسة الأولى

الدراسة الثانية :

عنوان البحث	**Material Passports for the end-of-life stage of buildings: Challenges and potentials**
المؤلف	**M. Honic**
تاريخ النشر	٢٠٢١
الموقع الجغرافي للحالة الدراسية	**Austria**
نوع المبنى	مبنى صناعي تابع لجامعة فيينا التقنية يستخدم كمختبر ومرفق مكتبي
المتغير المستقل	طرق الحصول على بيانات المواد من مبنى قائم. تم التركيز على مقارنة طريقتين: الحصول على البيانات من الهدم **(DA)** وهي طريقة سريعة وغير دقيقة، وتقييم التعدين الحضري **(UMA)** وهي طريقة بطيئة ودقيقة
المتغير التابع (المشكلة)	دقة واكتمال جواز السفر الناتج، والجهد (الوقت) المطلوب لإنشائه. المشكلة الرئيسية هي فجوة المعلومات في المباني القائمة؛ كيف يمكننا الحصول على بيانات موثوقة لإنشاء جواز سفر دقيق لمبنى على وشك الهدم، وما هي أفضل طريقة للقيام بذلك؟
أهداف البحث	تطبيق وتوسيع منهجية جواز سفر المواد المطورة سابقًا لتناسب المباني القائمة في مرحلة نهاية عمرها. تقييم واختبار طرق مختلفة للحصول على البيانات الهندسية (المسح بالليزر) وبيانات المواد **(DA** و **UMA)** لمبنى حقيقي. تحديد التحديات والإمكانات العملية لإنشاء جواز سفر المواد في هذه المرحلة الصعبة. تقييم إمكانات إعادة التدوير للمبنى القائم باستخدام جواز السفر الذي تم إنشاؤه.
النتائج الرئيسية من البحث	من الممكن بنجاح إنشاء جواز سفر دقيق لمبنى قائم، ولكن العملية تتطلب جهدًا كبيرًا وتجمع بين تقنيات متعددة (مسح ليزر، تحقيق ميداني، ونمذجة **(BIM**

	طريقة التقييم المفصل **(UMA)** أكثر دقة بكثير من طريقة المسح السريع **(DA)**، ولكنها تستغرق وقتًا أطول بخمس مرات (٢٥ ساعة مقابل ٥ ساعات) أظهر جواز السفر أن إمكانات إعادة التدوير للجدران الخارجية كانت حوالي ٥٢٪، بينما كانت للقواعد والأساسات ٢٠٪ فقط، مما يوضح أن مكونات المبنى المختلفة لها مصائر مختلفة تمامًا. - نمذجة معلومات البناء **(BIM)** هي أداة قوية وموصى بها بشدة لتنظيم البيانات المستخرجة وتوفير الكميات الدقيقة اللازمة لجواز السفر.
التوصيات	التحقق من صحة النتائج: يوصى بمقارنة نتائج جواز السفر مع "شهادات التخلص من النفايات" الفعلية بعد اكتمال عملية الهدم للتحقق من دقة التقييم. استكشاف التقنيات غير التدميرية: يجب البحث في تقنيات مثل رادار اختراق الأرض **(GPR)** لتقييم تكوين المواد دون الحاجة إلى تدمير أجزاء من المبنى. إنشاء منصات رقمية للتعدين الحضري: يوصى بجعل البيانات التي تم جمعها عن المواد المتاحة من المباني المهدمة متاحة للعامة (ربما عبر منصة رقمية)، بحيث يمكن للمشاريع الجديدة الاستفادة مباشرة من هذه المواد "الثانوية". - التكامل مع نظم المعلومات الجغرافية **(GIS):** يمكن ربط بيانات المخزون المادي للمباني التي تم فحصها مع بيانات **GIS** الحكومية لإنشاء خرائط للموارد المتاحة على مستوى المدينة.

الجدول ٤ : التحليل النوعي الدراسة الثانية

الدراسة الثالثة :

عنوان البحث	**Data- and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports**
المؤلف	**M. Honic**
تاريخ النشر	٢٠١٩

الموقع الجغرافي للحالة الدراسية	**Austria**
نوع المبنى	مبنى مكاتب **(office building)** من ثلاثة طوابق.
المتغير المستقل	تطبيق منهجية إنشاء جواز سفر مواد قائم على **BIM** في بيئة عمل حقيقية.
المتغير التابع (المشكلة)	التحديات التي تعيق التنفيذ الناجح والواسع النطاق لجوازات السفر. المشكلة الرئيسية التي تم تحديدها هي غياب التنسيق بين أصحاب المصلحة وعدم وجود بيانات موحدة ومتسقة، مما يجعل العملية غير فعالة وصعبة التطبيق.
أهداف البحث	إنشاء وتطبيق منهجية شبه آلية لتوليد جواز سفر مواد مدعوم بنمذجة معلومات البناء **(BIM).** تحديد التحديات الرئيسية المتعلقة بإدارة البيانات وأصحاب المصلحة والتي تواجه تطبيق جواز السفر. تطوير واقتراح إطار عمل لإدارة البيانات وأصحاب المصلحة لتسهيل التنفيذ الناجح لجوازات السفر في صناعة البناء والتشييد.
النتائج الرئيسية من البحث	من الممكن تقنيًا إنشاء جواز سفر مواد شبه آلي باستخدام أدوات **BIM** وقواعد بيانات خارجية. التحديات الرئيسية التي تمنع الانتشار الواسع لهذه التقنية ليست تقنية فقط، بل هي تنظيمية وإدارية بالأساس، وتتمثل في: عدم اتساق البيانات: اختلاف التسميات والوحدات والمعلومات بين قواعد البيانات المختلفة. نقص التعاون وفجوة المهارات: لا توجد جهة واحدة تمتلك كل المعرفة اللازمة **(BIM**، علوم مواد، تحليل بيئي**).**

	- الحل المقترح هو إنشاء إطار عمل يحدد المسؤوليات ويقترح استحداث دور جديد وهو "مستشار جواز السفر المادي" **(MP Consultant)** ليكون الخبير المسؤول عن هذه العملية.
التوصيات	لشركات الهندسة والعمارة والتشييد **(AEC):** يجب تبني دور "مستشار جواز السفر المادي" كدور أساسي في الفرق، وتدريب الموظفين على منهجيات النمذجة المطلوبة للقطاع الصناعي (مزودو البيانات والمصنعون): هناك حاجة ماسة لتوحيد وتنسيق البيانات عبر جميع المنصات. يجب أن يتفقوا على معايير موحدة لتسمية المواد وتقديم البيانات. - للهيئات التنظيمية وصانعي السياسات: يجب عليهم أن يلعبوا دورًا حاسمًا من خلال وضع لوائح وحوافز تشجع أو تفرض استخدام جوازات سفر المواد، بالإضافة إلى زيادة الوعي المجتمعي بأهمية الاقتصاد الدائري والتعدين الحضري.

الجدول ٥ : التحليل النوعي الدراسة الثالثة

الدراسة الرابعة :

عنوان البحث	**Digitizing material passport for sustainable construction projects using BIM**
المؤلف	**Islam Atta**
تاريخ النشر	٢٠٢١
الموقع الجغرافي للحالة الدراسية	**Egypt**
نوع المبنى	المباني التقليدية **(Cast-in-Place Buildings)** كحالة أساسية. المباني المعيارية **(Modular Buildings)** كحالة دراسية بديلة.
المتغير المستقل	نوع المواد وأساليب التصميم المستخدمة في المباني (مثل المباني التقليدية مقابل المباني المعيارية).
المتغير التابع (المشكلة)	قابلية إعادة التدوير وإعادة الاستخدام. الأثر البيئي للمواد المستخدمة.

	استدامة المباني عبر دورة حياتها.
أهداف البحث	- إعادة تطوير "جوازات المواد" **(Material Passports)** لدعم تحقيق الاستدامة في قطاع البناء. - استكشاف الفجوات التي تركتها الأدوات السابقة المتعلقة بتقييم المواد واستدامتها. - تقديم إطار عمل لتحسين تصميم جوازات المواد بما يتماشى مع متطلبات الاستدامة. - تقييم مؤشرات الاستدامة مثل قابلية الفك، التصنيع المسبق، وإمكانية إعادة التدوير وإعادة الاستخدام.
النتائج الرئيسية من البحث	تقييم مؤشرات الاستدامة: ٥- تم تحديد مجموعة من المؤشرات لتقييم استدامة المباني بناءً على معايير مثل قابلية الفك، التصنيع المسبق، وإمكانية إعادة التدوير وإعادة الاستخدام أظهرت المباني المعيارية **(Modular Buildings)** أداءً أفضل مقارنة بالمباني التقليدية **(Cast-in-Place Buildings)** فيما يتعلق بقابلية إعادة التدوير وإعادة الاستخدام. أهمية المعلومات الشاملة: جوازات المواد المطورة توفر معلومات شاملة تغطي جميع مراحل دورة حياة المبنى، مما يجعلها أكثر شمولًا مقارنة بالأدوات السابقة. الفجوات في الأدوات الحالية: ٦- الأدوات الحالية تعاني من نقص في توفير معلومات دقيقة ومتسقة حول المواد المستخدمة في المباني. هناك حاجة إلى تحسين جودة البيانات وتوحيدها لضمان دعم اتخاذ قرارات مستدامة. أثر التصميم المعياري: المباني المعيارية، التي يتم تصنيعها مسبقًا وتجميعها في الموقع، توفر فرصًا أكبر لتحقيق الاستدامة بسبب قابلية إعادة استخدام مكوناتها.
التوصيات	- تحسين جودة البيانات:

	يجب تطوير قواعد بيانات موحدة ودقيقة لتوفير معلومات متسقة حول المواد المستخدمة في المباني. التركيز على توحيد المعايير (مثل **Austrian Norm**) لتنظيم الوثائق الرقمية للمباني. - تطوير جوازات المواد: يجب إعادة تصميم جوازات المواد لتشمل معلومات شاملة تغطي جميع مراحل دورة حياة المبنى. استخدام أدوات رقمية مثل **BIM** (نمذجة معلومات البناء) لتحسين دقة وجودة جوازات المواد. - تعزيز التصميم المعياري: تشجيع استخدام التصميم المعياري في المشاريع الجديدة لتحسين قابلية إعادة التدوير وإعادة الاستخدام. - إجراء المزيد من الأبحاث: التركيز على دراسة تأثير جوازات المواد على الاقتصاد الدائري في قطاع البناء. تطوير أدوات جديدة لتقييم الأثر البيئي للمواد المستخدمة في المباني.

الجدول ٦ : التحليل النوعي الدراسة الرابعة

الدراسة الخامسة :

عنوان البحث	**Materials Passports: Optimising value recovery from materials**
المؤلف	**L.M. Luscuere**
تاريخ النشر	٢٠١٧
الموقع الجغرافي للحالة الدراسية	**Netherlands**
نوع المبنى	لم يتم تحديد نوع مبنى معين، حيث يركز البحث على فكرة عامة لتطبيق "جوازات المواد" في قطاع البناء
المتغير المستقل	توفر أو غياب مجموعة معلومات شاملة وموثوقة ومنظمة (أي جواز سفر المواد).

المتغير التابع (المشكلة)	القدرة على استرداد قيمة المواد **(Value Recovery)** في نهاية عمر المبنى. المشكلة الأساسية التي يعالجها البحث هي أن ضياع المعلومات حول المواد يؤدي إلى ضياع قيمتها، مما يجعلها تتحول إلى نفايات بدلاً من أن تصبح موارد ثانوية. البحث يفترض أن توفير المعلومات الصحيحة (المتغير المستقل) سيؤدي إلى تحسين استرداد القيمة (المتغير التابع)
أهداف البحث	استكشاف الحاجة إلى جوازات سفر المواد وتحديد أهدافها ووظائفها. تحديد أنواع المعلومات التي يجب أن يحتوي عليها جواز السفر شرح كيف يختلف جواز سفر المواد عن الأدوات الحالية مثل قوائم المكونات أو الإعلانات البيئية للمنتج **(EPD)** وصف كيف يمكن لجوازات السفر أن تضع الاقتصاد الدائري موضع التنفيذ من خلال خلق القيمة وتحفيز الابتكار.
النتائج الرئيسية من البحث	جواز سفر المواد هو أداة نشطة لتتبع القيمة، وليس مجرد وثيقة سلبية تسرد المكونات. جواز السفر أكثر من مجرد "قائمة مكونات" لأنه يجب أن يتضمن معلومات حيوية عن السياق (الموقع، طريقة التركيب)، الصحة المادية، وإمكانية الفك وإعادة الاستخدام. جوازات السفر ضرورية للتعامل مع الطبيعة المعقدة والمتغيرة للمباني، حيث تتغير المواد وقيمتها بمرور الوقت الهدف الرئيسي لجواز السفر هو تزويد أصحاب المصلحة بالمعلومات التي يحتاجونها لاتخاذ قرارات أفضل، مما يحفز الابتكار في التصميم والتصنيع.
التوصيات	البحث بطبيعته المفاهيمية لا يقدم توصيات تقنية مفصلة، بل يقدم توصية استراتيجية واحدة وواضحة: يجب على أصحاب المصلحة في سلسلة القيمة للمباني (المصممين، المصنعين، المالكين، إلخ) تبني واستخدام جوازات سفر المواد كأداة أساسية لتوثيق وتتبع الإمكانات

	الدائرية الكاملة للمواد والمنتجات والأنظمة، وذلك لتوفير آلية للابتكار وتحقيق الاقتصاد الدائري.

الجدول ٧ : التحليل النوعي الدراسة الخامسة

الدراسة السادسة :

عنوان البحث	**Data requirements and availabilities for material passports: A digitally enabled framework for improving the circularity of existing buildings**
المؤلف	**S. Çetin**
تاريخ النشر	٢٠٢٣
الموقع الجغرافي للحالة الدراسية	**Netherlands**
نوع المبنى	المباني القائمة **(Existing buildings)** ضمن قطاع الإسكان الاجتماعي **(Social housing)**
المتغير المستقل	الحاجة إلى إنشاء جواز سفر للمواد في المباني القائمة.
المتغير التابع (المشكلة)	فجوة البيانات **(Data Gap)** المشكلة الأساسية هي أن هناك فجوة هائلة بين البيانات التي يحتاجها أصحاب المصلحة لتفعيل الاقتصاد الدائري (مثل تكوين المواد، وجود مواد خطرة، الحالة، إمكانية إعادة الاستخدام) والبيانات المتاحة بالفعل والموثقة في أنظمة إدارة المباني الحالية.
أهداف البحث	تحديد المستخدمين المحتملين لجوازات سفر المواد في المباني السكنية القائمة، وتحديد أنواع البيانات التي يحتاجونها لدعم المبادئ الدائرية تقييم مدى إمكانية تلبية متطلبات البيانات هذه باستخدام البيانات والأنظمة الرقمية المتاحة حاليًا لدى منظمات الإسكان الاجتماعي.

	اقتراح إطار عمل مدعوم رقميًا لمعالجة فجوات البيانات التي تم تحديدها.
النتائج الرئيسية من البحث	تم تحديد ما لا يقل عن ١٥ نوعًا مختلفًا من المستخدمين لجواز السفر في مراحل الصيانة والتجديد والهدم. الوظيفة الأكثر أهمية لجواز السفر للمباني القائمة، وفقًا للممارسين، هي "تمكين إعادة الاستخدام وإعادة التدوير". توجد فجوة بيانات حرجة وواسعة. البيانات التي تم تصنيفها على أنها "يجب توفرها" (مثل تكوين المواد، المواد السامة، تقييم الحالة، إمكانات إعادة الاستخدام) هي نفسها البيانات ذات التوفر "المنخفض جدًا" أو "غير المتوفر". - تم تطوير واختبار قالب بيانات مفصل مكون من ٥٠ نقطة بيانات، والذي يعتبر أول محاولة تجريبية لتحديد متطلبات البيانات من وجهة نظر الممارسين.
التوصيات	**اقتراح إطار عمل تكنولوجي–بشري:** يوصي البحث بتبني إطار عمل يجمع بين التقنيات الرقمية المتقدمة (الذكاء الاصطناعي لتحليل الصور، المسح الضوئي، الطائرات بدون طيار) والخبرة البشرية (المفتشون، الاستشاريون، شركات إعادة الاستخدام) لسد فجوات البيانات. **تكييف ممارسات جمع البيانات:** يجب على منظمات الإسكان العقاري وأصحاب العقارات الآخرين مواءمة عمليات جمع البيانات الدورية (خاصة أثناء تقييمات الصيانة) لتشمل البيانات المطلوبة للممارسات الدائرية. - **إجراء المزيد من الأبحاث:** يوصى بإجراء مزيد من الأبحاث لتشمل أنواعًا أخرى من المباني (تجارية، عامة)، والتحقيق في قضايا تبادل البيانات وسريتها بين مختلف الجهات الفاعلة في سلسلة التوريد.

الجدول ٨ : التحليل النوعي الدراسة السادسة

الدراسة السابعة:

عنوان البحث	**Entwicklung eines Konzepts zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen: Materieller Gebäudepass und Design for Recycling für das Bauwesen**
المؤلف	**Stanimira Markova**
تاريخ النشر	٢٠١١
الموقع الجغرافي للحالة الدراسية	**Austria**
نوع المبنى	تم اختبار المفهوم على أنواع مختلفة من المباني، بما في ذلك: مبنى سكني متعدد الطوابق بهيكل خرساني. مبنى سكني متعدد الطوابق بهيكل خشبي. منزل عائلي واحد
المتغير المستقل	تطبيق المفهوم المقترح الذي يجمع بين "جواز سفر المبنى" ومبادئ "التصميم من أجل إعادة التدوير".
المتغير التابع (المشكلة)	جودة وكمية المعلومات المادية الموثقة، وإمكانية إعادة التدوير الفعلية للمبنى. المشكلة الأساسية هي أن "عملية التخطيط الكلاسيكية" تؤدي إلى نقص حاد في توثيق المعلومات المادية، مما يجعل إعادة التدوير الفعالة شبه مستحيلة
أهداف البحث	تحديد استهلاك مواد البناء في النمسا . تحديد مؤشرات متعلقة بالموارد لقطاع البناء . تحليل عملية التخطيط الكلاسيكية وعملية توليد المعلومات المادية.

