مساكن الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد
مقارنة مع نظام الإنشاء مسبق الصنع ونظام الإنشاء التقليدي

طالب م. أحمد فَــوَّاد مروة
معماري وماجستير
E-mail: ahmadmrw@outlook.com

الملخص

تعد ثورة المعلومات من أهم ما يميز القرن العشرين ولاسيما ما يخدم مجال العمارة والتشييد كالطابعات ثلاثية الأبعاد وتَوَسُّعُ اِستخدامِها في شَتّى مَجَالاتِ الحياةِ، والَّتي شَمَلتْ في الآونةِ الأخيرةِ مَجالَ التَّقْيُيدِ للمباني عُمومًا، والمَساكِنِ على وجْهِ الخُصوصِ.

بالاطلاع على الأدبيات تبين أن المحتوى المحلي يعاني من ندرة الدِّراساتِ المَحليَّةِ الّتي تَناولَتْ هَذهِ التَّقنيات مِنْ مَنْظورِ إمكانياتها أو إمْكانيةِ تَطبيقها أو مَدى مُلاءمَتِها للتَّطبيقِ في سُوقِ الإنشاءاتِ في المملكةِ العربيةِ السُّعوديةِ، فشكلت هدف دراسة هذه المعايير بالمقارنة بين نظام البناء باستخدام الطابعة ثلاثية الأبعاد ومباني المسبقة الصنع والبناء التقليدي.

ولتحقيقِ أَهْدافِ الدّراســةِ سنعتمد على المنهجِ الوصفي التحليلي مِنْ خلالِ الدراسات السابقة وجَمعُ الآراء، وتَحليلُ الْبَياناتِ، والمَعلوماتِ ذَاتُ الصِّلةِ بإمكانياتِ وحدودِ نُظُمِ الإنشاءِ التَّقليديّةِ ومُسبقةِ الصنعِ، وتَقنيات الطابعات ثُلاثية الأبعاد لتحقيقِ الهدف الأول من أهداف الدراسة، والثاني تطبيقيٌ يَعتمدُ على المنهجِ الوصفي المسحي، من خلال إجراء مَسْحٍ ميداني لعددٍ منْ مشاريع الإسكانِ، وجمع المعلومات ذات الصلة بتحديد مدى مُلاءمة هذه النُّظُم لتشييد المساكن في المملكة العربية السعودية.

وتتضحُ أهمية الدراسة في أنّها تُمَثِلُ بَاكُورة الجهود التي تُبْذَلُ لسد الفجوة الدراسية الحادثة في هذا المجال بالمملكة العربية السعودية، إلى جانب دورها في استكشاف مُلاءمة تقنيات الطباعة ثلاثية في هذا الأبعاد؛ لتشييد المساكن بالمملكة مُقارنةً بنظم التشييد التقليدية ومُسبقة الصنع، إضافةً إلى ما يمكن أن تُساهِم به في تطوير صناعة الإسكان باستخدام التقنيات الحديثة وهو ما يتوافق مع رؤية المملكة ٢٠٣٠.

الكلمات الدليلية (المفتاحية): تقنيات البناء الحديثة، رؤية وزارة الإسكان، تنفيذ الفلل السكنية، الاستدامة، تحقيق الشكل، خفض تكلفة البناء، سرعة التنفيذ.

١. المقدمة

١، ١ موضوع الدراسة

يعد التطور المعلوماتي المتسارع السمة الأساسية لعصر المعلومات فبعد الثورة الصناعية التي اهتمت بإنتاج المواد جاء عصر الثورة المعلوماتية والذي ركز على إنتاج الأفكار وشهدت العشرين سنة الأخيرة تطورا هائلا في قطاع المعلومات والاتصالات لم نعهده من قبل وسوف نشهد في العقود التالية فيما لو استمرت وتيرة التطور الصناعي و العلمي في كوكبنا على هذا المنوال تغيرات جذرية في طريقة عيشنا في كثير من المجالات مما يؤثر بطريقة او أخرى على طبيعة الحياة وقد غير هذا التطور من ملامح العالم الجديد فحلت وظائف بدلا من أخرى وظهرت تقنيات غيرت نشاطات المجتمع وأثرت على المفاهيم فبعد أن كان ينظر إلى العمارة على أنها تخصص غير تقني أصبحت الآن تخصصا ينزع إلى استخدام التكنولوجيا بشكل مباشر وأساسي . وقد نتج عن اندماج العمارة مع التكنولوجيا توجهات معمارية لم تكن لتعرف لو لم يقتحم الحاسوب العمارة بقوة. ومن هذه التوجهات ما يعرف حاليا بالعمارة الذكية وتكنولوجيا العمارة والواقع المعزز والواقع الافتراضي والطابعات ثلاثية الأبعاد.

فهذا التطور المعلوماتي أحدث تغييرا في مفهوم الهندسة المعمارية من جميع النواحي كطرق الأداء والتنفيذ وباعتبار تعددها وتنوعها كان لابد من ضرورة دراستها وتوضيح امكانياتها والفرق الكبير الذي ستحدثه هذه التقنية في حال الاعتماد عليها.