	تلخيص الأسس اللازمة لتطوير مفهوم جواز سفر مادي للمبنى. صياغة تدابير "التصميم من أجل إعادة التدوير" لقطاع البناء.
النتائج الرئيسية من البحث	عملية التخطيط الكلاسيكية في البناء غير فعالة وتؤدي إلى فقدان المعلومات المادية الأساسية اللازمة للاقتصاد الدائري تم تطوير مفهوم "جواز سفر المبنى" بنجاح، مع هيكل تحليلي (من الأعلى للأسفل ومن الأسفل للأعلى) لتوثيق المواد بشكل كامل. يمكن تكييف مبادئ "التصميم من أجل إعادة التدوير" من الصناعات الأخرى وتطبيقها بنجاح في قطاع البناء المقابلات مع الخبراء أظهرت أن الاستخدام المتزايد للمواد المركبة والبلاستيكية يشكل تهديدًا كبيرًا لقابلية إعادة تدوير المباني في المستقبل.
التوصيات	تبني التخطيط المتكامل: يجب التحول من عملية التخطيط الكلاسيكية المجزأة إلى "التخطيط المتكامل" حيث يعمل جميع أصحاب المصلحة معًا منذ البداية لضمان التوثيق الكامل. التطبيق الإلزامي لجواز سفر المبنى: يجب استخدام جواز السفر كأداة أساسية لتوثيق جميع المواد في المبنى، مع تحديد موقعها وكمياتها وكيفية ربطها. إدراج "التصميم من أجل إعادة التدوير" في مرحلة التخطيط: يجب على المخططين والمهندسين المعماريين أن يأخذوا في الاعتبار قابلية الفصل وإعادة التدوير كعامل أساسي في قرارات التصميم.

	توحيد المعايير الرقمية: هناك حاجة ماسة لتوحيد المعايير للأدوات الرقمية مثل **BIM** و **IFC** لتسهيل تبادل البيانات بشكل موثوق بين مختلف الأطراف.

الجدول ٩: التحليل النوعي الدراسة السابعة

٢-٢ التصميم لأجل التفكيك (Design for Disassembly – DfD)

٢-٢-١ مفهوم التصميم لأجل التفكيك

يُعد "التصميم لأجل التفكيك" **(Design for Disassembly – DfD)** أحد المفاهيم المعمارية الحديثة التي تستجيب لتوجهات الاستدامة والاقتصاد الدائري في قطاع البناء. ويتمثل هذا المفهوم في تبنّي استراتيجية تصميمية تهدف إلى تسهيل عملية فصل وفك مكونات المبنى عند نهاية عمره التشغيلي **(Jayasinghe et al., 2019)**، بما يتيح إعادة استخدامها أو تدويرها بحد أدنى من الفقد المادي أو الضرر البيئي.

يعتمد **DfD** على مبدأ جوهري يتمثل في إطالة دورة حياة المواد وتقليل الهدر الناتج عن الأساليب التقليدية للهدم **(Akinade, 2017)** ، وهو ما يفرض على المصمم المعماري التفكير في سيناريوهات ما بعد الاستخدام منذ المراحل الأولى للتصميم. ويتطلب هذا التوجه دمج معايير محددة تتعلق بطريقة تجميع العناصر، وآلية تثبيتها، وسهولة فصلها، فضلًا عن عمرها الافتراضي وقابليتها لإعادة الاستخدام أو التدوير.

إن تبني مفهوم **DfD** لا يقتصر على البعد الإنشائي فحسب، بل يشمل أيضًا إعداد وتوثيق المعلومات الرقمية التي تُستخدم لاحقًا في إدارة دورة حياة المبنى**(Hodge, 2000)**. وبهذا يُصبح **DfD** أداة استراتيجية ليس فقط في دعم الكفاءة البيئية، بل أيضًا في تعزيز الجدوى الاقتصادية وتحسين مرونة التصميم المستقبلي للمباني، لا سيما في المشاريع السكنية المؤقتة، أو المباني سريعة التحول الوظيفي.

٢-٢-٢ مبادئ واستراتيجيات DfD

يعتمد التصميم لأجل التفكيك (**DfD**) على مجموعة من المبادئ التصميمية التي تهدف إلى تسهيل فصل مكونات المبنى عند الحاجة، مع الحفاظ على سلامة المواد وإمكانية إعادة استخدامها أو تدويرها(**Hernández, 2025**)، مما يسهم في تقليل الهدر وتعزيز الاستدامة. وتشكّل هذه المبادئ إطارًا مرجعيًا للمصممين في تبنّي استراتيجيات فعالة منذ المراحل الأولى للتخطيط.

من أبرز هذه المبادئ استخدام الوصلات غير الدائمة، والتي تعتمد على أنظمة تثبيت قابلة للفك مثل البراغي والمشابك والوصلات الميكانيكية(**Croccolo et al., 2023**)، بدلًا من الأساليب الدائمة كاللحام أو اللصق الكيميائي. كما يُعد تصميم العناصر على شكل وحدات نمطية قابلة للفصل من الممارسات الأساسية التي تُمكّن من تفكيك أجزاء المبنى ونقلها أو استخدامها في موقع آخر دون الحاجة إلى هدم أو تكسير.

وتتمثل إحدى الاستراتيجيات الجوهرية في ضمان سهولة الوصول إلى نقاط التثبيت والفصل، بحيث يمكن صيانة أو استبدال الأجزاء دون إلحاق الضرر ببقية المكونات. إلى جانب ذلك، يتطلّب **DfD** اختيار مواد قابلة لإعادة الاستخدام أو التدوير، مثل الخشب المعالج والمعادن المعاد تصنيعها، لما لها من قدرة على الحفاظ على جودتها بعد التفكيك.

كما تبرز أهمية توثيق خصائص العناصر في قواعد بيانات رقمية أو ما يُعرف بجوازات المواد الرقمية (**Digital Material Passports**)، والتي تتضمن معلومات تفصيلية حول المادة، وطريقة التثبيت، والعمر الافتراضي، ومدى قابليتها للتفكيك أو إعادة الاستخدام(**Koppelaar et al., 2023**).

يسهم الالتزام بهذه المبادئ في دمج منظور دورة الحياة ضمن عملية التصميم المعماري، ويعزز من مرونة المبنى وملاءمته لمتطلبات الاستدامة المستقبلية، خاصةً في ظل التحولات المتسارعة في الوظائف العمرانية والاحتياجات البيئية.

٢-٢-٣ معايير تقييم القابلية للتفكيك (Deconstructability Criteria)

يمثل تقييم قابلية تفكيك مكونات المبنى مرحلة محورية في تبنّي نهج التصميم لأجل التفكيك (**DfD**)، حيث يعتمد هذا التقييم على مجموعة من المعايير الفنية التي تُمكّن من تقدير مدى سهولة فصل العناصر دون إحداث تلف، وما إذا كانت قابلة لإعادة الاستخدام أو التدوير. وتوفر هذه المعايير إطارًا تشغيليًا لتحليل مكونات المبنى ضمن مراحل التصميم، خاصة عند دمجها ضمن بيئة نمذجة معلومات البناء (**BIM**).

يُعد نوع التثبيت **(Fixing Method)** من أبرز المؤشرات التي تؤثر على سهولة التفكيك(**Geda et al., 2019)**، إذ إن العناصر المرتبطة باستخدام وصلات ميكانيكية قابلة للفك مثل البراغي أو المشابك المعدنية توفر إمكانية أكبر لإعادة الاستخدام، مقارنةً بوسائل التثبيت الدائمة كاللحام أو اللصق.

أما سهولة الوصول **(Accessibility)** فهي معيار يقيس مدى إمكانية الوصول إلى العنصر المطلوب دون الحاجة إلى إزالة عناصر أخرى أو الإضرار بالبنية المحيطة**(Ziemian, 2010)**، ما يُسهم في تقليل التكاليف والأضرار أثناء التفكيك.

كما تُعد قابلية الفصل كوحدة مستقلة **(Modularity)** من العوامل المهمة، إذ يزداد احتمال إعادة استخدام العنصر عندما يكون مصممًا كعنصر نمطي مستقل **(Kimura et al., 2001)**(مثل الجدران الجاهزة أو البلاطات المعيارية).

من جانب آخر، يُؤخذ بعين الاعتبار مستوى الضرر المتوقع أثناء التفكيك **(Damage Risk)**، حيث يؤثر بشكل مباشر على قرار إعادة الاستخدام أو التخلص من العنصر. ويُضاف إلى ذلك معيار كثافة التوصيلات ونوعها **(Connection Density)**، حيث إن وجود عدد كبير من نقاط التثبيت أو استخدام أنظمة تثبيت معقدة يقلل من سهولة التفكيك.

كذلك، تُعد الخصائص الزمنية للعنصر مثل العمر الافتراضي ومستوى الصيانة **(Lifespan & Maintenance)** من المحددات الأساسية التي تؤثر على ديمومة الأداء وقابلية إعادة التوظيف. وأخيرًا، تلعب توفر المعلومات الدقيقة والموثقة، كما هو الحال في جوازات المواد الرقمية **(Digital Material Passports)**، دورًا حاسمًا في دعم اتخاذ قرارات تصميمية مستندة إلى بيانات موضوعية.

تُستخدم هذه المعايير مجتمعة لحساب ما يُعرف بـ مؤشر قابلية التفكيك **(Deconstructability Score)** ، والذي يمكن تطويره وتحليله ضمن بيئة **BIM** باستخدام أدوات البرمجة البصرية مثل **Dynamo**، بهدف توجيه القرارات التصميمية.

٢-٢-٤ دور التصميم لأجل التفكيك DfD في دعم الاقتصاد الدائري

يُعدّ التصميم لأجل التفكيك **(Design for Disassembly - DfD)** أحد الركائز الأساسية لتفعيل مبادئ الاقتصاد الدائري في قطاع البناء، لما يوفره من إمكانية إعادة استخدام أو إعادة تدوير مكونات المبنى عند نهاية دورة حياتها، بدلًا من التخلص منها كهدر إنشائي. ويسهم هذا التوجه في إطالة عمر المواد وتدويرها

داخل النظام الإنتاجي(**Keoleian & Menerey, 1994**)، مما يؤدي إلى تقليل الاعتماد على الموارد الأولية، وخفض الانبعاثات البيئية الناتجة عن عمليات الهدم والنقل والمعالجة.

إن إدماج مبادئ **DfD** في المراحل المبكرة من عملية التصميم يمكّن المعماري والمصمم من اتخاذ قرارات مدروسة تتعلق باختيار المواد القابلة لإعادة الاستخدام، والأنظمة الإنشائية التي تعتمد على وسائل تثبيت غير دائمة مثل الوصلات الميكانيكية، إلى جانب تطوير تفاصيل معمارية وإنشائية تدعم سهولة التفكيك.

علاوةً على ذلك، يُعزّز تطبيق **DfD** من إمكانيات تتبّع المواد (**Material Traceability**)، حيث يُسهّل تسجيل وتوثيق خصائص العناصر أثناء التصميم والبناء(**Islam et al., 2021**)، مما يُتيح تحليل القيمة المتبقية لكل مكوّن عند تفكيكه. وتُعدّ هذه المعلومات بالغة الأهمية في دعم اتخاذ قرارات تصميمية مستندة إلى بيانات كمية دقيقة، تعكس الأداء المستدام للمبنى على مدى دورة حياته الكاملة، وتفتح المجال أمام إعادة التوظيف الفعّال للعناصر ضمن مشاريع مستقبلية.

٢-٢-٥ مستويات LOD ومتطلبات المعلومات في DfD

يُعدّ مستوى التفاصيل (**Level of Development - LOD**) من المحددات الجوهرية في تفعيل التصميم لأجل التفكيك **DfD** داخل بيئات نمذجة معلومات البناء **BIM**، حيث يُعرّف **LOD** بدرجة النضج والتفصيل التي يتمتع بها كل عنصر ضمن النموذج الرقمي(**Tolmer et al., 2017**). ويُسهم ارتفاع مستوى **LOD** في رفع دقة التمثيل الهندسي والمعرفي للعناصر، ما يُتيح دمج بيانات حيوية تتعلق بخصائص التفكيك، كنوع التثبيت، قابلية الفصل، عدد دورات إعادة الاستخدام الممكنة، وطبيعة المواد المستخدمة.

وفي سياق تفعيل **DfD**، تُعدّ المستويات المتقدمة مثل **LOD 300** و**LOD 400** ضرورية، حيث تُمكّن من توصيف مكوّنات المبنى ليس فقط من الناحية الشكلية، بل أيضًا من حيث الخصائص التشغيلية والتقنية، مما يتيح تضمين "المعلمات المشتركة" (**Shared Parameters**) التي تُعدّ الأساس في بناء قاعدة بيانات جوازات المواد الرقمية.

علاوة على ذلك، فإن تحقيق التكامل المعلوماتي بين النماذج الرقمية المختلفة يتطلب مواءمة **LOD** مع أنظمة تصنيف معتمدة مثل **OmniClass** أو **UniFormat**، ما يضمن اتساق تبادل البيانات بين المشاركين في المشروع، ويعزّز من قابلية التشغيل البيني (**Interoperability**) بين البرمجيات والمنصات

الرقمية. ويُعد هذا الجانب بالغ الأهمية لضمان نجاح تطبيق **DfD** في المشاريع المعاصرة التي تستهدف بناءً أكثر استدامة وكفاءة.

٢-٢-٦ تحديات تطبيق DfD في السياق العربي

على الرغم من النجاح الذي حققته العديد من الدول الأوروبية في دمج مبادئ التصميم لأجل التفكيك **(DfD)** ضمن سياساتها البيئية والتنظيمية، إلا أن تطبيق هذه المفاهيم في السياق العربي لا يزال يواجه جملة من التحديات البنيوية والمهنية. من أبرز هذه التحديات انخفاض مستوى الوعي بمفاهيم التصميم الدائري والاستدامة بين العاملين في قطاع البناء، بما في ذلك المصممين والمقاولين، حيث غالبًا ما يُنظر إلى **DfD** كفكرة نظرية لا تجد تطبيقًا عمليًا في المشاريع الفعلية.

كما يفتقر السياق العربي إلى أطر تشريعية ومعايير محلية واضحة تُنظّم أو تُلزم باستخدام أدوات تحليل رقمي مثل **DfD** ضمن بيئة نمذجة معلومات البناء **(BIM)**. ويُضاف إلى ذلك محدودية النماذج التطبيقية داخل المؤسسات الأكاديمية، إذ غالبًا ما يُقدَّم **DfD** كمفهوم نظري دون تدريب عملي فعلي على أدوات رقمية مثل **Revit** أو **Dynamo**، مما يحدّ من قدرات الطلبة والخريجين على تطبيق هذه المفاهيم في مشاريع واقعية.

ومن التحديات الجوهرية الأخرى ضعف التكامل الرقمي بين أطراف المشروع، إلى جانب غياب قواعد بيانات وطنية موثوقة للمواد الإنشائية، وهو ما يُعيق إنشاء جوازات مواد رقمية دقيقة وقابلة للاستخدام في المراحل اللاحقة من المشروع. هذه التحديات تبرز الحاجة المُلّحة إلى تطوير نماذج تطبيقية تعليمية قابلة للتكرار، تستند إلى أدوات **BIM** وتُنفَّذ على نطاق مشاريع صغيرة كالوحدات السياحية أو المؤقتة، بما يُسهم في إرساء ثقافة التصميم المستدام الداعم للاقتصاد الدائري في المنطقة العربية.

٢-٣ نمذجة معلومات البناء (BIM)

٢-٣-١ مفهوم وأساسيات نمذجة معلومات البناء BIM

تُعد نمذجة معلومات البناء **(Building Information Modeling - BIM)** منهجية رقمية متقدمة لإدارة معلومات المشروع طوال دورة حياته**(Arayici & Aouad, 2010)**، بدءًا من مراحل التصور والتصميم، مرورًا بالتنفيذ، وانتهاءً بمرحلة التفكيك أو الهدم. وتقوم هذه المنهجية على إنشاء نموذج ثلاثي

الأبعاد ذكي ومتعدد الأبعاد، لا يقتصر على التمثيل الهندسي فحسب، بل يتضمن بيانات زمنية، بيئية، وظيفية، واقتصادية مرتبطة بكل عنصر من عناصر المشروع.

يتميز نموذج **BIM** بقدرته على استيعاب وتحليل معلومات تفصيلية لكل مكون إنشائي (مثل الجدران، الأسقف، النوافذ، الأساسات)، من خلال عناصر ذكية تحمل خصائص مادية ووظيفية قابلة للتحديث والتحليل(**Yang et al., 2021**)، مما يتيح إمكانية التعديل الفوري ومراقبة تأثيره على بقية أجزاء النموذج. كما يوفّر **BIM** بيئة موحدة تعزز التعاون بين مختلف التخصصات الهندسية ضمن المشروع، وتُمكّن من تكامل البيانات بين التصميم المعماري، والإنشائي، والميكانيكي، والكهربائي.