١، ٢ مشكلة البحث وأهميته

إلى هذه اللحظة نعاني من ندرة الأبحاث المحلية عن الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد وعدم وجود تصور شامل حول تقنية الطابعة ثلاثية الأبعاد وميزاتها وقد زاد أهمية الموضوع لاسيما بعد العقود ومذكرات التفاهم التي وقعتها وزارة الإسكان في المملكة العربية السعودية مع شركة وينسن الصينية بتنفيذ مباني باستخدام هذه التقنية فتوجه الباحث في هذه الدراسة إلى دراسة إمكانياتها تقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد في الإنشاء

١، ٣ فرضية البحث

إمكانية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد تلبيتها لاهتمامات المواطنين في متطلبات مسكنهم بأسرع الطرق وأبسط الأساليب وأقل التكاليف وبالأشكال المناسبة باستخدام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد.

١، ٤ أهداف البحث

توضيح إمكانية وقدرة الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد وميزاتها ومدى ملاءمتها لتشييد المساكن في المملكة العربية السعودية.

١، ٥ خطة ومنهجية الدراسة

إن عملية جمع المعلومات والأسلوب المتبع في هذه الدراسة يعتمد بشكل أساسي على مرحلتين:

المرحلة الأولى: أدبيات البحث.

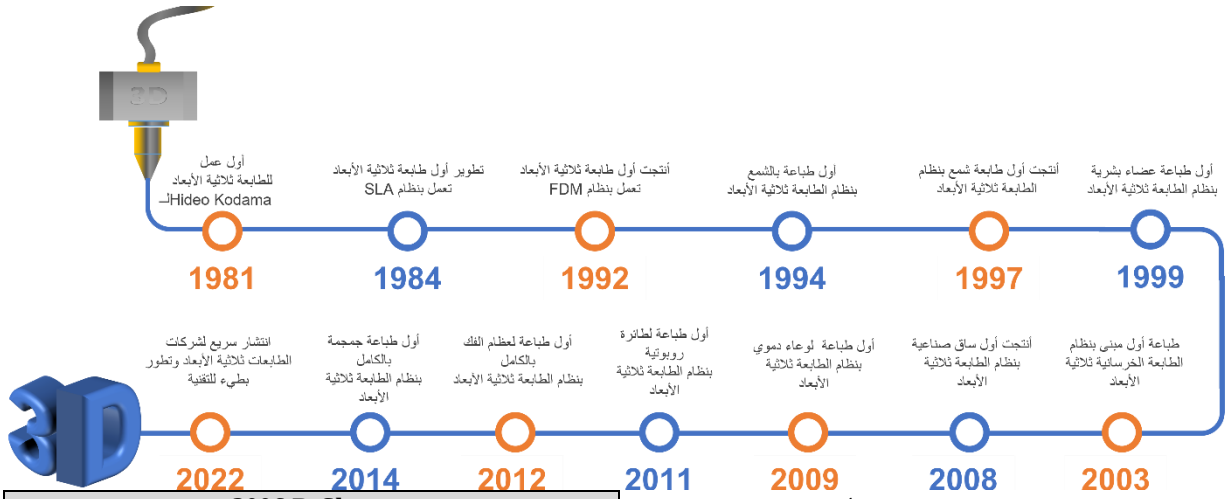
البحث وجمع المعلومات المتعلقة بالدراسة من النشرات والكتب والمقالات ومواقع الانترنت والدراسات الخاصة والمقابلات الشخصية والاستبانات في هذا المجال لمعرفة المعلومات المتعلقة بنظام الإنشاء بالطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد والخروج بالتوصيات والنتائج.ضسش

المرحلة الثانية: البحث الميداني.

١- استقصاء آراء الخبراء والمهتمين ذو الصلة بنظام الإنشاء التقليدي والمسبق الصنع والطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد باستخدام أداة الاستبانة

٢. تعريف الطابعات ثلاثية الأبعاد وتطورها وأهم محطات تطور تقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد

تعرف بأنها مصطلح يستخدم لوصف مجموعة من تقنيات التصنيع الرقمية التي تنتج أجزاء المكونات كطبقات؛ كل طبقة تلو الأخرى. ويشار إليها غالباً باسم التصنيع بالإضافة أي بناء المجسمات عن طريق إنشاء طبقات من المواد متتالية بعضها فوق بعض (Raji, 2017).