علاوة على ذلك، يدعم **BIM** التوثيق الدقيق للمشروع عبر قواعد بيانات مدمجة، ويسهّل إدارة التكاليف، وحساب الجداول الزمنية، وتحليل الأداء البيئي للمبنى. ويُعد هذا التكامل عاملاً رئيسيًا في تحسين كفاءة إدارة المشروع وتقليل الهدر، مما يجعله أداة محورية في تصميم وتنفيذ المباني المستدامة والقابلة للتفكيك ضمن إطار الاقتصاد الدائري.

٢-٣-٢ مزايا نمذجة معلومات البناء BIM في التصميم المستدام

تُعتبر نمذجة معلومات البناء **(BIM)** أداة استراتيجية فاعلة في دعم مبادئ التصميم المستدام، نظرًا لقدرتها على تمكين تحليل شامل ودقيق للأداء البيئي للمبنى منذ المراحل الأولى للتصميم(**Inyim et al., 2015**). من خلال دمج بيانات مادية ووظيفية ضمن نموذج رقمي موحد، يمكن للمصممين إجراء محاكاة مبكرة لاستهلاك الطاقة، وتحليل توزيع الإضاءة الطبيعية، وحساب معدلات التهوية، مما يسهم في تحسين الكفاءة البيئية وتقليل استهلاك الموارد.

كما يتيح **BIM** إمكانية اختيار مواد بناء صديقة للبيئة بناءً على معايير مدروسة(**Liu et al., 2022**)، مثل البصمة الكربونية، وإمكانية إعادة الاستخدام، وقابلية التدوير، وذلك ضمن إطار دورة حياة المبنى. وتُعد هذه القدرة على تقييم تأثير المواد والمكونات على المدى الطويل من العوامل الجوهرية لتحقيق الاستدامة وتقليل الفاقد المادي الناتج عن التصميم التقليدي.

وبهذا، يوفر **BIM** منصة متكاملة لاتخاذ قرارات تصميمية مستندة إلى بيانات كمية دقيقة، مما يُعزز من موثوقية التقديرات، ويُساهم في تحقيق أهداف البناء الأخضر والاقتصاد الدائري، ويُحسّن الأداء البيئي والاقتصادي للمباني خلال دورة حياتها الكاملة.

٢-٣-٣ دمج نمذجة معلومات البناء BIM مع مبادئ التصميم لأجل التفكيك DfD

يُعد دمج نمذجة معلومات البناء **BIM** مع مبادئ التصميم لأجل التفكيك **DfD** خطوة متقدمة نحو إنشاء بيئة تصميمية متكاملة تدعم مرونة المكونات وقابليتها للفصل وإعادة الاستخدام(**Mattaraia et al., 2023**). من خلال استخدام أدوات **BIM**، يمكن إدراج معايير تصميمية قابلة للتخصيص مثل نوع المادة، طريقة التثبيت، العمر الافتراضي، وقابلية التفكيك، وذلك ضمن معلمات مشتركة **Shared Parameters** تُدرج على مستوى كل عنصر داخل النموذج الرقمي.

ويتم توثيق هذه البيانات داخل جداول ذكية **(Schedules)**، تمثل جوازات مواد رقمية (**Digital Material Passports)**، تسمح بتصنيف وتتبع المكونات بدقة طوال دورة حياة المبنى. يُمكن لهذا الدمج أن يدعم اتخاذ قرارات تصميمية واعية منذ المراحل المبكرة، من خلال محاكاة تأثيرات مختلفة لخيارات المواد وأنظمة التثبيت على إمكانية التفكيك لاحقًا.

كما يُسهم الربط بين **BIM** و**DfD** في تقليل الهدر الناتج عن الهدم التقليدي، وتحقيق وفورات في التكاليف، وتعزيز كفاءة إدارة الموارد**(Akinade et al., 2017)**، مما يجعل من هذا التكامل أداة استراتيجية لتحقيق الأهداف البيئية والاقتصادية في مشاريع البناء المستدام.

٢-٣-٤ استخدام BIM في تقييم نهاية دورة الحياة

تُوفّر نمذجة معلومات البناء **(BIM)** إطارًا متكاملًا لتحليل أداء العناصر والمواد في نهاية دورة حياتها **(End-of-Life)**، بما يُسهم في تعزيز مفاهيم الاستدامة والتصميم الدائري. إذ يُمكن من خلال إدخال معلمات ذكية تتعلق بالعمر الافتراضي، وقابلية التفكيك، وإمكانية إعادة الاستخدام أو التدوير، تقييم المسار المتوقع لكل مكون بعد انتهاء فترة استخدام المبنى**(Iacovidou et al., 2018)**.

يساعد هذا النوع من التقييم على اتخاذ قرارات تصميمية واعية منذ المراحل الأولى، ترتكز على تقليل الفاقد وتعظيم القيمة المتبقية للمكونات، عبر دعم مرونة التصميم وسهولة إعادة الاستخدام. كما يُسهم في تحسين إدارة المواد على المدى الطويل، بما يتماشى مع مبادئ التصميم لأجل التفكيك **(DfD)** والاقتصاد الدائري، ويُمكّن من توثيق نتائج التحليل داخل جداول **BIM** الذكية أو ما يُعرف بجوازات المواد الرقمية **(DMPs)**.

٢-٣-٥ أدوات BIM الداعمة

تُعتبر أدوات **BIM** المتقدمة مثل **Revit**، **Dynamo**، و**Navisworks** من الركائز الأساسية في تطوير نماذج معمارية قابلة للتفكيك وموثقة بشكل دقيق.

Revit: يُستخدم لإنشاء النموذج ثلاثي الأبعاد للمبنى، مع إمكانية إدخال المعلمات الذكية (**Shared Parameters**) لكل عنصر(**Yarmohammadi & Castro-Lacouture, 2018**)، مثل نوع المادة، العمر الافتراضي، وقابلية التفكيك. يُعد **Revit** البيئة الرئيسية لتوثيق خصائص العناصر وإنشاء جداول ذكية تمثّل جوازات المواد الرقمية.

Dynamo: يمثل بيئة برمجة بصرية داخل **Revit**، تتيح إنشاء خوارزميات تحليلية تلقائية لحساب مؤشرات **DfD**(**Kossakowski, 2023**) (مثل قابلية الفصل أو إعادة الاستخدام)، وتوليد جداول تحليلية تُستخدم لدعم القرارات التصميمية القائمة على البيانات.

Navisworks: تُعتبر برامج المحاكاة الزمنية **(D٤)**، مثل **Navisworks** ، أداة فعالة لمحاكاة عملية التفكيك ضمن البُعد الزمني الرابع **(D٤)**، ما يُتيح تقييم التسلسل الزمني.

تعمل هذه الأدوات بشكل تكاملي لدعم بناء نموذج رقمي متكامل، يمكن استخدامه في تحليل الأداء الدائري، وتوثيق خصائص المواد، وتحقيق أهداف التصميم المستدام والقابل للتفكيك.

٢-٤ جوازات المواد الرقمية (Digital Material Passports)

٢-٤-١ تعريف ومفهوم جواز المواد الرقمي (Digital Material Passport - DMP)

يمثل جواز المواد الرقمي **(DMP)** أداة رقمية مبتكرة تهدف إلى توثيق كافة البيانات المرتبطة بالمواد والمكونات المستخدمة في المبنى(**Markou et al., 2025**)، بما في ذلك خصائصها الفيزيائية والكيميائية، مصدرها، طريقة تركيبها، وأسلوب تثبيتها. يُسهم هذا الجواز في تمكين تتبع العناصر خلال مختلف مراحل دورة حياة المبنى، مما يُتيح اتخاذ قرارات مدروسة تتعلق بعمليات الصيانة، التفكيك، إعادة الاستخدام أو إعادة التدوير.

يُعد جواز المواد الرقمي أحد الركائز الأساسية في منظومة البناء الدائري، كونه يربط المكونات المادية بالنظام الرقمي التحليلي ويعزز من مرونة إدارة موارد المشروع عبر الزمن(**Markou et al., 2025**).

٢-٤-٢ المعايير والمعلومات التي يحتويها جواز المادة

يتضمن جواز المواد الرقمي مجموعة من المعايير والمعلومات التفصيلية التي تُسهم في تعزيز الشفافية وقابلية التتبع للعنصر (**Hernandez, 2024**)، ومن أبرز هذه البيانات:

- اسم المادة ومصدرها
- نوع الاستخدام (إنشائي، معماري، تشطيبي)
- العمر الافتراضي المتوقع
- طريقة التثبيت (براغي، لصق، لحام، وصلات معدنية)
- قابلية التفكيك (**Detachment Feasibility**)
- إمكانية إعادة الاستخدام أو التدوير
- الأثر البيئي (مثل البصمة الكربونية والطاقة المجسدة)
- رمز **QR** أو رابط تشعبي لقاعدة بيانات موسعة

تُعد هذه المعلومات ضرورية لتأهيل العناصر ضمن نماذج الاقتصاد الدائري، وتسهم في بناء بنية معرفية رقمية تدعم التصميم المستدام القابل للتفكيك.

٢-٤- ٣ العلاقة بين جواز المادة والاقتصاد الدائري

يُشكل جواز المواد الرقمي أداة محورية في تمكين الاقتصاد الدائري داخل قطاع البناء، حيث يوفّر وسيلة فعالة لتوثيق وتقييم المواد من حيث قابليتها للفصل وإعادة الاستخدام(**Markou et al., 2025**). ومن خلال هذا الجواز، يمكن لمصممي المشاريع:

- تقليل الفاقد الناتج عن الهدم
- تحسين استمرارية استخدام المواد عبر دورات متعددة
- دعم اتخاذ قرارات تصميمية تعتمد على بيانات دقيقة ومحدّثة

- تعزيز التقييم الكمي لاستراتيجيات التفكيك وإعادة الاستخدام

إن هذا التكامل بين المعلومات الرقمية والتطبيقات المادية يُحول المفهوم من "اقتصاد خطي" قائم على الاستخدام والإهمال، إلى "اقتصاد دائري" يعزز من الحفاظ على القيمة والموارد.

٢-٤-٤ طرق إنشاء وربط الجوازات داخل نماذج BIM

يُمكن إنشاء وربط جوازات المواد الرقمية داخل نماذج **BIM** عبر عدد من الطرق التقنية، من أبرزها:

- إدخال معلمات ذكية **(Shared Parameters)** إلى كل عنصر في نموذج **Revit**، مثل نوع المادة، طريقة التثبيت، العمر الافتراضي، وقابلية التفكيك.
- إعداد جداول ذكية **(Schedules)** داخل **Revit** تُعرض بشكل منظم لتوثيق هذه الخصائص.
- تصدير الجداول إلى ملفات **CSV** وربطها بمنصات خارجية، أو تضمين رموز **QR** داخل عناصر النموذج لربطها بمصادر معلومات موسعة.
- استخدام **Dynamo** لأتمتة عمليات إدخال وتحليل البيانات المتعلقة بجوازات المواد.
- تطبيق نظم تصنيف معيارية مثل **OmniClass** أو **IFC** لضمان توافق البيانات بين المشاركين في المشروع ومراحل دورة الحياة المختلفة.

٢-٤-٥ أمثلة منصات داعمة لجوازات المواد الرقمية

توجد عدة منصات عالمية تُسهم في إنشاء وإدارة جوازات المواد الرقمية بفعالية، منها:

Madaster: منصة أوروبية رائدة تُقدّم قاعدة بيانات مخصصة لتوثيق العناصر المعمارية، وتتيح إنشاء جواز رقمي يتضمن معلومات تفصيلية عن الاستخدام وإعادة التدوير وقيمة العنصر المتبقية(**Druijff, 2019**).

BAMB (Buildings As Material Banks): مشروع بحثي أوروبي يهدف إلى تحويل المباني إلى "بنوك مواد"، يتم فيها تتبع المكونات عبر جوازات رقمية قابلة للتحديث والتوسع(**Markou et al.**).

Autodesk Construction Cloud: بيئة **BIM** سحابية متكاملة تُتيح مشاركة الجداول والبيانات التحليلية المستخرجة من **Revit** مع فرق التصميم والموقع(**Das et al., 2015**)، وتُمكّن من توحيد توثيق المواد ومتابعة استخدامها عبر مراحل المشروع.

٣- الفصل الثالث :المنهجية

٣-١ توظيف جوازات المواد (Material Passports) ضمن نموذج BIM

في إطار تعزيز أداء المباني الدائري وتحقيق استدامة فعلية في دورة حياة المكونات، يعتمد هذا البحث على دمج مفهوم **Material Passports** داخل بيئة **Revit** كنموذج أولي لتوثيق خصائص كل عنصر إنشائي.

يوفر هذا النهج إمكانية تحليل المواد من حيث التركيب، طريقة التثبيت، العمر الافتراضي، القابلية للفصل، وقابلية إعادة الاستخدام أو التدوير، مما يسهل اتخاذ قرارات دقيقة خلال مرحلة التصميم، ويدعم ممارسات التفكيك المستقبلية.

وقد تم تطوير نموذج **Material Passport** يدويًا من خلال استخدام **Shared Parameters** داخل **Revit**، بحيث تم ربط كل مكون ببياناته البيئية والوظيفية، في محاكاة مصغّرة لما توفره منصات متقدمة مثل **Madaster**.

يساهم هذا التكامل بين **BIM** و**Material Passports** في بناء قاعدة معرفية رقمية لكل مكون، مما يعزز من التوثيق، التحليل، والاستدامة ضمن النموذج التصميمي المقترح.

٣-١-١ إعداد النموذج الرقمي القابل للتفكيك (DfD) باستخدام Revit

ضمن إطار البحث التطبيقي، تم إعداد نموذج رقمي باستخدام برنامج **Autodesk Revit 2020** يحاكي وحدة معمارية بسيطة قابلة للتفكيك، بهدف التحقق من مدى قابلية العناصر المعمارية لإعادة الاستخدام، وتحقيق التصميم الدائري.

يتكوّن النموذج من مبنى مؤلف من طابقين بمساحة إجمالية تبلغ ، يعتمد على عناصر معيارية يمكن تفكيكها، تشمل الجدران، الأعمدة، البلاطات، والأسقف.

تم اختيار المواد وفق معايير استدامة واضحة مع اعتماد وصلات ميكانيكية **(Screws, Bolted Joints)** تُمكّن من تفكيك المكونات دون تلف وفق الجدول التالي :

العنصر	المادة
الجدار A	**glue liminated timber**
الجدار B	**gLass clear glazing temper**
الأعمدة	**m.glulam southern pine**
البلاطات	**glulam c24**

الجدول ١٠: المواد المستخدمة في عناصر النموذج

تم اختيار المواد الإنشائية والمعمارية في النموذج وفق معايير توازن بين الأداء الوظيفي، الاستدامة البيئية، وقابلية التفكيك وإعادة الاستخدام، بما ينسجم مع فلسفة التصميم لأجل التفكيك (**Design for Disassembly - DfD**) ومبادئ جوازات المواد الرقمية.

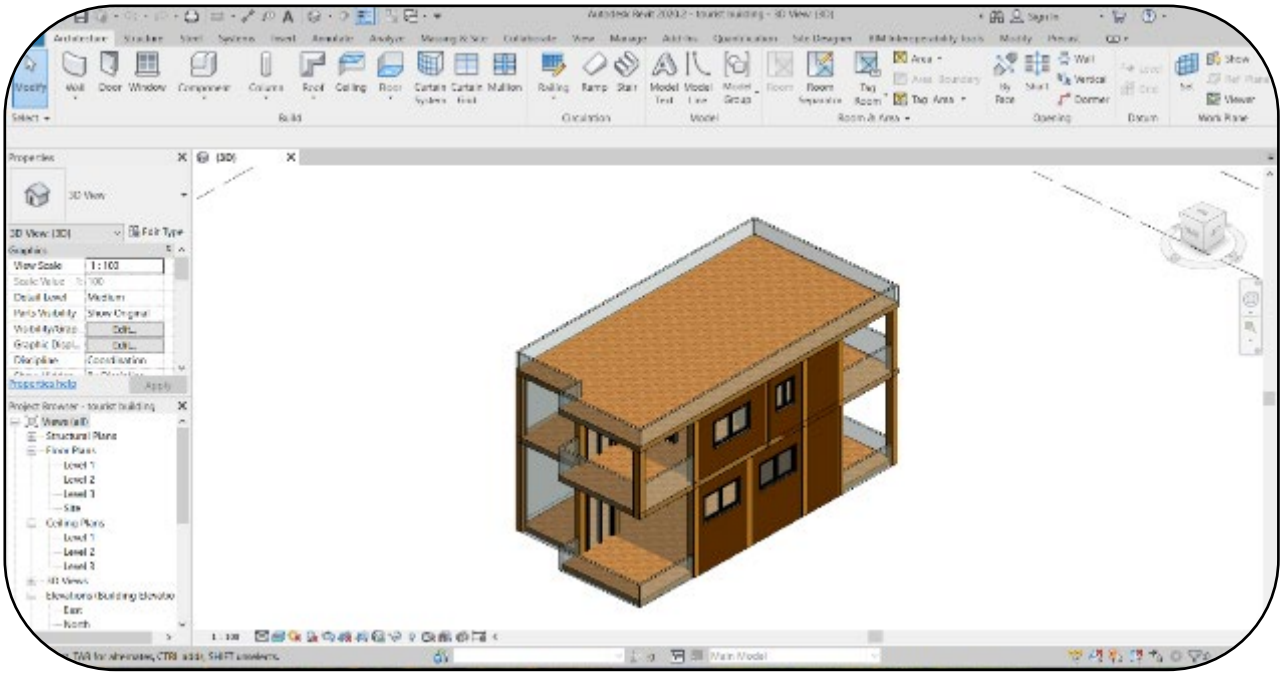
Glue-Laminated Timber تم استخدامه في الجدران نظرًا لكونه مادة متجددة وقابلة للتفكيك، تتميز بقدرتها على تحقيق عزلة حرارية جيدة، إضافة إلى قدرتها على امتصاص الكربون خلال دورة حياتها. كما تتيح تقنياتها التركيبية إمكانية التفكيك دون تلف يُذكر، باستخدام وصلات ميكانيكية.

glass clear glazing temper تم اعتماده في الجدران الزجاجية لتحقيق الإضاءة الطبيعية وتقليل الاعتماد على الإنارة الاصطناعية، مما يسهم في تقليل استهلاك الطاقة. كما يتميز هذا النوع من الزجاج بمتانته العالية، وقابليته لإعادة الاستخدام في حال تفكيكه بطريقة سليمة.

m.glulam southern pie تُمثّل هذه المادة خيارًا إنشائيًا قويًا وخفيف الوزن للأعمدة مقارنة بالخرسانة أو الفولاذ، مع خصائص ميكانيكية تسمح بحمل الأحمال الرأسية. كما أنها مادة متجددة، وقابلة للتفكيك وإعادة التشكيل أو الاستخدام في بيئات أخرى.