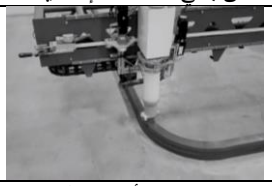
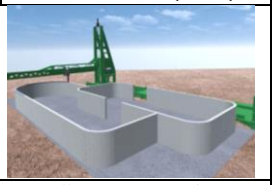


شكل (١): التطور التاريخي للطابعات ثلاثية الأبعاد. (Wijk & Wijk, 2015)

وهكذا فقد بدأ الأمر بطباعة العديد من المنتجات بأشكال وأحجام مختلفة، ثم بدأت هذه التقنية بالدخول في مختلف المجالات؛ مثل الهندسة الطبية الحيوية، التي قامت بتصنيع الأطراف وبعض أجزاء الجسم الأخرى من المعادن أو المواد الأخرى ذات الصلة لاستبدال الأطراف المفقودة أو المصابة، ودخلت كذلك في شركات الفضاء والسيارات، كشركة Royce Rolls - Bentley، حيث ساعدت في تطوير تصميماتها بمعدل أسرع من أي وقت مضى؛ نتيجة التخفيض الكبير في دورة التصميم عما كانت عليه سابقاً، إذ كانت تستغرق عدة أشهر، واستخدمت أيضًا في مجال العمارة والبناء بالطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد، وطباعة المباني والأبراج، وطباعة المجسمات المعمارية (Raji, 2017).

حتى بدأت تظهر الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد في طريقها نحو مجال البناء والعمارة، وقد مرت إلى تاريخ اليوم منذ نشأتها في أربع محطات تطور.

2003 Contour Crafting	
السرعة	٠,١٣ م٢/ث
تكاليف البناء	أقل بـ ٦٦٪ عن التقليدي.
عدد العاملين في الموقع	أقل من باقي الأنظمة الإنشائية
إصابات العمل في الموقع	أقل من باقي الأنظمة الإنشائية بنسبة كبيرة.
كمية النفايات الناتجة	أقل من باقي الأنظمة الإنشائية

شكل (٢): نموذج للطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد - المصدر: (Contour Crafting Corporation in the Media، بلا تاريخ)

2006 D-Shape
تعطي المعماري حرية كبيرة في التصاميم وتحقيق للتطلعات في تصاميم معقدة.

شكل (٣): نموذج للطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد - المصدر: Bos, (Teymouri .2017)

2008 Concrete Printing	
الوزن	تخفيض وزن الجدار مع الحفاظ على متانته
مرونة	استخدام الفراغات للتمديدات المختلفة في المشروع
مرونة	أعمال التكسير أثناء تنفيذ المشروع
السرعة	سرعة الإنجاز
النفايات الناتجة	تعتبر من التقنيات البيئية

شكل (٤): نموذج للطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد - المصدر: (Lim, et al., 2011)

2015 Winsun	
السرعة	٠,١٩ م٢/ث
تكاليف البناء	أقل بـ ٦١٪ عن التقليدي.
عدد العاملين في الموقع	أقل من باقي الأنظمة الإنشائية
الأمن والسلامة	مستوى عال من الجودة وسلامة المبنى.

شكل (٥): نموذج للطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد - المصدر: (٣D Printing Construction، بلا تاريخ)

٣. إمكانيات الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد

تعد الطباعة ثلاثية الأبعاد واحدة من أكثر التطورات الواعدة في عالمنا اليوم، ومن غير المستغرب أن تعتمد صناعة البناء على هذه التقنية وتسعى إلى تطبيقها على نطاق أوسع (Wolfs, 2015)؛ فالباحثون مقتنعون بأن تقنية الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد أصبحت تقنية رئيسة في أساليب التطوير المستقبلي للبناء، فاعتمادها في أعمال الإنشاء يحسن من استراتيجيات البناء التقليدية نظرًا إلى المزايا الكبيرة التي تتمتع بها (Tay, et al., 2017)، فهذه التكنولوجيا يمكن أن توفر مباني منخفضة التكلفة وبسرعة عالية وبأشكال هندسية معقدة ببساطة مقارنة مع باقي الأنظمة الإنشائية، كما أنها صديقة للبيئة؛ فهي تستخدم الحد الأدنى من المواد دون هدر، وهو ما كان يترتب عليه انبعاثات مضرة بالبيئة (Hager, Golonka & Putanowicz, 2016)، لكن على الرغم من الميزات التي ذكرت فإن هذه التقنية ما تزال في مهدها، وتحتاج إلى المزيد من البحوث والدراسات (Selçuk & Beyhan, 2017)

إذ تعد طريقة عمل الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد عملية تصنيع متقدمة يمكنها إنتاج أشكال هندسية معقدة تلقائيًّا من نموذج تصميم ثلاثي الأبعاد بمساعدة الحاسب دون أي أدوات وقوالب وتركيبات، في إنشاء أشكال ومبانٍ بوقت قصير مع أقل تدخل بشري (Tay, et al., 2017).

وقد أثبت العديد من الدراسات والأبحاث التي تناولت تقنية الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد سرعة إنجازها في تنفيذ المشاريع، سواء السكنية وغيرها، ويمكن كذلك أن تعمل باستمرار دون توقف (Hager, Golonka & Putanowicz, 2016) (Selçuk & Beyhan, 2017) (Wolfs, 2015) (Panda, et al., 2017).

إلا أن بعض الدراسات تجد أن هذه التقنية ما تزال مكلفة؛ بسبب قلة استخدامها وضعف الاعتماد عليها في المشاريع، فهي وإن كانت تحقق بعض التوفير في تكاليف العمالة والمواد، فإنها عمومًا لم تكن منافسة للطرق التقليدية للبناء.

ومع هذا ستزداد- بحسب رؤية الباحث Nadarajah (٢٠١٨) المنافسة بين المقاولين؛ بسبب الطلب على المساكن الأقل تكلفة، ويصبح السوق مستقرًا، وتنمو تدريجياً الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد (Nadarajah, 2018)، وهذا هو رأي بعض الباحثين؛ فقد استعرض الباحث العديد من الفوائد المهمة لهذه التقنية في حال أثبتت كفاءتها في المستقبل القريب؛ وإن كانت الآن ما تزال محدودة الإمكانيات وسعرها مرتفعًا جدًّا (Selçuk & Beyhan, 2017)، وهذه التكلفة العالية تستوجب إجراء دراسات مفصلة للاستثمار العائد من الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد (El Sakka & Hamzeh, 2017).

كذلك تساهم هذه التقنية الحديثة في تخفيض تكاليف البناء قياسًا بتقنيات البناء الأخرى، وذلك من خلال تخفيض تكلفة نقل المواد وتخزينها في المواقع (Hager, Golonka & Putanowicz, 2016) وتقليل عدد العمالة في المشروع (Kiroglu & Selçuk & Beyhan, 2017) Sakin, 2017) (Panda, et al., 2017) (Lyu, Zhao, Hou, Sun, & Zhang, 2021)، مقارنة بعدد العاملين في مشاريع البناء بالطريقة التقليدية، وهي بذلك تحقق السلامة وتقلل المخاطر على الصحة والموقع بسبب طريقة عملها، التي تقلل الإصابات والوفيات في المواقع (Hager, Golonka & Putanowicz, 2016) (Selçuk & Beyhan, 2017).

بناء على ما تقدم فإن السرعة في التنفيذ وتخفيض التكلفة يعدان عامل جذب لاستخدام هذه التقنية في أوقات الكوارث والحروب، لبناء الملاجئ ومراكز الإيواء؛ لما تستلزم هذه الحالات من سرعة الإنجاز التي يصعب بل يستحيل تحقيقها باستخدام أنظمة إنشائية أخرى (Nadarajah, 2018).

وهي مع ذلك من التقنيات الصديقة للبيئة وتقدم نهجاً ثورياً في الاستدامة بتقليل نفايات البناء،

لكونها لا تستخدم سوى الكمية المطلوبة من المواد اللازمة للبناء (Hager, Golonka & Putanowicz, 2016) (Nadarajah, 2018)، لكن الباحث في دراسته البيئية يلفت الانتباه إلى العديد من النقاط البيئية التي ما تزال غير واضحة؛ كالتأثير السام للمواد المستخدمة في البناء؛ نظراً لأن التقنية ما تزال في بدايتها (Selçuk & Beyhan, 2017) .

هذا وقد ساعدت تقنية الطابعة ثلاثية الأبعاد في إطلاق العنان للمعماريين في تصميماتهم؛ لكونها تسهل تحقيق الأشكال المعقدة بسهولة وسرعة ودون أي قوالب (Tay, et al., 2017) (2015 ,Wolfs).

ومما يجدر ذكره أن تقنية نمذجة معلومات المباني BIM تعد من العناصر الرئيسة في نجاح الطباعة ثلاثية الأبعاد في البناء، فهي تقنية تتطور بسرعة كبيرة جداً وتحقق نجاحًا كبيرًا (Teizer, et al., 2018)، حيث إن دمج أسلوب BIM في نمذجة الطباعة ثلاثية الأبعاد يحقق تكاملاً بين هاتين التقنيتين معًا، وسيكون فعالاً في الوصول إلى منتج أفضل، وتجنيبه الأخطاء المهنية التي تقع بها غالبية المشاريع (Teizer, et al., 2018)، وكذلك في تحقيق النجاح وتخفيف بعض التحديات الرئيسة للمشاريع في التحكم في دورة حياة المشروع (Wu, Wang, & Wang, 2016)، وفي التخطيط ومراقبة أعمال البناء والتواصل الفعال وإدارة السلامة والمشتريات (Tay, et al., 2017)، واقتران التنفيذ بدقة تفاصيل التصميم، وكفاءة الطاقة، وخفض التكاليف، وعزل أفضل للهيكل (Kiroglu & Sakin, 2017)، وضبط أداء الطابعة ومستويات التجميع، وكذلك فحص المنتجات المطبوعة على مستوى الشكل (Wu, Wang, & Wang, 2016).

وعلى الرغم من كل هذه الفوائد التي ذكرت فمن الصعب أن نتخيل حتى الآن أن الطباعة ثلاثية الأبعاد يمكن أن تحل محل البناء التقليدي في السنوات القليلة المقبلة (Kiroglu & Sakin, 2017) (Hojati, et al., 2018)، فهي تكنولوجيا باهظة الثمن، وما تزال محدودة، فضلًا عن أن حجم الطابعة الكبير يعد عائقاً، وأن تكلفة النقل للموقع مكلفة (Selçuk & Beyhan, 2017).