البلاطات من Glulam C24 تم اختيارها لما توفره من توازن بين المقاومة الإنشائية العالية وخفة الوزن، كما أن تصنيف **C24** يُعد من التصنيفات القياسية التي تضمن الأداء الجيد تحت الأحمال. إضافة إلى ذلك، فهي تدعم مبادئ **DfD** من خلال تركيبها باستخدام وصلات قابلة للفك.

تم إنشاء النموذج ثلاثي الأبعاد للمبنى في برنامج **Revit**



الشكل5 : النموذج ثلاثي الأبعاد للمبنى

٣-١-٢ تطوير جوازات المواد الرقمية داخل Revit

من أجل توثيق الخصائص التفصيلية لكل عنصر في المبنى، تم اعتماد مفهوم جواز المواد الرقمي **(Digital Material Passport)**، وذلك من خلال إنشاء مجموعة من المعلمات الذكية **(Shared Parameters)** داخل بيئة **Revit**، شملت:

نوع المادة **(Material Type)**

طريقة التثبيت **(Fixing Method)**

القابلية للفصل **(Detachability)**

العمر الافتراضي المتوقع **(Lifespan) Expected -)**

قابلية إعادة الاستخدام **(Reusability-score)**

قابلية التدوير **(Recycling Potential)**

سهولة التفكيك (**Disassembly Ease**)

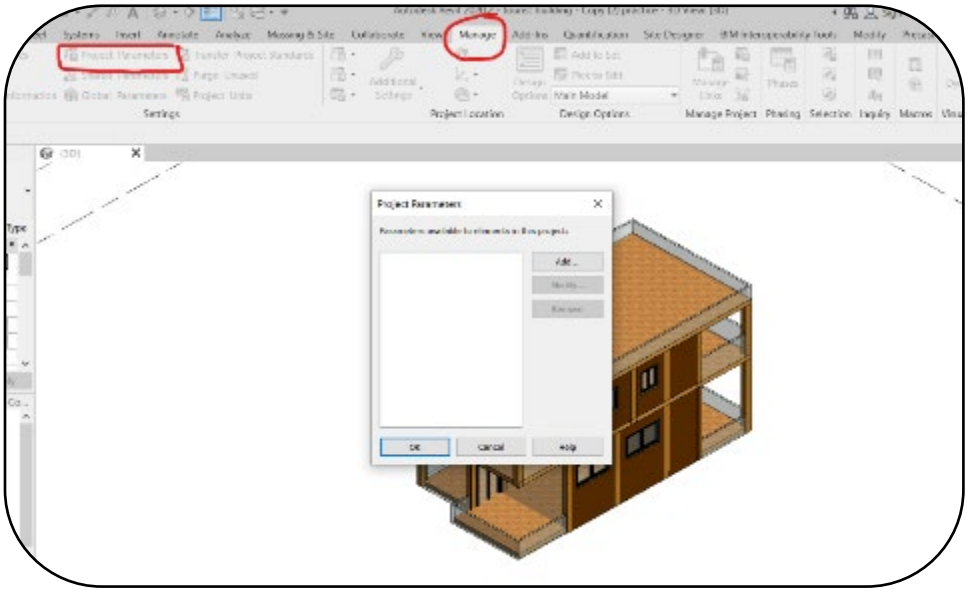
وزن المادة (**Material Weight**)

معدل الاسترداد (**Recovery Rate**)

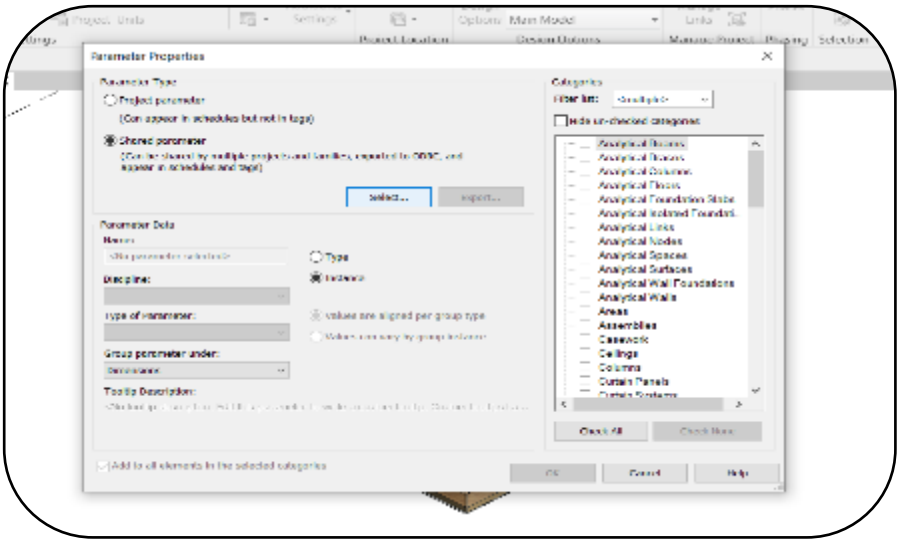
مدى التوافق مع مبادئ التفكيك (**DfD Compliance**)

الموقع داخل النموذج (**Location in Model**)

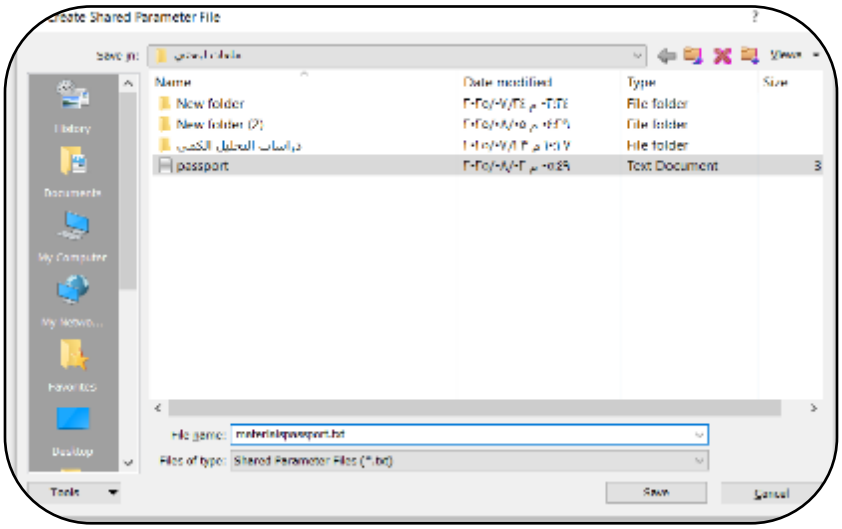
من قائمة **manage** نختار **project parameters** فتفتح نافذة



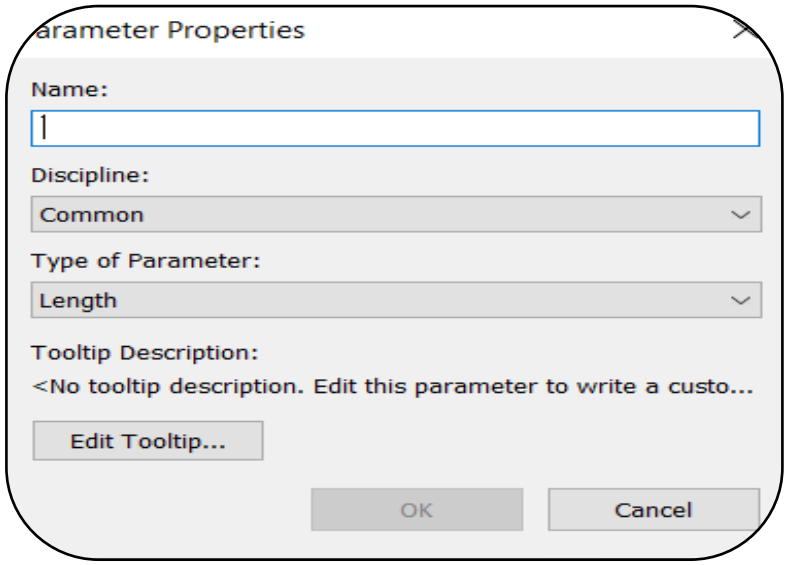
نختار **Add** فتفتح نافذة **project parameters** نختار **shared parameters** ثم **select**



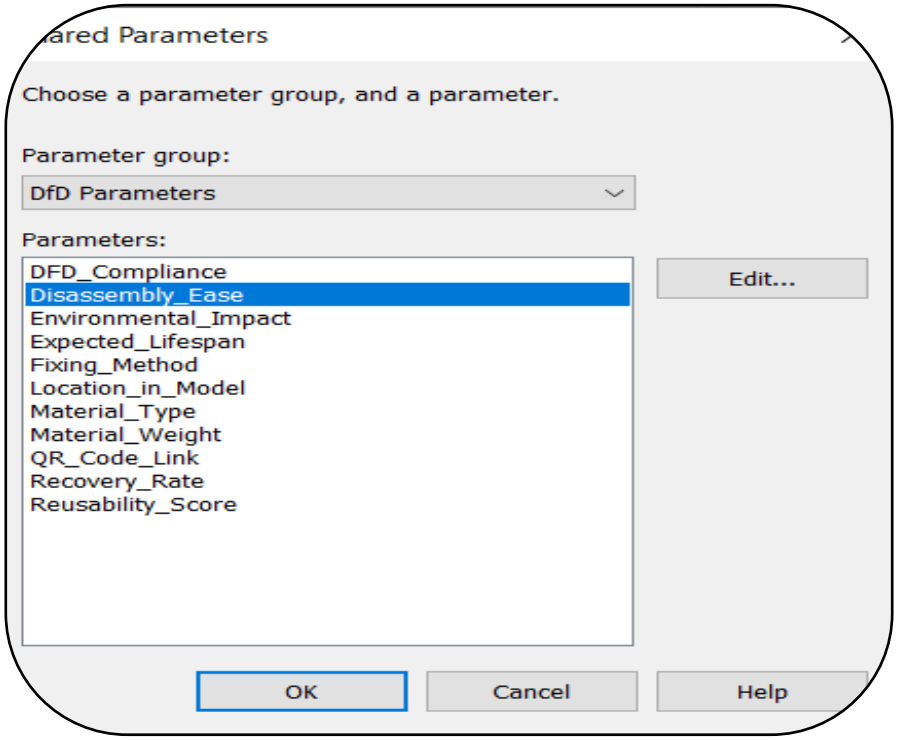
من **create** نقوم بإنشاء ملف باسم **materials passports** ونحفظه



يتم إضافة مجموعة جديدة باسم **DfD parameters** ثم نبدأ بإضافة البارامترات وتحديد نوع البيانات

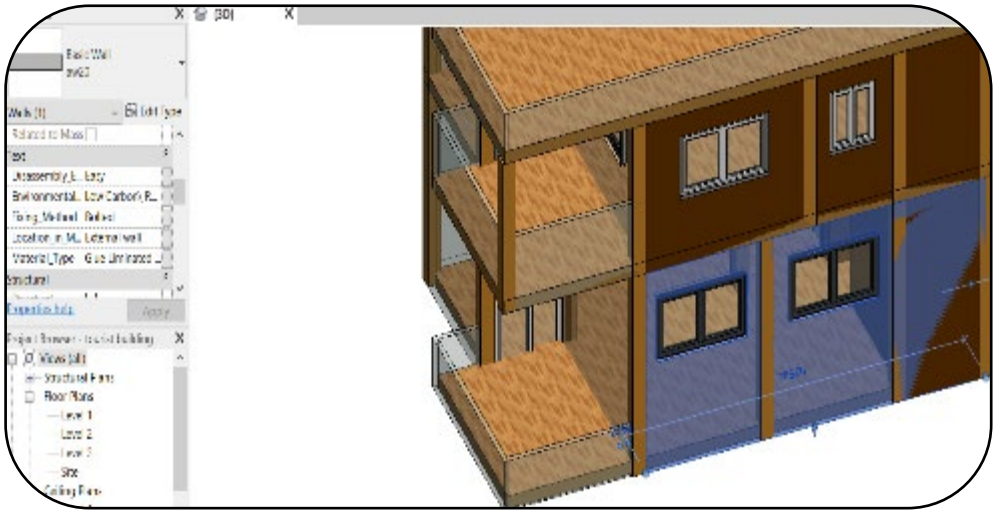


البارامترات التي تمت إضافتها



الشكل6 : البارمترات المضافة

نقوم بإضافة خصائص مادة كل عنصر وذلك بتحديد العنصر ومن قائمة **properties** تظهر البارامترات التي قمنا بإضافتها نبدأ بإضافة خصائص كل مادة



جدول البارامترات:

اسم البارامتر	نوع البارامتر	الغرض من البارامتر
Material Type	**Text**	لتحديد نوع المادة
Fixing Method	**Text**	طريقة التثبيت (**Bolted / Screwed / Glued / Clipped**)
Reusability Score	**Integer**	درجة إعادة الاستخدام (**High / Medium / Low** أو ١–٥)
Disassembly Ease	**Text**	مدى سهولة التفكيك (**Easy / Moderate / Difficult**)
Expected Lifespan	**Number**	العمر الافتراضي للمادة بالسنوات
Material Weight	**Number**	الكتلة النوعية للمادة (اختياري للتحليل البيئي)
Environmental Impact	**Text**	تقييم الأثر البيئي (مثال: **Low Carbon / High Embodied Energy**)
Recovery Rate	**Number**	نسبة الاسترداد بعد التفكيك (مثال: ٩٠٪)
Location in Model	**Text**	تحديد موقع العنصر في المشروع (مثال: **External Wall A / Column 01**)
DFD Compliance	**Yes\NO**	هل هذه المادة متوافقة مع **DfD؟**
QR Code Link	**URL**	رابط خارجي لكتالوج المادة / مواصفات إضافية

الجدول ١١: هيكل البيانات للمعلمات المشتركة **(Shared Parameters)** المستخدمة في جوازات المواد الرقمية.

البارامترات الخاصة بكل عنصر

الجدار من نوع Glue-Laminated Timber

اسم البارامتر	نوع البارامتر
Material Type	**Glue Laminated Timber**
Fixing Method	**Bolted**
Reusability Score	**5**
Disassembly Ease	**Easy**
Expected Lifespan	**years 60**
Material Weight	**kg\m^2 24**
Environmental Impact	**Low Carbon \Renewable**
Recovery Rate	**90%**
Location in Model	**External Wall**
DFD Compliance	**Yes**
QR Code Link	**URL**

الجدول ١٢: **قيم البارامترات الخاصة بالجدار Glue-Laminated Timber**

الجدار من نوع glass clear glazing temper

اسم البارامتر	نوع البارامتر
Material Type	**glass clear glazing temper**
Fixing Method	**clamped**
Reusability Score	**4**
Disassembly Ease	**Moderate**
Expected Lifespan	**years 40**
Material Weight	**kg\m^2 30**
Environmental Impact	**Low Carbon \Renewable**
Recovery Rate	**90%**
Location in Model	**Curtain wall**
DFD Compliance	**Yes**
QR Code Link	**URL**

الجدول ١٣: **قيم البارامترات الخاصة بالجدار glass clear glazing temper**

العمود من نوع m.glulam southern pie

اسم البارامتر	نوع البارامتر
Material Type	**m.glulam southern pie**
Fixing Method	**Steel base plate + bolts**
Reusability Score	**5**
Disassembly Ease	**Easy**
Expected Lifespan	**years 80**
Material Weight	**kg\m^2 50**
Environmental Impact	**Renewable\ Low embodied carbon**
Recovery Rate	**90%**
Location in Model	**column**
DFD Compliance	**Yes**
QR Code Link	**URL**

الجدول ١٤ : **قيم البارامترات الخاصة بالعمود m.glulam southern pie**

البلاطة من نوع Glulam C24

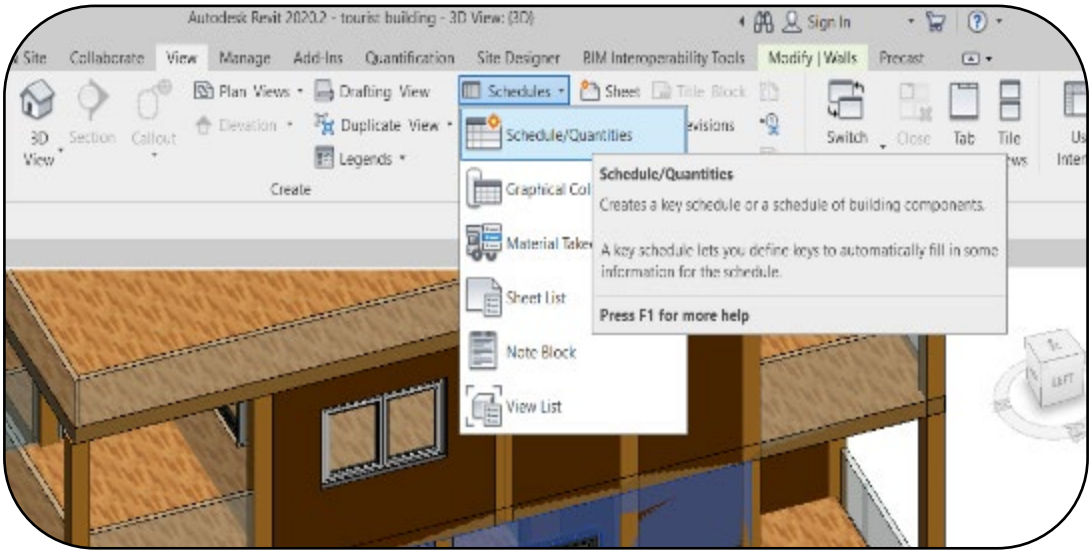
اسم البارامتر	نوع البارامتر
Material Type	**Glulam C24**
Fixing Method	**Screwed\ Bolted to steel connector**
Reusability Score	**4**
Disassembly Ease	**Moderate**
Expected Lifespan	**years 60**
Material Weight	**kg\m^2 30**
Environmental Impact	**Low carbon**
Recovery Rate	**85%**
Location in Model	**Floor**
DFD Compliance	**Yes\NO**
QR Code Link	**URL**

الجدول ١٥: **قيم البارامترات الخاصة** بالبلاطة **Glulam C24**

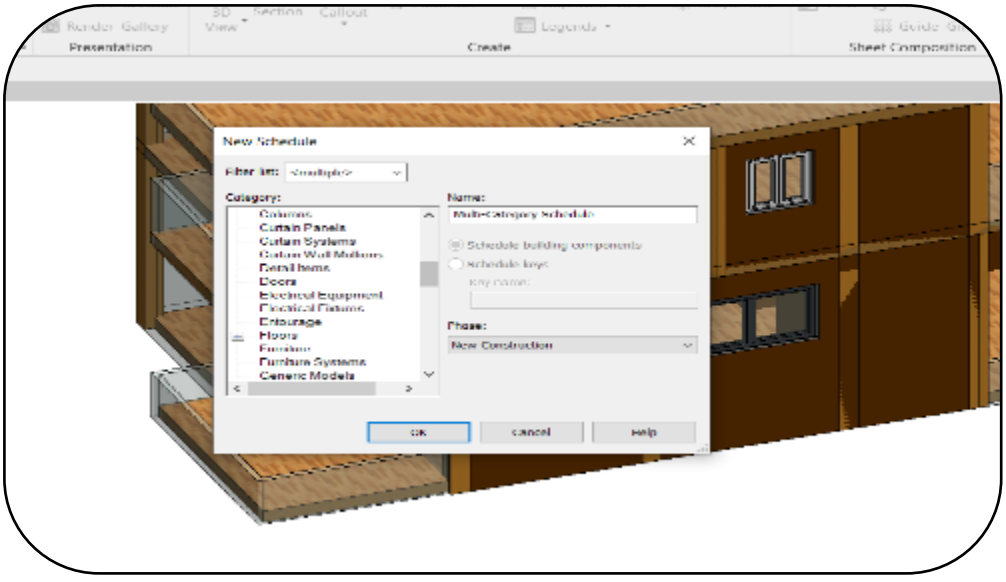
٣-١-٣ إنشاء جداول جوازات المواد (Schedules) داخل Revit

من أجل استكمال توثيق خصائص العناصر ضمن النموذج الرقمي، تم إعداد جداول ذكية **(Schedules)** داخل بيئة **Revit**، بهدف عرض المعلمات المرتبطة بكل عنصر إنشائي بطريقة منظمة ومتكاملة. وقد مثّلت هذه الجداول الأساس الرقمي لجوازات المواد، بما يُسهّل استخراج المعلومات وتحليلها.

من قائمة **view** نختار **schedules** نختار **Schedule\Quantities**

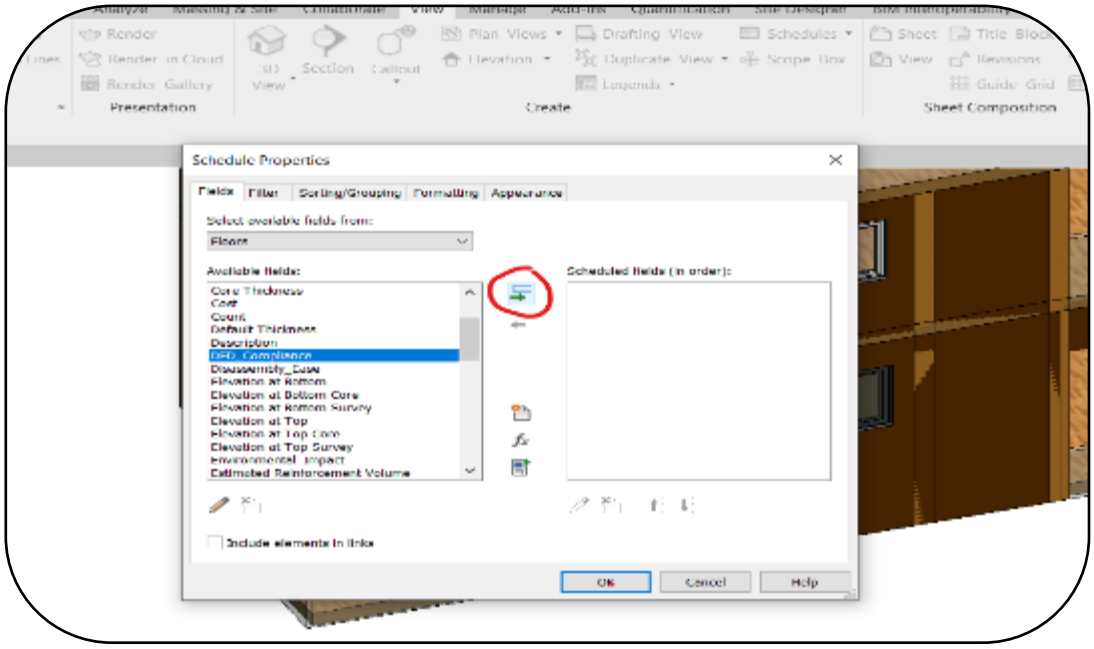


نختار من **Category** العنصر الذي سنعد جواز رقمي له

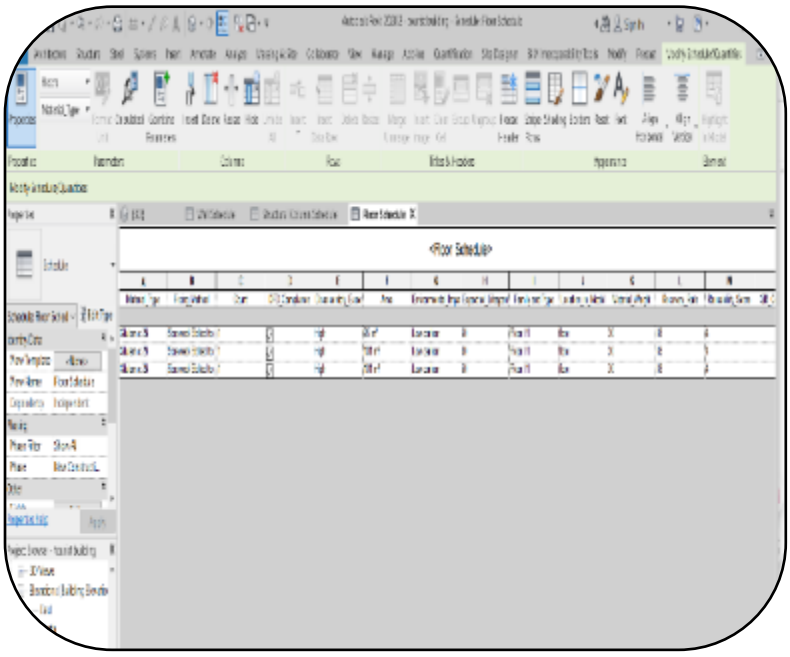


نقوم بإدراج المعلمات التي تم إنشاؤها مسبقًا كـ **Shared Parameters**، والتي تشمل:

، Disassembly Ease ، Reusability Score ، Fixing Method ، Material Type
Recovery ، Environmental Impact ، Material Weight ، Expected Lifespan
QR Code Link ، Location in Model ، DFD Compliance ، Rate

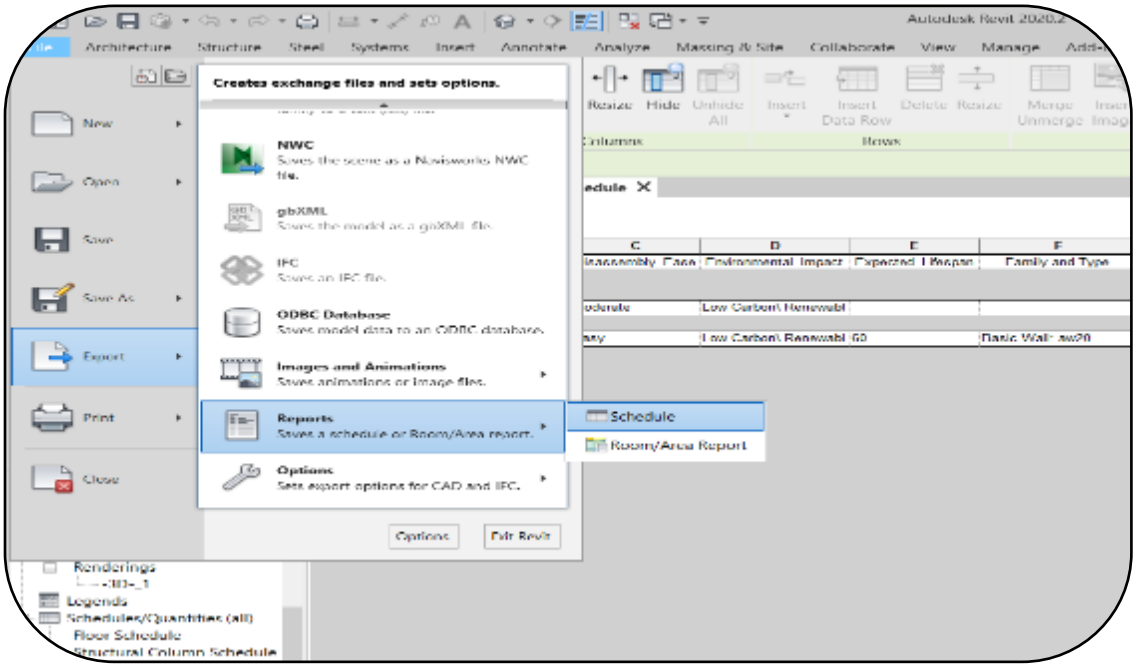


نحصل على الجداول الخاصة بكل عنصر



تصدير الجداول وتحليل البيانات

نقوم بتصدير الجداول إلى **Excel** من قائمة **file** نختار **export** ثم **report** ثم نختار **schedule** ونقوم بحفظ الملف



نقوم بتنسيق جوازات المواد في **Excel**

Material Passport

Glulam 24c

Floor Schedule	**Definition of an element**			**Material Appearance in Revit**
		Name of the element	**Glulam C24 Slab**	
		Type of element	**floor**	
		Location of the element	**levels**	
		Revit Model		
	Material Information	**Material Name**	**Glulam C24**	
		Classification	**Laminated Timber**	
		Specific Weight / Density	**30**	**Recovery Rate 85%**
		Treatment	**Moisture and Insect Protection Treatment, Industrial Drying**	
		Fire Resistance	**B-s2,d0 (According to European standards)**	
	Disassemblability and Reusability	**Fixing Method**	**Screwed / Bolted to steel connectors**	**DFD Compliance Yes**
		Disassemblability	**High**	
		Reuse	**3 to 4 times**	
		Lifespan	**60 years**	
		Damage Assessment During Disassembly	**low**	

	Recycling	Possible (reshaping or using the pieces in other applications)	
Environmental Impact	Carbon Footprint	Negative (absorbs carbon during its lifecycle)	
	Material Source	Sustainably Managed Forests (FSC / PEFC)	
	Distance from the supplier	300 km	
Physical Properties	Density	560 kg/m³	
	Thermal Conductivity	0.12 W/(m·K)	
	Specific Heat	0.19 J/(g·°C)	
	Emissivity	0.85	
	Permeability	0 ng/(Pa·s·m²)	
	Porosity	0.01	
	Reflectivity	0	
	Electrical Resistivity	10000000 Ω·m	
Mechanical Properties	Young's Modulus	x=y=z=11600 mpa	
	Poisson's Ratio	x=y=z=0.25 mpa	
	Shear Modulus	x=y=z=590 mpa	
Structural Strength	Bending	24 mpa	
	Compression Parallel to Grain	21 mpa	
	Compression Perpendicular to Grain	2.4 mpa	
	Shear Parallel to Grain	2,2 mpa	
	Tension Parallel to Grain	14 mpa	
	Tension Perpendicular to Grain	0.3 mpa	

الجدول 16 : **جدول الجواز الرقمي لمادة Glulam 24c**

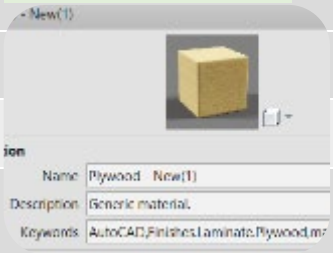
Material Passport — Glass Clear Glazing Temper

Wall Schedule	**Definition of an element**			**Material Appearance in Revit**
		Name of the element	External Wall	
		Type of element	Wall	
		Location of the element	East Elevation	
		Revit Model		
	Material Information	Material Name	Glass Clear Glazing Temper	
		Classification	Clear Tempered Glass	
		Specific Weight / Density	25	**Recovery Rate 90%**
		Treatment	Thermally tempered to enhance strength	
		Fire Resistance	Class A1 (Non-combustible)	
	Disassemblability and Reusability	Fixing Method	clamped	**DFD Compliance Yes**
		Disassembl-ability	moderate	
		Reuse	2–3 times with proper disassembly	
		Lifespan	40 years	
		Damage Assessment During Disassembly	Medium – may be prone to breakage	
		Recycling	High (Can be melted and remanufactured)	
	Environmental Impact	Carbon Footprint	Low Carbon / Renewable (Low Emission)	
		Material Source	Local / Regional Manufacturer	
		Distance from the supplier	Approximately less than 300 km	
	Physical Properties	Density	2,420–2,480 kg/m³	
		Thermal Conductivity	1.1 W/(m·K)	

		Specific Heat	0.84 J/(g·°C)			
		Emissivity	0.95			
		Permeability	0 ng/(Pa·s·m²)			
		Porosity	0.01			
		Reflectivity	0			
		Electrical Resistivity	1.00E+10 Ω·m			
	Mechanical Properties	Young's Modulus	x=y=z=70000 mpa			
		Poisson's Ratio	x=y=z=0.23 mpa			
		Shear Modulus	x=y=z=28500 mpa			
	Structural Strength	Yield Strength	175 mpa			
		Tensile Strength	175 mpa			

الجدول ١٧: **جدول الجواز الرقمي لمادة Glass Clear Glazing Temper**

Material Passport — Glue Laminated Timber

Wall Schedule	**Definition of an element**			**Material Appearance in Revit**
		Name of the element	**External Wall**	
		Type of element	**Wall**	
		Location of the element	**Evelation**	
		Revit Model		
	Material Information	**Material Name**	**Glue Laminated Timber**	
		Classification	**Engineered Wood / Organic Material**	
		Specific Weight	**24**	**Recovery Rate 85%**
		Treatment	**Treated for moisture and weather resistance**	
		Fire Resistance	**B-s2, d0 (Good fire performance)**	
	Disassemblability and Reusability	**Fixing Method**	**Bolted (Using bolts and nuts)**	**DFD Compliance Yes**
		Disassemblability	**Easy**	
		Reuse	**5 times**	
		Lifespan	**60 years**	
		Damage Assessment During Disassembly	**low**	
		Recycling	**Partially possible (After glue removal)**	
	Environmental Impact	**Carbon Footprint**	**Low Carbon / Renewable**	

		Material Source	Sustainably managed forests (FSC-certified wood)				
		Distance from the supplier	Depends on the supply location				
	Physical Properties	Density	560 kg/m³				
		Thermal Conductivity	0.12 W/(m·K)				
		Specific Heat	0.19 J/(g·°C)				
		Emissivity	0.85				
		Permeability	0 ng/(Pa·s·m²)				
		Porosity	0.01				
		Reflectivity	0				
		Electrical Resistivity	10000000 Ω·m				
	Mechanical Properties	Young's Modulus	x=y=z=11600 mpa				
		Poisson's Ratio	x=y=z=0.25 mpa				
		Shear Modulus	x=y=z=590 mpa				
	Structural Strength	Bending	24 mpa				
		Compression Parallel to Grain	21 mpa				
		Compression Perpendicular to Grain	2.4 mpa				
		Shear Parallel to Grain	2,2 mpa				
		Tension Parallel to Grain	14 mpa				
		Tension Perpendicular to Grain	0.3 mpa				

الجدول ١٨: **جدول الجواز الرقمي لمادة Glue Laminated Timber**

٣-١-٤ رفع جوازات المواد إلى منصة Google Drive وربطها بالنموذج الرقمي

في المرحلة النهائية من إعداد جوازات المواد الرقمية **(Material Passports)** داخل بيئة **Revit**، تم رفع جميع جوازات المواد بصيغة **Excel** على منصة **Google Drive**، بهدف ضمان حفظ البيانات في بيئة آمنة وسهلة الوصول، إضافةً إلى توفير قناة مباشرة لمشاركة المعلومات مع جميع الأطراف المعنية بالمشروع، سواء من المصممين أو المهندسين أو الاستشاريين.