٤. التحديات التي تواجه الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد:

ظهرت الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد التي جمعت خبراء من الهندسة المعمارية والإنشائية وهندسة التصنيع لتطوير المواد والتقنيات والأنظمة اللازمة للتطبيقات العملية للطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد (Hojati, et al., 2018)، وعلى الرغم من تزايد الباحثين والمؤسسات والهيئات العاملة بالتصنيع بالإضافة والطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد فإن هذه التقنية ما تزال في مهدها (Bos, et al., 2016) ، وتحتاج إلى التطوير بتعاون مكثف بين المختصين من المهندسين المعماريين والمتخصصين في علم مواد البناء وعلم الروبوت والأجهزة الصناعية والمهندسين الإنشائيين، وآخرين ممن لهم صلة بالتخصص؛ فيطرح كلّ منهم القيود التي تكبله، ومن ثم التوصل إلى حل قابل للتحقيق؛ من أجل إحداث تطورات مفصلية في خرسانة تقنية الطابعة ثلاثية الأبعاد (Wangler, et al., 2016)، علمًا أنه بدأت مواد بناء وإنشاء الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد بالتطور، وتطورت طرق تنفيذها أيضاً (Lim, et al., 2011)، وتتنافس الشركات والهيئات في اختراع وتطوير مواد بناء جديدة للطابعة، مع الإشارة إلى أنه لا تزال عملية تطوير المواد لعملية الطباعة ثلاثية الأبعاد مهمة صعبة، ولا يزال إلى الآن يُنتج هياكل ونماذج باستخدام تركيبة مختلفة من الإسمنت والرمل ودخان السيليكا والألياف (Tay, et al., 2017)ويكتشف تدريجيا الفهم العلمي الأساسي للعلاقات بين التصميم والمواد والعملية والمنتج (Bos, et al., 2016)، إلا أنها تواجه كثيرًا من التحديات التي يجب معالجتها؛ كتطوير مواد البناء، فهي أحد أكبر التحديات أمام نجاح عملية الطباعة، ومن ثم نجاح عملية البناء.

٤-١ قابلية بثق الخرسانة وتدفقها
٤-٢ قابلية البناء
٤-٣ مزيج الخرسانة
٤-٤ توقيت فتح فوهة الطابعة
٤-٥ استخدام الطبقة اللاصقة
٤-٦ السلامة الهيكلية
٤-٧ السلامة الإنشائية
٤-٨ المعالجة اللاحقة (Panda, et al., 2016) (Panda, et al., 2018)

٤-١ قابلية بثق الخرسانة وتدفقها:

تعتمد الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد في طباعتها على الخرسانة، وتواجه العديد من التحديات بدءاً من مرحلة بثق الخرسانة مروراً بتدفقها، لتكون الخرسانة قادرة على المرور عبر المضخة وأنابيب النقل وفوهة الرش دون أي تغيير في خصائصها الفيزيائية (Lebonnote, et al., 2016)،لضرورة حركة الخرسانة بمعدل تدفق سلس ومستمر، دون حدوث مشاكل أو تعطل في عمل الطابعة أثناء طباعتها.

ويمكن تحقيق ذلك من خلال تحليل سرعة الطباعة بتدفق الخرسانة بسلاسة حتى تضعها الطابعة في طبقات بعضها فوق بعض (Bos, et al., 2016) إضافة إلى سرعة رأس الطابعة، وتردد المضخة وضغطها، ولزوجة الخرسانة ويتبعها توقيت فتح فوهة الطباعة وإغلاقها، وارتفاع رأس الطابعة فوق سطح الطباعة، فجميع هذه النقاط لها تأثير كبير في هندسة المنتج المطبوع وخصائصه (Panda, et al., 2016)، حيث تعد قابلية البثق هي أهم ميزات الخرسانة في الطباعة ثلاثية الأبعاد (Bos, et al., 2016).

٤-٢ قابلية البناء:

تواجه الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد صعوبة احتفاظ كتلة المواد المطبوعة بهندستها (الحجم والشكل)، ومقاومة المواد المطبوعة الرطبة للتشوه تحت الحمل المتزايد (Nerellaa, Krauseb, & Mechtcherinea, 2019)، مع قدرة الطبقة الخرسانية المطبوعة على التصلب قبل وضع الطبقة الخرسانية التالية على الطبقة المطبوعة (Lebonnote, et al., 2016)، فضلًا عن ضرورة التصاق الطبقات البينية جيدًا بالطبقات العليا لتكون قادرة على التشكيل النهائي للمنتج المطبوع؛ بناء على أن هناك ثلاثة مصادر رئيسية للتشوه (الوزن الذاتي - ووزن الطبقات التالية - وضغط البثق) (Nerellaa, Krauseb, & Mechtcherinea, 2019).