تم إعداد المجلد بحيث يكون متاح الوصول لجميع الأفراد المشاركين في المشروع، بما في ذلك المصممين، المهندسين، المشرفين، والعمال، مما يضمن وصول المعلومات بسهولة إلى الأطراف المعنية على اختلاف مستوياتهم الوظيفية.

كما تم ضبط إعدادات المشاركة بحيث تسمح بالاطلاع **(View)** وتحميل نسخة عند الحاجة، دون الحاجة لحساب **Google** خاص، لتسهيل الوصول في مواقع العمل الميدانية أو عبر الهواتف الذكية.

تم إنشاء رموز **QR** لكل رابط ملف جواز على **Google Drive**، وإدراج هذه الروابط في خانة **QR Code Link** ضمن معلمات جوازات المواد في **Revit**، بحيث يمكن لأي مستخدم مسح الرمز عبر الهاتف للوصول الفوري إلى الوثائق المرجعية والمعلومات الفنية.

يساعد هذا التكامل بين **BIM** والتخزين السحابي في تحسين تبادل البيانات، دعم قرارات الصيانة أو الاستبدال، وضمان استمرارية المعلومات طوال دورة حياة المبنى، بما يتماشى مع مبادئ التصميم من أجل التفكيك **(DfD)** والاستدامة.

٣-١-٥ تصميم بطاقات جواز المواد لاستخدامها في الموقع

إضافةً إلى النسخة الرقمية لجوازات المواد المخزنة على منصة **Google Drive** والمرتبطة بالنموذج الرقمي في **Revit**، تم تصميم نسخة مطبوعة على شكل بطاقات تعريفية **(Material Passport Cards)** قابلة للصق مباشرة على المواد عند توريدها إلى موقع المشروع.

تتضمن هذه البطاقات أهم البيانات المختصرة لكل مادة، مثل: اسم المادة، نوعها، خصائصها الفيزيائية والميكانيكية الأساسية، العمر الافتراضي، درجة القابلية للتفكيك وإعادة الاستخدام، ورمز **QR** المرتبط بملف الجواز الرقمي الكامل.

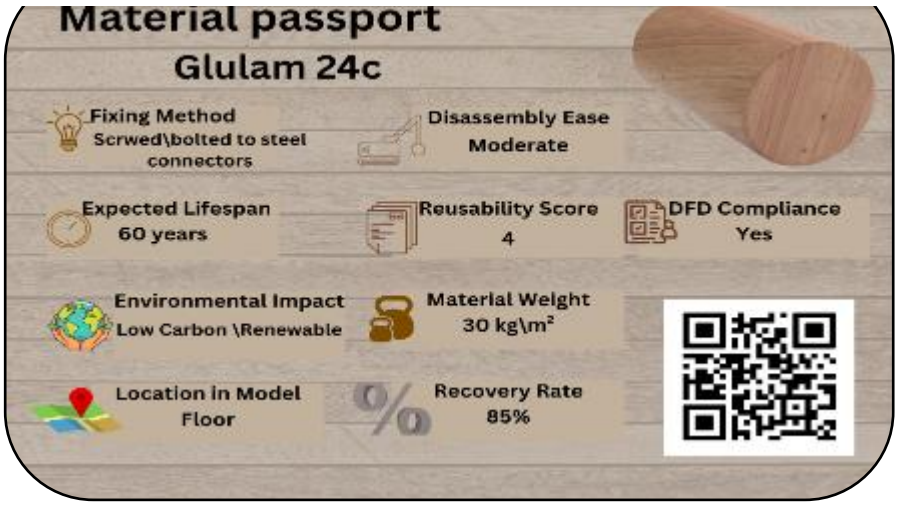
يهدف هذا الأسلوب إلى تسهيل التعرف على المواد في الموقع بشكل فوري، وتمكين العمال والفنيين والمشرفين من الوصول إلى المعلومات التفصيلية عبر مسح رمز الـ **QR** باستخدام الهاتف المحمول، مما يدعم عمليات التركيب، التفكيك، وإعادة الاستخدام ضمن منهجية التصميم من أجل التفكيك **(DfD)**.

كما أن وجود هذه البطاقات على المواد في الموقع يعزز من تتبعها خلال سلسلة التوريد، ويضمن توافقها مع معايير الاستدامة والمتطلبات الفنية المعتمدة في المشروع.

٣-١-٦ بطاقات الجوازات الرقمية للمواد

الشكل7 جواز مادة Glue- Laminated Timber

الشكل8 جواز مادة Glass Clear Glazing Temper



الشكل9 جواز مادة Glulam 24c

٣-٢ تطوير مؤشر قابلية التفكيك Disassembly Index وتحليله باستخدام Dynamo

في إطار الانتقال بالتحليل من التوثيق الوصفي إلى التقييم الكمّي، تم تبني منهجية متقدمة لتطوير **مؤشر قابلية التفكيك Disassembly Index** يهدف هذا المؤشر إلى تكثيف الخصائص المتعددة لكل مكون في قيمة رقمية واحدة وموضوعية، تعكس مدى توافقه مع مبادئ التصميم الدائري.

ولتحقيق أتمتة هذه العملية التحليلية، تم توظيف أداة البرمجة البصرية **Autodesk Dynamo** لإنشاء سكربت مخصص. يقوم هذا السكربت بقراءة البيانات الموثقة مسبقًا في جوازات المواد الرقمية، ومن ثم يقوم

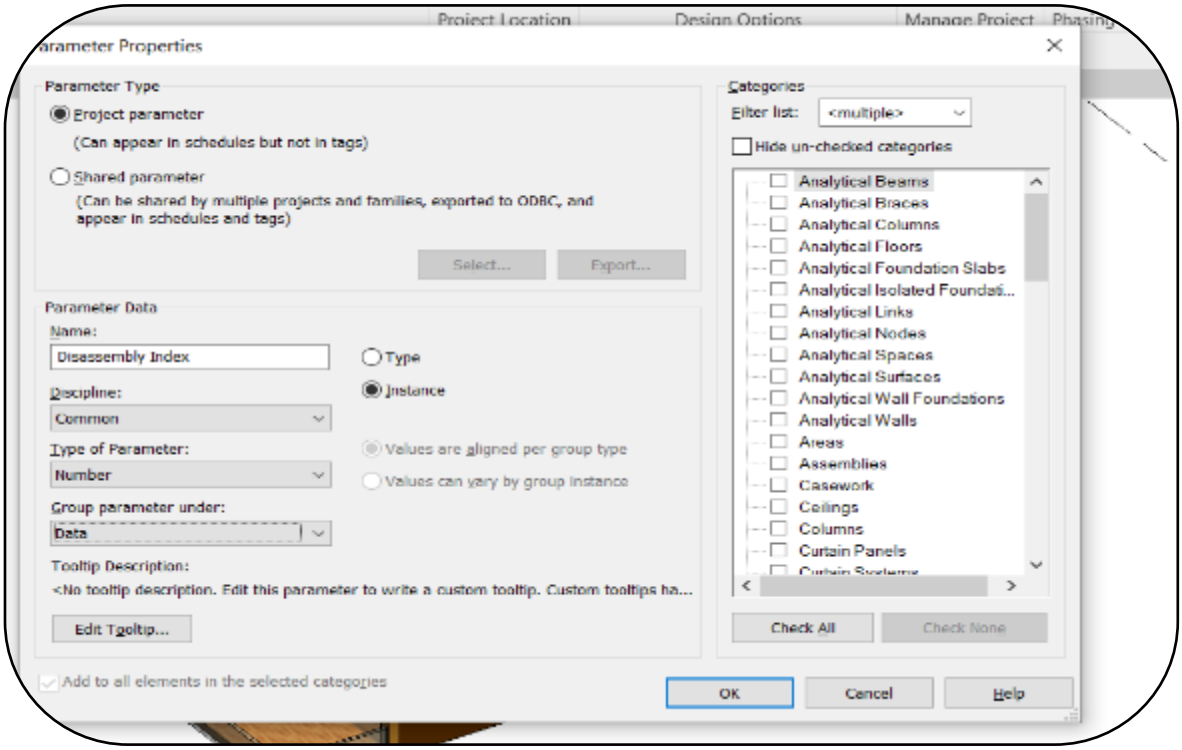
بتطبيق **نموذج حسابي موزون** تم تطويره خصيصًا لهذا البحث. يتم من خلال هذا النموذج تقييم كل عنصر بناءً على معايير رئيسية مثل طريقة التثبيت وسهولة التفكيك.

يساهم هذا النهج المبتكر في تحويل نموذج معلومات البناء **BIM** من مجرد قاعدة بيانات ثابتة إلى أداة تحليل ديناميكية. يتم تتويج هذه العملية بإعادة كتابة قيم المؤشر المحسوبة إلى النموذج، مما يمهد الطريق لإنشاء خرائط لونية بصرية، تقدم تغذية راجعة فورية وتدعم اتخاذ قرارات تصميمية مستنيرة وقائمة على البيانات.

٣-٢-١ إنشاء بارامتر "مؤشر قابلية التفكيك" في Revit :

من قائمة **manage** نختار **project parameters**

تظهر نافذة **project parameters** نختار **Add** ثم نختار **project parameter** ونملأ حقول **parameter Data** كما في الصورة ، ومن قائمة **Categories** نحدد جميع الفئات التي نريد تحليلها (**Walls, Floors, Structural Columns**)



الآن أصبح لدينا حقل فارغ في قائمة الخصائص لكل عنصر من هذه الفئات **properties** ، جاهز لاستقبال القيمة الرقمية التي سيحسبها **Dynamo**.

٣-٢-٢ تطوير النموذج الحسابي لمؤشر قابلية التفكيك

لتحقيق تقييم كمّي وموضوعي، تم تطوير نموذج حسابي مخصص لـ "مؤشر قابلية التفكيك". يعتمد هذا النموذج على منهجية "الترجيح الموزون" **(Weighted Scoring Method)**، التي تقوم على تحويل المعايير النوعية إلى قيم رقمية ومن ثم دمجها في معادلة واحدة تعكس الأهمية النسبية لكل معيار. وقد تم بناء هذا النموذج عبر ثلاث خطوات متسلسلة.

تحديد نظام الدرجات للمعايير (Scoring System)

تمثل الخطوة الأولى في بناء النموذج تحويل المعايير الوصفية المستخلصة من جوازات المواد إلى قيم رقمية قابلة للحساب ضمن مقياس موحد (من ١ إلى ٥)، حيث تمثل الدرجة الأعلى (٥) الأفضلية القصوى. وقد تم تحديد الدرجات للمعايير الرئيسية كما يلي:

- **معيار طريقة التثبيت fixing method** : تم منح الوصلات الميكانيكية الجافة والقابلة للعكس بالكامل (مثل:**Bolted, Screwed, Clamped**) الدرجة القصوى **(٥)**، نظرًا لأنها تحقق المبدأ الأساسي للتصميم القابل للفك دون إتلاف المكونات. في المقابل، تُمنح الوصلات الدائمة أو التي يصعب عكسها الدرجة الدنيا **(١)**.
- **معيار سهولة التفكيك Disassembly Ease** : يعكس هذا المعيار تقييم الجدوى العملية لعملية الفك. تم تحديد الدرجات كالتالي

  (٥) للحالات التي توصف بـ **Easy**

  (٣) للحالات **Moderate**

  (١) للحالات **Difficult**

- **معيار درجة إعادة الاستخدام Reusability Score** : بما أن هذا المعيار تم إدخاله كقيمة رقمية بالأصل (من ١ إلى ٥)، فقد تم استخدامه مباشرة في المعادلة دون الحاجة إلى تحويل.

المعيار	القيمة المدخلة	الدرجة الرقمية
fixing method	**Bolted, clamped, Steel base plate + bolts, Screwed**	**5**
	Glued, Welded, Cast-in-place	**1**
Disassembly Ease	**Easy**	**5**
	Moderate	**3**
	Difficult	**1**
Reusability Score	قيمة رقمية من **1 - 5**	تستخدم القيمة كما هي

الجدول ١٩: نظام الدرجات **(Scoring System)** المعتمد لتحويل المعايير الوصفية إلى قيم رقمية

تحديد الأوزان النسبية للمعايير (Weighting)

بما أن تأثير المعايير الثلاثة على قابلية التفكيك ليس متساويًا، تم تحديد أوزان نسبية لكل معيار لتعكس أهميته في التقييم النهائي. وقد تم توزيع الأوزان (بمجموع **1**) كما يلي :

- **وزن طريقة التثبيت 0.5 = (W_fix) (٥٠٪)** تم منحه الوزن الأعلى لأنه يُعتبر العامل الحاسم والشرط الأساسي الذي يحدد إمكانية تفكيك العنصر من عدمه.
- **وزن سهولة التفكيك0.3 = (W_ease) (٣٠٪)** يأتي في المرتبة الثانية من حيث الأهمية، حيث يقيّم الجدوى العملية لعملية الفك بعد التأكد من إمكانيتها.
- **وزن درجة إعادة الاستخدام 0.2 = (W_reuse) (٢٠٪)** يمثل الهدف النهائي من عملية التفكيك ضمن إطار الاقتصاد الدائري، وهو الاستفادة من العنصر المفكك.

صياغة المعادلة النهائية لمؤشر قابلية التفكيك

بناءً على نظام الدرجات والأوزان المحددة، تم صياغة المعادلة النهائية لحساب مؤشر قابلية التفكيك **(DI)** لكل عنصر في النموذج على النحو التالي:

DI = (Fixing_Score × 0.5) + (Ease_Score × 0.3) + (Reusability_Score × 0.2)

حيث أن:

DIمؤشر قابلية التفكيك **(Disassembly Index)**، وتتراوح قيمته بين **1** (الأسوأ) و **5** (الأفضل).

Fixing_Score الدرجة الرقمية لطريقة التثبيت.

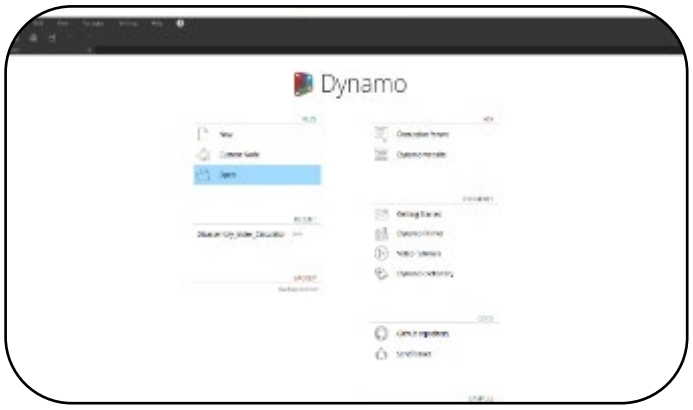
Ease_Score الدرجة الرقمية لسهولة التفكيك.

Reusability_Score الدرجة الرقمية لإعادة الاستخدام.

٣-٢-٣ أتمتة النموذج الحسابي باستخدام Dynamo

لتحويل النموذج الحسابي النظري إلى أداة تحليلية فعالة، تم بناء سكربت مخصص باستخدام بيئة البرمجة البصرية**Dynamo.**

من برنامج **Revit** نختار من قائمة **manage** نختار **Dynamo** ثم **new**



تم تصميم السكربت لتنفيذ عملية التقييم بشكل آلي عبر خمس مراحل منطقية متسلسلة.

١- جمع وتوحيد عناصر النموذج:

تم استهداف الفئات الإنشائية والمعمارية الرئيسية في المشروع (الجدران، الأعمدة الإنشائية، والبلاطات). استُخدمت عقد **All Elements of Category** لسحب جميع عناصر كل فئة، ثم تم دمجها في قائمة بيانات واحدة وموحدة باستخدام عقدتي **List.Create** و **List.Flatten**، مما يضمن تطبيق التحليل بشكل شامل على كامل النموذج.

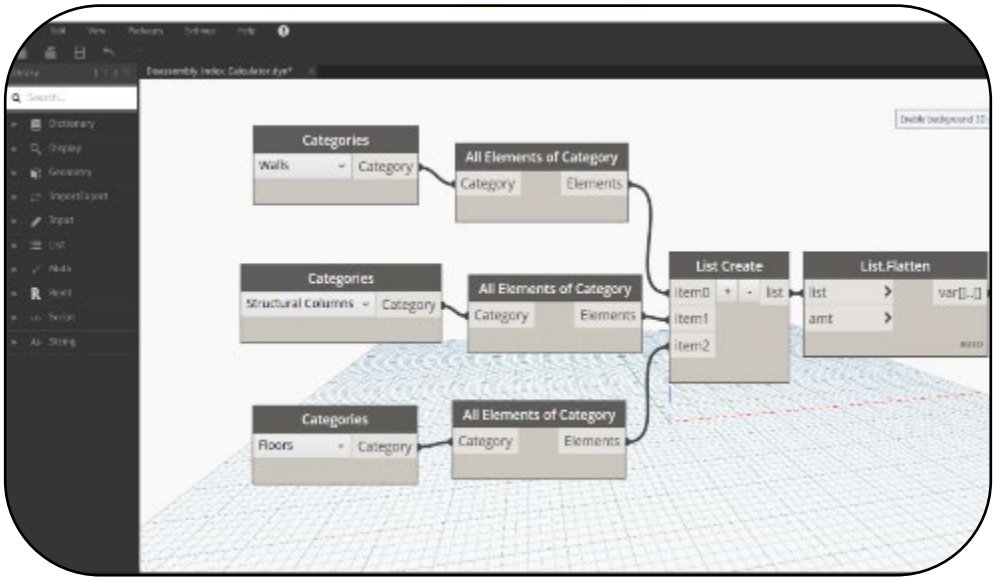
نضيف العقد بالضغط بالزر اليميني وكتابة اسم العقدة التي نحتاجها ، نضيف عقدة **Categories** ومن القائمة داخل العقدة، نختار **Walls** ثم نضيف عقدة **All Elements of Category** ، نسحب خيطًا من مخرج عقدة **Categories** إلى مدخل **category** في العقدة الثانية.

وبنفس الطريقة نكرر العملية بالنسبة ل **Structural Columns** و **Floors**.

نضيف عقدة **List.Create** لجمع العناصر معاً ، فيها مدخلين **item0, item1** نضغط على إشارة + لنضيف مدخل ثالث ، نصل مخرجات عقد **All Elements of Category** الثلاثة بمداخل **List.Create**

نضيف عقدة **List.Flatten** التي تنظم القائمة وتجعلها بسيطة وواضحة، نصل مخرج **List.Create** بمدخل هذه العقدة.

أصبح لدينا قائمة واحدة تحتوي على كل الجدران والأعمدة والبلاطات في المشروع .



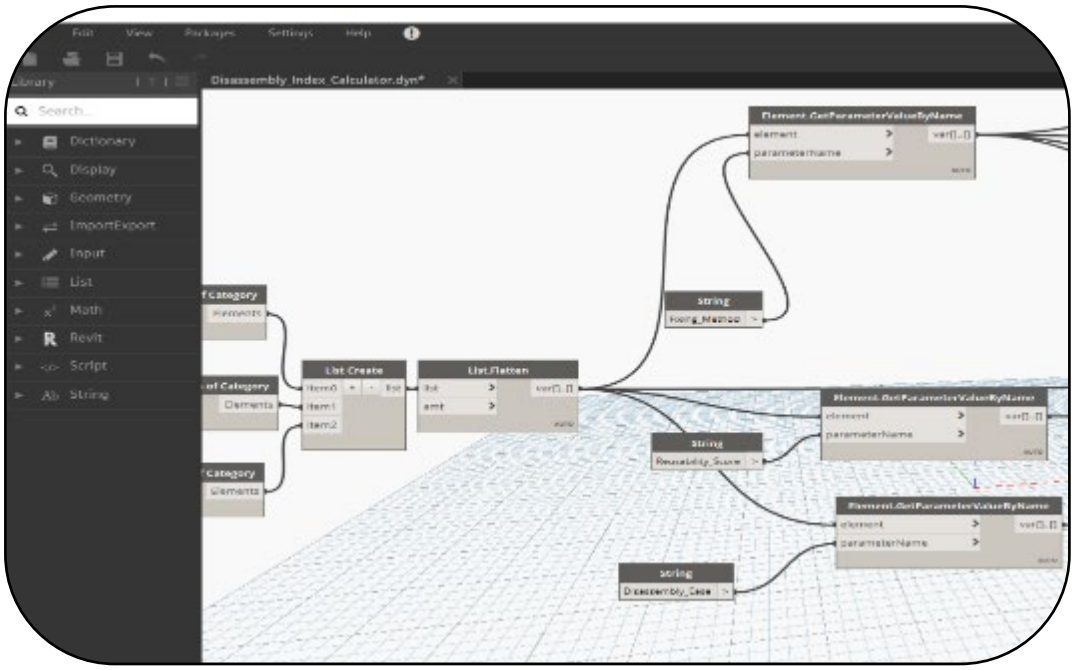
٢- استخلاص بيانات جوازات المواد :

تمت قراءة البيانات الموثقة مسبقًا في جوازات المواد الرقمية من القائمة الموحدة.

نضيف عقدة **Element.GetParameterValueByName** ثم نصل مخرج **List.Flatten** بمدخل **element** في هذه العقدة ، نضيف عقدة **String** ونكتب بداخلها اسم البارامتر الأول **Fixing Method** ثم نصلها بمدخل **parameterName**.

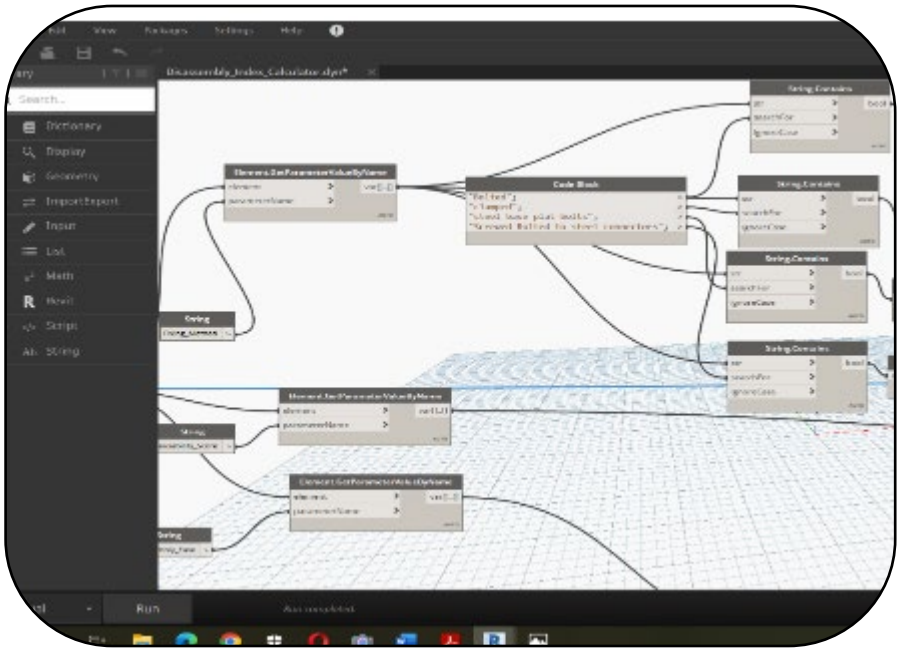
بنفس العملية السابقة نضيف عقد للبارامترين **Disassembly Ease** و **Reusability Score**.

يصبح لدينا ثلاث قوائم تخرج من هذه العقد. كل قائمة تحتوي على قيمة بارامتر معين لكل عنصر.



٣- معالجة وترجمة البيانات :

لتمكين العمليات الحسابية، تم تحويل البيانات النصية المستخلصة إلى قيم رقمية مكافئة. استُخدمت عقد **Code Block** لتطبيق "نظام الدرجات" المعتمد، حيث تم ترجمة القيم الوصفية مثل **Bolted** و **Easy** إلى درجاتها الرقمية (٥، ٣، ١). كما تم معالجة التحديات المتعلقة بأنواع البيانات المختلفة لضمان نقاء وموثوقية القوائم الرقمية الناتجة.

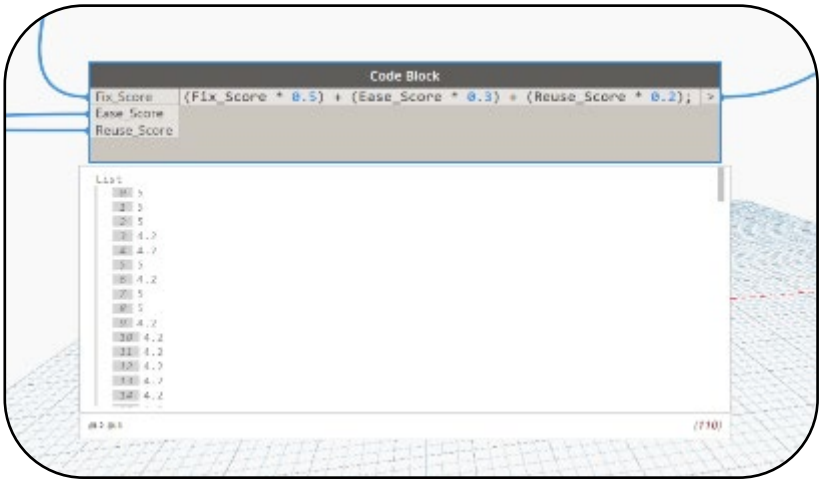


٤- تطبيق المعادلة الموزونة:

في هذه المرحلة الحاسمة، تم دمج القوائم الرقمية الثلاث التي تم تجهيزها

(Fixing_Score, Ease_Score, Reusability_Score) في **Code Block** واحد يقوم بتنفيذ المعادلة الموزونة النهائية.

ينتج عن هذه العملية قائمة رقمية عشرية تمثل قيمة "مؤشر قابلية التفكيك" المحسوبة لكل عنصر في النموذج.



الشكل10 قمية مؤشر قابلية التفكيك الناتجة من Dynamo

٥- تحديث نموذج معلومات البناء بالنتائج

لإكمال دورة البيانات، تم إعادة كتابة النتائج التحليلية إلى بيئة **Revit** استُخدمت عقدة **Element.SetParameterByName** لأخذ قائمة المؤشر النهائية وتخزين كل قيمة في البارامتر المخصص لها **(Disassembly_Index)**، مما يغني نموذج **BIM** ببيانات تقييمية جديدة ومهمة.

بالعودة إلى نموذج **Revit** نلاحظ وجود قيم في **Disassembly Index** لكل من العناصر في النموذج .

٣-٢-٤ عرض النتائج وتحليلها البصري

لتحويل البيانات الرقمية الناتجة عن "مؤشر قابلية التفكيك" إلى أداة تحليل بصرية فعالة، تم استخدام **Filters** في **Revit** لإنشاء خريطة لونية للنموذج. تهدف هذه الخريطة إلى تقديم تغذية راجعة فورية حول أداء كل عنصر من منظور التصميم الدائري.

من نموذج **3D** للمبنى في **Revit** ، قائمة **properties** نختار **visibility\Graphic** ومنها **filters**

تحديد عتبات التقييم اللوني

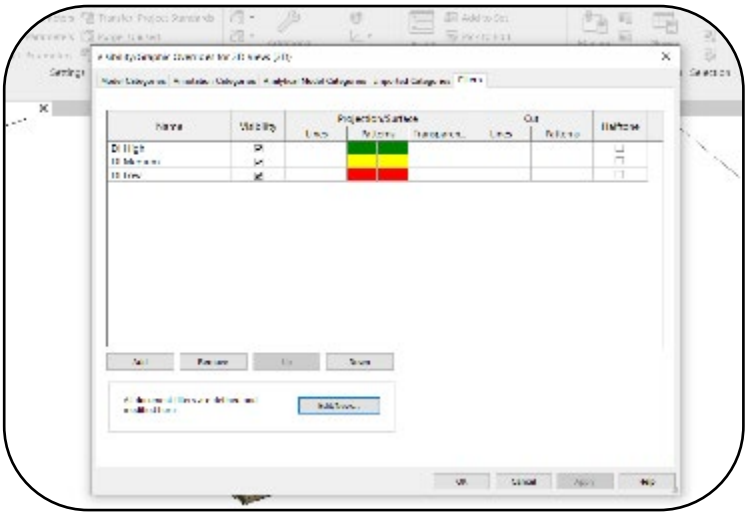
تم تعريف ثلاث فئات لتقييم نتائج المؤشر، حيث تم تخصيص لون مميز لكل فئة ليعكس مستوى الأداء. يوضح الجدول العتبات الرقمية والألوان المخصصة لها.

فئة التقييم	نطاق المؤشر	اللون المخصص
مرتفع	أكبر من **4.2**	أخضر
متوسط	أكبر من **3.6**	أصفر
منخفض	أصغر أو يساوي **3.6**	أحمر

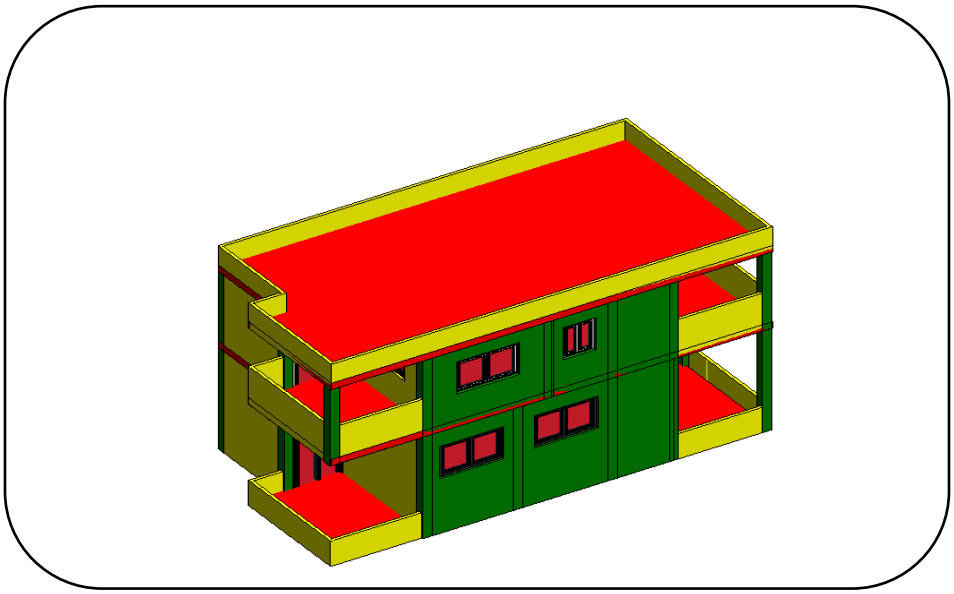
الجدول ٢٠: عتبات التقييم اللوني لنتائج مؤشر قابلية التفكيك

بناءً على العتبات المحددة، تم إنشاء ثلاث قواعد فلترة منطقية. كل قاعدة مصممة لتعريف **Revit** على كيفية التعرف على العناصر التي تنتمي إلى فئة تقييم معينة. تم تطبيق هذه القواعد على الفئات المستهدفة (الجدران، الأعمدة الإنشائية، والبلاطات) وربطها ببارامتر **Disassembly_Index** الذي قمنا بحسابه.

تمت إضافة الفلاتر الثلاثة إلى إعدادات الرؤية **(Visibility/Graphics)** للواجهة ثلاثية الأبعاد. بعد ذلك، تم تعيين التجاوزات الرسومية **(Graphic Overrides)** لكل فلتر، حيث تم ربط كل قاعدة باللون المخصص لها (أخضر، أصفر، أحمر) مع استخدام نمط تعبئة **Solid fill** لضمان الوضوح البصري.



نتج عن تطبيق الفلاتر خريطة ملونة للنموذج، تعمل كأداة تحليل بصرية مباشرة. تُظهر الخريطة بوضوح أداء كل عنصر، مما يسمح بتحديد نقاط القوة في التصميم (العناصر الخضراء) والمناطق التي قد تحتاج إلى تحسين أو إعادة نظر (العناصر الصفراء أو الحمراء)، وبالتالي دعم اتخاذ قرارات تصميمية مستنيرة في المراحل المبكرة.



الشكل 11 الخريطة اللونية للنموذج

٣-٣ تفعيل الوصول إلى المعلومات في الموقع عبر بطاقة هوية المشروع الرقمية

استكمالاً لدورة تكامل البيانات وسعياً لردم الفجوة بين البيئة الرقمية والموقع الفعلي للمشروع، تم تصميم وتطوير

"بطاقة هوية المشروع الرقمية" **Digital Project ID Card**

تهدف هذه البطاقة، التي يتم وضعها في مكان مركزي في الموقع، إلى أن تكون نقطة وصول فورية وموحدة لجميع المعلومات الحيوية للمشروع.

تحتوي البطاقة على المعلومات التعريفية الأساسية، إلا أن أبرز مكوناتها هو **رمز الاستجابة السريعة (QR Code)** عند مسح هذا الرمز باستخدام أي هاتف ذكي، يتم توجيه المستخدم مباشرة إلى **"بوابة معلومات المشروع الرقمية"**، وهي عبارة عن لوحة تحكم **(Dashboard)** تم إنشاؤها في **Google Drive**.

تتضمن هذه البوابة الرقمية روابط منظمة ومباشرة إلى أحدث الإصدارات المعتمدة من:

عارض النموذج ثلاثي الأبعاد **(D Model Viewer٣)**

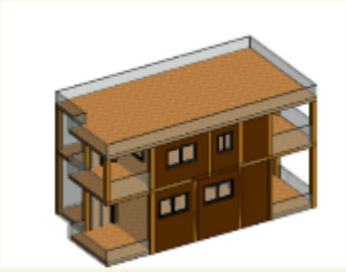
المخططات التنفيذية **(Shop Drawings)**

جوازات المواد الرقمية **(Digital Material Passports)**

وثائق السلامة وتقارير الموقع.

يعزز هذا النهج من كفاءة التواصل وتبادل المعلومات في الموقع، حيث يمكّن المهندسين والعمال والفنيين من الوصول الفوري إلى البيانات الدقيقة التي يحتاجونها، مما يقلل من احتمالية الأخطاء الناتجة عن استخدام وثائق قديمة، ويدعم تنفيذ عمليات التركيب والتفكيك وفقًا لمنهجية التصميم المعتمدة.