وتهدد هذه المشكلة الحفاظ على هيئة الكتل المطبوعة بالشكل المطلوب إلا أنه يمكن تحقيق ذلك من خلال إضافة التعزيزات الضرورية (مثل الألياف والجسيمات النانوية) التي ستساعد على تجاوز التحدي (Panda, et al., 2016) حيث تعد قابلية البثق والبناء هي أهم ميزات الخرسانة في الطباعة ثلاثية الأبعاد.

٤-٣ مزيج الخرسانة:

يُشكِّل مزيج مادة الخرسانة تحدّيًا في عمل الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد، إذ يجب تطوير تركيبة خليط الخرسانة المكون للبناء يشمل العديد من الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، ويتكون هذا الخليط من الأسمنت ومجموعة من الحصا الكبيرة والصغيرة والمياه، وفي بعض الحالات تضاف تعديلات مختلفة، حيث تعد أحد الاتجاهات الرئيسية لتعديل مزيج الخرسانة، التي تؤثر تأثيرًا كبيراً في خصائص الخرسانة، ومن الأمثلة على هذه الإضافات طين الكاولين، ودخان السيليكا، والجير الهوائي، والرماد المتطاير، والملدنات، ومسرعات التصلب، ومن أشهر الإضافات لتقوية الخرسانة الهيلكية للطباعة ثلاثية الأبعاد إدخال مجموعة متنوعة من الألياف والألياف الزجاجية والحشوات الأخرى في الخليط، وهو ما يمكن أن يزيد كثيرًا من قوة الخرسانة (Liasota, et al., 2020).

٤-٤ توقيت الفتح:

وفي سبيل الحفاظ على الطبقات المكونة للكتلة المطبوعة أثناء عملية الطباعة الخرسانية يعد توقيت فتح فوهة الطابعة للطباعة وإغلاقها عاملًا مهمًّا جدًا؛ وما زالت في طور معالجة هذا التحدي، لذلك يسعى مطورو تقنية الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد للتغلب على هذه المشكلة في برمجة التحكم في عامل الوقت للحفاظ على تصلب الخرسانة وقوتها وحمايتها من الانهيارمع بعض العوامل الأخرى (Panda, et al., 2016).

٤-٥ استخدام الطبقة اللاصقة:

تعد القوة الرابطة للطبقات المطبوعة المكونة للمبنى أحد الأسس الرئيسة لضمان الاستقرار في الهيكل الخرساني المطبوع، ويؤدي عدم التوافق في خصائص الخرسانة للطبقات المتراكبة بعضها فوق بعض إلى فشل المنتج المطبوع (Panda, et al., 2017)، وتعتبر الطبقة اللاصقة من تحديات نجاح اكتمال المبنى المُنشأ بالطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد، لأن الرابطة الجيدة هي عامل رئيس في توفير عمل متآلف في الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد مع فارق وقت الطباعة وسرعة الطباعة والمسافة بين فوهة رأس الطابعة وسطح الطباعة (Panda, et al., 2017). وتعد من أحد أساليب

ضمان القوة الرابطة مراعاة شكل طبقات الخرسانة، حيث يمكن تعديل شكل الطبقات بتغيير أشكال فوهة الطباعة للدائرية والمستطيلة والمربعة، وقد أثبتت الفوهات المربعة والمستطيلة ثباتًا وموثوقية للطباعة؛ لأن احتمالات مشاكل الطباعة قليلة، على العكس مع الفوهات الدائرية حيث يصعب إدارة طبقاتها لأنه من المحتمل أن تسقط الطبقات وينهار الهيكل بأكمله وتتسبب في حوادث في عملية الطباعة (Bos, et al., 2016).

٤-٦ السلامة الهيكلية:

نظراً لأهمية الموضوع فقد تطرق العديد من الباحثين إليه، لا سيما Selçuk and Beyhan (2017) الذين رأيا ضرورة إجراء المزيد من البحوث والدارسات بشأن النقاط التي لا تزال غير واضحة؛ كالاستقرار الهيكلي (Selçuk & Beyhan, 2017).

فما يزال هناك العديد من القيود التي تحد من حرية عمل الطابعة ثلاثية الأبعاد بوصفها أحد أهم التحديات في الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد؛ مثل عدم القدرة على تصنيع الأجزاء المتدلية بشكل كبير؛ لحاجتها إلى مواد دعم لاستقرار المنشأ، وهو ما يؤدي إلى تقييد الطابعة من الهياكل الحرة المعقدة، ولكن ما تزال هناك العديد من الحلول؛ كبناء هذه الهياكل في أقسام متعددة ثم تجميعها لاحقًا لبناء الهيكل الكامل، إلا أن ذلك قد يشكل خطورة على السلامة الهيكلية عند تجميع الأقسام (Tay, et al., 2018)، ومن الحلول الأخرى التي قد تفيد في التغلب على هذه المشكلة استخدام نظام D-shape الذي يسمح ببناء الأجزاء المتدلية باستخدام نهج آخر مختلف عن جميع أنظمة الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد الأخرى (Lim, et al., 2011).

٤-٧ السلامة الإنشائية:

يسبب نقل قطع البناء إلى الموقع بعض المشاكل، لذلك يجب توخي الحذر خصوصاً عند تركيبها في الموقع لعدة اعتبارات؛ منها الانكماش الذي يسببه تغير درجة الحرارة، وأن يكون الترابط بين القطع أثناء التركيب قويًا بما فيه الكفاية، مع الأخذ في الحسبان ألا يتسبب التركيب في تغيير في الحجم، ويمكن إضافة تعزيزات لاحقة (مثل الألياف، وأسلاك الفولاذ) إذا لزم الأمر لتحسين الخصائص الإنشائية (Tan, Tay, & Panda, 2018).

٤-٨ المعالجة اللاحقة:

بعد انتهاء عملية طباعة المبنى بتقنية الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد لا بد من عدة خطوات للحصول على كتلة خرسانية سليمة خالية من العيوب بسبب بعض المشاكل التي تظهر أثناء الطباعة، وتشكل عائقاً وتحدّيًا في عملية الطباعة بكونها تستغرق وقتاً وتؤثر في جودة المنتج النهائي وتحتاج إلى إجرائها يدويًّا (Sharma, Garg, 2013).

٥. أشكال التصنيع بالإضافة للطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد:

٥-١ Contour Crafting (America)

٥-٢ D-shape (Italy)

٥-٣ Concrete Printing (UK)

هناك حالياً ثلاثة أشكال للتصنيع بالإضافة باستخدام الخرسانة لطباعة الأحجام الكبيرة حول العالم، وقد أثبتت هذه الطرق الثلاث أن المكونات ذات الحجم الكبير يمكن إنتاجها بنجاح، وهي مناسبة للبناء والتطبيقات المعمارية (Panda, et al., 2016)

٥-١ Contour Crafting (America)

تعد من أقدم تقنيات الطباعة (Zee & Marijnissen, 2017) وأحد التطورات الرئيسية في تقنيات التصنيع بالإضافة المتعلقة بالبناء، فهذه التقنية تعطي فرصة كبيرة لأتمتة عملية البناء، وتتميز بسرعة كبيرة في التنفيذ؛ حيث تستطيع تنفيذ ما يقارب ١٨٥ م٢ في أقل من ٢٤ ساعة، وتخفيض تكاليف البناء بنسبة ٦٦٪ عن البناء التقليدي، وتخفيض كبير في عدد العاملين، وتخفيض في كمية النفايات، وذلك باستخدام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد التي سوف تكون قادرة على طباعة منزل كامل مباشرة في الموقع (Hager, Golonka & Putanowicz, 2016)

بناء عليه ستسمح الطباعة ثلاثية الأبعاد بإنشاء مكونات كبيرة ذات مرونة معمارية غير محدودة، ودقة عالية ومفيدة للغاية للإسكان منخفض الدخل، وإعادة الإعمار الطارئ من قبل وكالات الإغاثة والكوارث التي تعمل في أماكن دمرتها الزلازل والفيضانات والحروب والكوارث الطبيعية الأخرى (Pimpley, 2019)، ويجري بحث Contour Crafting من قبل Behrokh

Khoshnevis من معهد علوم المعلومات في جامعة جنوب كاليفورنيا.

وقد ذكرKhoshnevis، في عام 2010، أن وكالة ناسا تقوم بتقييم Contour Crafting لتطبيقها في بناء قواعد على المريخ والقمر. وفي عام 2013 مولت وكالة ناسا دراسة في جامعة جنوب كاليفورنيا لمواصلة تطوير تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد Contour Crafting) (Chauhan, (n,d)، وتتم عملية طباعة البناء باستخدام الأذرع الآلية وفوهات البثق بالضخ لإخراج طبقتين من الخليط الأسمنتي لبناء شكل خرساني عمودي، ويتم إدخال عناصر الدعم والتعزيز يدويًّا بين الطبقات في كل 30 سم أفقيًّا و13 سم عموديًّا، ويحمل الرأس ما يشبه المجرفة لإنشاء أسطح مقذوفة ناعمة (Nematollahia, Xiab , & Sanjayanc, 2017).

هذا ويعد برنامج التشغيل مهمًّا لضمان التشغيل للتطبيقات المستخدمة في التصميم المعماري والتحليل الهيكلي وعملية الطباعة. ويجب لأتمتة عملية البناء وإدارتها وتحسينها ترجمة النموذج الرقمي والتحقق من ملاءمته لعملية الطباعة بأقل قدر من التدخل البشري (Hager, Golonka, & Putanowicz, 2016).