Digital Project ID Card



Project Vitals

Project Name :Disassemblable building
Project Number:SVU-BIMM-2025-01
Location: Lattakia
Client/Owner:SVU
Lead Designer/Architect: Eng. Hala Ahmad
Main Contractor:Sustainable Company

Key Contacts

BIM Manager : Dr. Sonia Ahmad
Project Manager: Eng. Hala Ahmad
Site Engineer:----
Safety Officer:----
Emergency Contact:---

Master Schedule Milestones

Planned Start Date:01 / 7 / 2025
Planned Completion Date:30 / 05 / 2026
Current Phase:Structural Works & Envelope Installation

QR Code - The Digital Gateway

الشكل12 البطاقة الرقمية للمشروع

٤- الفصل الرابع: النتائج والتوصيات

٤-١ عرض النتائج ومناقشتها

٤-١-١ المقدمة

يستعرض هذا الفصل النتائج النهائية التي تم التوصل إليها من خلال تطبيق المنهجية العملية المقترحة في البحث. تمحورت المنهجية حول تطوير نموذج معلومات بناء **(BIM)** غني بالبيانات لجوازات المواد الرقمية، ومن ثم تطوير وتطبيق أداة تحليل كمي مؤتمتة لتقييم قابلية التفكيك. سيتم في هذا الفصل عرض المخرجات الرئيسية لهذه العملية، تليها مناقشة معمقة لدلالات هذه النتائج وأهميتها في سياق الإجابة على أسئلة البحث وإثبات فرضيته.

٤-١-٢ عرض النتائج

أسفرت المرحلة التطبيقية عن مجموعة من النتائج والمخرجات الملموسة التي تشكل جوهر المساهمة العملية لهذا البحث. يتم عرضها على النحو التالي:

نتائج "مؤشر قابلية التفكيك"

بعد تطبيق السكربت التحليلي الذي تم تطويره في **Dynamo** على نموذج الحالة الدراسية، تم بنجاح حساب قيمة "مؤشر قابلية التفكيك" **(Disassembly Index)** لكل عنصر من العناصر المستهدفة. أظهرت النتائج تبايناً منطقياً في قيم المؤشر بين العناصر المختلفة، حيث تراوحت القيم بين ٥.٠ للعناصر المثالية (مثل الأعمدة المتصلة ميكانيكياً)، وقيم أقل مثل ٤.٢ للعناصر التي واجهت تحديات طفيفة في أحد المعايير (مثل الجدران الزجاجية). تم بعد ذلك إعادة كتابة هذه النتائج بنجاح إلى البارامتر المخصص لها في نموذج **Revit** ، مما أغنى النموذج ببيانات تقييمية جديدة.

خريطة الأداء اللوني (Performance Color Map)

لتحويل البيانات الرقمية الناتجة إلى أداة تحليل بصرية فعالة، تم إنشاء خريطة أداء لوني للنموذج باستخدام فلاتر الواجهة في **Revit**. تُظهر هذه الخريطة توزيع أداء قابلية التفكيك على كامل النموذج، حيث تم تلوين العناصر التي حققت مؤشراً مرتفعاً (أكبر من ٤.٠) باللون الأخضر، والعناصر ذات المؤشر المتوسط (بين ٢.٥ و ٤.٠) باللون الأصفر، والعناصر ذات المؤشر المنخفض (أقل من ٢.٥) باللون الأحمر

تصميم أدوات تفعيل الوصول للمعلومات في الموقع

استكمالاً لدورة تكامل البيانات، تم تصميم نموذجين لأدوات تهدف إلى ردم الفجوة بين البيئة الرقمية والموقع الفعلي:

بطاقات جواز المواد المادية : (Material Passport Cards) تم تصميم بطاقات تعريفية قابلة للطباعة واللصق على المواد في الموقع، تحتوي على بيانات أساسية ورمز **QR** للوصول إلى جواز المادة الرقمي الكامل

بطاقة هوية المشروع الرقمية : (Digital Project ID Card) تم تصميم بطاقة مركزية للموقع تحتوي على رمز **QR** يقود إلى لوحة تحكم رقمية **(Dashboard)** تم إنشاؤها على منصة **Google Sites**، وتوفر وصولاً مباشراً لجميع وثائق المشروع ونموذجه ثلاثي الأبعاد.

٤-١-٣ مناقشة النتائج:

تُقدم نتائج الدراسة تصور تحليلي عميق وتجيب بشكل مباشر على أسئلة البحث.

أولاً: أثبتت النتائج فعالية المنهجية المقترحة في تطوير وتطبيق "مؤشر قابلية التفكيك" كأداة كمية لدعم قرارات التصميم. لقد نجح المؤشر في التمييز بين أداء العناصر المختلفة بناءً على

معايير محددة، محولاً بذلك الخصائص الوصفية مثل : **Easy** أو **Bolted** إلى مقياس رقمي موضوعي يمكن مقارنته وتحليله.

ثانياً : تُبرهن خريطة الأداء اللوني على أن النموذج التحليلي لا يعمل كأداة تقييم فحسب، بل كأداة دعم قرار استباقية. فالتمثيل البصري الفوري لنقاط القوة والضعف (الأخضر والأصفر والأحمر) يُمكّن المصمم من تقييم أثر قراراته بشكل مباشر وفي المراحل المبكرة. مثلاً عند رؤية عنصر باللون الأصفر، يمكن للمصمم أن يعيد النظر في تفاصيل وصلاته أو نوع المادة المستخدمة بهدف تحسين أدائه، مما يدعم دورة تصميم تكرارية وفعالة.

ثالثًا: تؤكد هذه النتائج صحة فرضية البحث بشكل قاطع. فقد أثبت التطبيق العملي أن دمج مبادئ **DfD** مع **BIM** ، وتوثيق الخصائص عبر جوازات المواد، وتطوير أداة تقييم مؤتمتة، قد أسهم بالفعل في تطوير نموذج تطبيقي يعزز قابلية المبنى للتفكيك ويدعم اتخاذ قرارات تصميمية مستدامة ومبنية على البيانات. فخريطة الأداء اللوني هي الدليل العملي على أن النموذج المقترح لا يوثق البيانات فحسب، بل يحللها ويقدمها بطريقة تدعم القرار.

٤-٢ التوصيات والأعمال المستقبلية

بناءً على النتائج التي تم التوصل إليها في هذا البحث، والتحديات التي تم تحديدها في الإطار النظري والتطبيقي، يمكن تقديم مجموعة من التوصيات الموجهة للأطراف المعنية في قطاع البناء، بالإضافة إلى تحديد آفاق بحثية مستقبلية يمكن الانطلاق منها.

٤-٢-١ توصيات على الصعيد المهني والأكاديمي

تبني منهجيات التقييم الكمي المؤتمت: يوصي البحث المهندسين المعماريين والمصممين بتبني منهجيات مماثلة لتقييم قابلية التفكيك بشكل كمي في المراحل المبكرة من التصميم. إن استخدام أدوات مثل "مؤشر قابلية التفكيك" و"خرائط الأداء اللوني" يوفر لغة مشتركة وموضوعية لمناقشة وتحسين استدامة التصاميم مع العملاء وأصحاب المصلحة

تطوير معايير وأدلة إرشادية محلية: نظرًا للفجوة المعرفية في السياق العربي، هناك حاجة ملحة للمؤسسات الأكاديمية والهيئات الهندسية للعمل على تطوير أدلة إرشادية ومعايير محلية لتطبيق مبادئ التصميم لأجل التفكيك **(DfD)**، وتحديد أوزان ومعايير تقييم تتناسب مع المواد وتقنيات البناء الشائعة في المنطقة

دمج التطبيقات العملية في المناهج التعليمية: يوصي البحث بضرورة دمج تطبيقات عملية تستخدم أدوات المتقدمة من **BIM** مثل **Dynamo** في المناهج التعليمية لطلاب الهندسة والعمارة. هذا سيمكن الجيل القادم من المهندسين من تجاوز الفهم النظري لمفاهيم الاستدامة والانتقال إلى التطبيق العملي الفعال.

تفعيل الوصول للمعلومات في الموقع: يوصي البحث المقاولين ومديري المشاريع بتبني أدوات بسيطة وفعالة، مثل "بطاقة هوية المشروع الرقمية"، لربط وثائق ونماذج **BIM** بالواقع الفعلي للموقع، مما يعزز من دقة التنفيذ ويقلل الأخطاء ويدعم تطبيق ممارسات التفكيك وإعادة الاستخدام بشكل صحيح.

إنشاء بوابات معلومات رقمية للمشاريع (Digital Information Portals) : يوصي البحث بتبني ممارسة إنشاء بوابة معلومات رقمية مركزية لكل مشروع، يتم الوصول إليها عبر رمز استجابة سريعة **(QR Code)** موحد. يُقترح استخدام منصات سحابية سهلة الاستخدام ومتاحة مثل **Google Drive** و **Google Sites** لاستضافة هذه البوابة، التي يجب أن تحتوي على روابط منظمة لأحدث إصدارات وثائق المشروع، بما في ذلك النموذج ثلاثي الأبعاد وجوازات المواد الرقمية. إن تطبيق هذه الممارسة لا يسهل فقط الوصول الفوري للمعلومات في الموقع، بل يؤسس أيضًا لأرشيف رقمي دائم **"As-Built"** للمبنى، وهو مفيد لعمليات الصيانة المستقبلية والتفكيك وإعادة الاستخدام في نهاية عمر المبنى.

٤-٢-٢ مقترحات لأعمال بحثية مستقبلية

يفتح هذا البحث الباب أمام العديد من المسارات البحثية المستقبلية التي يمكن أن تبني على نتائجه، ومن أبرزها :

تطبيق المنهجية على مشاريع واقعية: إجراء دراسات حالة تطبيقية للمنهجية المقترحة على مبانٍ قائمة أو مشاريع قيد الإنشاء، بهدف تقييم التحديات العملية المتعلقة بجمع البيانات من الواقع ودمجها في نماذج **"As -Built" BIM**، واختبار فعالية المؤشر في سياق حقيقي.

توسيع النموذج الحسابي ليشمل أبعادًا أخرى: تطوير السكربت التحليلي ليدمج أبعاد تقييم إضافية، مثل تحليل تكلفة دورة الحياة **(LCC)** وتحليل الأثر البيئي **. (LCA)** يمكن ربط هذه الأبعاد بمؤشر قابلية

التفكيك لتقديم تقييم استدامة أكثر شمولية **(Multi-Criteria Assessment)**، يجيب على سؤال: ما هو الخيار الأفضل الذي يحقق أعلى قابلية للتفكيك بأقل تكلفة وأثر بيئي؟

استكشاف تطبيقات الذكاء الاصطناعي: البحث في إمكانية استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي **AI** لتحليل نتائج "خريطة الأداء اللوني" بشكل تلقائي، ومن ثم اقتراح تعديلات تصميمية مُحسَّنة للمصمم. يمكن للنظام، على سبيل المثال، أن يقترح تغيير نوع وصلة معينة أو مادة عنصر حصل على تقييم منخفض**. تطوير قاعدة بيانات وطنية للمواد:** إجراء بحث يهدف إلى وضع أسس لإنشاء قاعدة بيانات وطنية للمواد الإنشائية في سوريا، تحتوي على معلومات جوازات المواد الرقمية، وتكون مرتبطة بنماذج **BIM** ، مما يسهل على جميع المشاريع المستقبلية الوصول إلى بيانات موثوقة وموحدة**.**

٤-٢-٣ الخاتمة

في ختام هذا البحث، تم بنجاح تطوير وتطبيق إطار عمل متكامل لتصميم وتقييم المباني القابلة للتفكيك، مُثبتاً أن الانتقال من التوثيق الوصفي إلى التحليل الكمي المؤتمت هو خطوة ضرورية لتحويل نماذج **BIM** إلى أدوات تحليل ديناميكية تدعم اتخاذ القرار**.** من خلال تطوير "مؤشر قابلية التفكيك" باستخدام **Dynamo** ، وتتويج العملية بإنشاء "خريطة أداء لوني"، نجح البحث في تقديم منهجية واضحة وقابلة للتكرار لتحويل البيانات إلى معرفة بصرية قابلة للتنفيذ. لا يقدم هذا العمل مجرد حالة دراسية، بل يقدم سير عمل فعال يربط بين النظرية والتطبيق، ويؤكد على أن الأدوات الرقمية المتقدمة، عند توجيهها بفكر استراتيجي، هي المحفز الأقوى لإرساء ثقافة التصميم الدائري المستدام**.**

يقدّم البحث إطارًا عمليًا يمكن اعتماده في المباني القابلة للفك، بما في ذلك الأبنية المساعدة والوحدات المعيارية، مما يساهم في تعزيز ممارسات الاستدامة والاقتصاد الدائري عبر إطالة عمر المواد وتقليل النفايات. ويوصي البحث بتوسيع تطبيق هذا الإطار مستقبلًا ليشمل أنواعًا أخرى من المباني بعد تكييف قواعد البيانات وفق طبيعة أنظمتها الإنشائية.

المراجع

Akinade. (2017). Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. *Waste management*, *60*, 3–13.

Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Omoteso, K., Ajayi, S. O., Bilal, M., Owolabi, H. A., Alaka, H. A., Ayris, L., & Looney, J. H. (2017). BIM-based deconstruction tool: Towards essential functionalities. *International Journal of Sustainable Built Environment*, *6*(1), 260–271.

Arayici, Y., & Aouad, G. (2010). Building information modelling (BIM) for construction lifecycle management. *Construction and Building: Design, Materials, and Techniques*, *2010*, 99–118.

Croccolo, D., De Agostinis, M., Fini, S., Mele, M., Olmi, G., Scapecchi, C., & Tariq, M. H. B. (2023). Failure of threaded connections: a literature review. *Machines*, *11*(2), 212.

Das, M., Cheng, J. C., & Kumar, S. S. (2015). Social BIMCloud: a distributed cloud-based BIM platform for object-based lifecycle information exchange. *Visualization in Engineering*, *3*(1), 8.

Druijff, B. (2019). *BIM-based material passport in Madaster during the operational and maintenance phase of a building* [University of Twente].

Geda, M., Kwong, C., & Jiang, H. (2019). Fastening method selection with simultaneous consideration of product assembly and disassembly from a remanufacturing perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *101*(5), 1481–1493.

Hernández, H. (2025). Circular Industrialized Construction: A Perspective Through Design for Manufacturing, Assembly, and Disassembly. *Buildings*, *15*(١٣), ٢١٧٤.

Hernandez, J. (2024). Development of a Roadmap for Materials Passport Creation.

Hodge, G. M. (2000). An information life-cycle approach: Best practices for digital archiving. *Journal of Electronic Publishing*, *5*(٤).

Iacovidou, E., Purnell, P., & Lim, M. K. (2018). The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution? *Journal of environmental management*, *216*, 214–223.

Inyim, P., Rivera, J., & Zhu, Y. (2015). Integration of building information modeling and economic and environmental impact analysis to support sustainable building design. *Journal of Management in Engineering*, *31*(1), A4014002.

Inzerillo, L., Acuto, F., Pisciotta, A., Mantalovas, K., & Di Mino, G. (2024). Exploring 4d and 5d Analysis in BIM Environment for Infrastructures: A Case Study. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *48*, 233–240.

traceability systems: A Islam, S., Cullen, J. M., & Manning, L. (2021). Visualising food novel system architecture for mapping material and information flow. *Trends in Food Science & Technology*, *112*, 708–719.

Jayasinghe, R. S., Rameezdeen, R., & Chileshe, N. (2019). Exploring sustainable post-end-of-life of building operations: a systematic literature review. *Engineering, construction and architectural management*, *26*(4), 689–722.

Keoleian, G. A., & Menerey, D. (1994). Sustainable development by design: review of life cycle design and related approaches. *Air & Waste* ,٤٤(٥), ٦٤٥–٦٦٨.

Kimura, F., Kato, S., Hata, T., & Masuda, T. (2001). Product modularization for parts reuse in inverse manufacturing. *CIRP Annals*, *50*(1), 89–92.

Koppelaar, R. H., Pamidi, S., Hajósi, E., Herreras, L., Leroy, P., Jung, H.-Y., Concheso, A., Daniel, R., Francisco, F. B., & Parrado, C. (2023). A digital product passport for critical raw materials reuse and recycling. *Sustainability*, *15*(2), 1405.

Kossakowski, P. G. (2023). Visual programming as modern and effective structural design technology—Analysis of opportunities, challenges, and future developments based on the use of dynamo. *Applied Sciences*, *13*(16), 9298.

Liu, Z., Li, P., Wang, F., Osmani, M., & Demian, P. (2022). Building information modeling research: A 14-year bibliometric analysis. (BIM) driven carbon emission reduction *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(19), 12820.

Markou, I., Sinnott, D., & Thomas, K. Case Studies in Construction Materials.

Markou, I., Sinnott, D., & Thomas, K. (2025). Current methodologies of creating material passports: A systematic literature review. *Case Studies in Construction Materials*, e04267.

Marzouk, M., Azab, S., & Metawie, M. (2018). BIM-based approach for optimizing life cycle costs of sustainable buildings. *Journal of cleaner production*, *188*, 217–226.

Mattaraia, L., Fabricio, M. M., & Codinhoto, R. (2023). Structure for the classification of disassembly applied to BIM models. *Architectural Engineering and Design Management*, *19*(1), 56–73.

Tolmer, C.-E., Castaing, C., Diab, Y., & Morand, D. (2017). Adapting LOD definition to meet BIM uses requirements and data modeling for linear infrastructures projects: using system and requirement engineering. *Visualization in Engineering*, *5*(1), 21.

Yang, A., Han, M., Zeng, Q., & Sun, Y. (2021). Adopting building information modeling (BIM) for the development of smart buildings: a review of enabling applications and challenges. *Advances in Civil Engineering*, *2021*(1), 8811476.

Yarmohammadi, S., & Castro-Lacouture, D. (٢٠١٨). Automated performance measurement for 3D building modeling decisions. *Automation in Construction*, *93*, 91–111.

Ziemian, R. D. (2010). *Guide to stability design criteria for metal structures*. John Wiley & Sons.