٢-٥ D-shape (Italy)

D-shape طابعة خرسانية ثلاثية الأبعاد، اخترعها مهندس مدني إيطالي يدعى Enrico Diniعام ٢٠٠٤، مدعيًا أنها أول تقنية طباعة بناء ثلاثية الأبعاد في العالم تستطيع أن تطبع مبنى بالكامل ابتداءً من الأساسات إلى الأسقف والسلالم. كان هدف Enrico هو استخدام المواد المتاحة محليًّا لتشكيل الهياكل المطبوعة ثلاثية الأبعاد وطباعة الأعمال المعمارية (Nadarajah, 2018) ، وتتميز بإمكانية تنفيذ الأشكال المعقدة والكتل المتدلية بسهولة، وهو ما يتيح للمعماريين سهولة كبيرة في تنفيذ أفكارهم. وقد نجحت جميع الاختبارات على مجموعة متنوعة من الركام الحجري؛ كالصخور البركانية والرخام (Nadarajah. 2018) ، حيث تعمل على ترسيب مادة الطباعة ضمن كتلة المسحوق في طبقات-5 10مم، وتشبه إلى حد بعيد عملية طباعة مسحوق الحبر، بحيث تتماسك مادة البناء تلقائيًّا، وتتشكل الطبقات المطلوبة من مواد الطباعة (Cesaretti, et al., 2014) ، وبمجرد اكتمال الكائن المطبوع تظهر الكتلة المطبوعة عن طريق إزالة وتنظيف الركام أو الحجر المسحوق وطحن وتلميع السطح، إلا أن عيب هذه العمليات هو أنها تتطلب المزيد من الصيانة والتنظيف والتحكم (Lim, et al., 2011).

تعد الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد طفرة في تاريخ الطباعة والبناء لقدرتها على تصنيع الأجزاء المتدلية، حيث أصبح من الممكن إنتاج شكل هندسي معقد؛ كذلك يمكن اختيار استخدام مواد التصلب السريع لطباعة هذه الهياكل إلى حد ما دون المساس بقوة الترابط بين الطبقات المودعة (Panda, et al., 2018).

٣-٥ Concrete Printing (UK)

طورت هذه التقنية جامعة Loughborough في المملكة المتحدة، وتتميز بخفة وزن الجدران، مع الحفاظ على متانتها وقوتها عبر فراغات تتوزع توزيعًا مدروسًا في تلك الجدران، وتستغل في التمديدات المختلفة للمشروع، وتخفف أعمال التكسير أثناء التنفيذ، مع سرعة كبيرة في الإنجاز.

وقد طورت هذه التقنية لتصبح عملية البثق أكثر حرية في الطباعة ثلاثية الأبعاد وبدقة مع أقل ترسيب في المواد للتحكم في الهندسة الداخلية والخارجية للكتل المطبوعة (Nematollahia, Xiab , & Sanjayanc, 2017)، فبذلك تمتلك القدرة على إنتاج مكونات بناء مخصصة للغاية؛ فهي خرسانة عالية الأداء معززة معززة (Li, Wang, & Ma, 2018).

في قسم الهندسة المدنية في جامعة لوبورو، طُورت تقنية الطباعة الخرسانية(Concrete Printing) لاستخدامها في عمليات البناء القائمة على البثق بطريقة مماثلة لـCC، بالإضافة إلى تحقيق MPa 100من قوة الضغط وقوة الانحناء 10 MPa في 28يومًا (Şahin & Tarhan, 2019) .

يبين (الشكل ٩) مقعدًا طُبع بتقنية الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعادC.P، وكان طول المقعد مترَين وعرضه 0.9 متر، وبارتفاع 0.8 متر، ويتألف من 128 طبقة بثخانة 6 ملم، ويشمل المقعد 12فراغًا تقلل من الوزن، ويساهم في تحقيق العزل الصوتي والحراري وتشكيل مسار لخدمات البناء الأخرى، كما تساهم في وضع عناصر دعم وتعزيز إنشائية.

شكل (٦): مقعد طُبع بالطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد - المصدر:
(Nematollahia, Xiab , & Sanjayanc, 2017)

٦. حالة دراسية:

أجريت أحد الأبحاث لقاعة متعددة الأغراض (قاعة رأس العين) نُفِّذت بنظام الإنشاء التقليدي ونتائج دراسة مشروع سيتم تنفيذه بنظام الإنشاء بالطابعة ثلاثية الأبعاد؛ ومن خلال مقارنة بيانات البناء التقليدية فيما يتعلق بالتصميم وتكلفة الخرسانة، مع البيانات المتوقعة في حال بناء نفس المبنى باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد، بداية من إنشاء نموذج للمبنى باستخدام برنامج Revit.

تعود ملكية القاعة للحكومة، وهي عبارة عن مبنى خرساني مكون من طابق واحد بنمط تقليدي وكسوة حجرية، وكان من أحد أهداف الدراسة هي بحث إمكانية بناء مشاريع حكومية بجودة أفضل وتكلفة أقل ووقت أسرع.

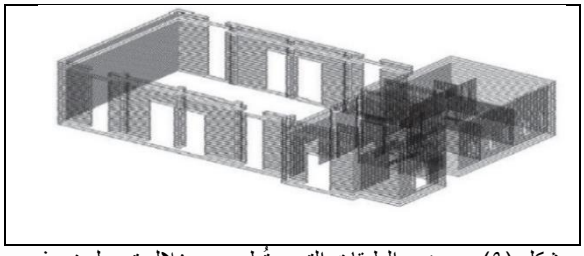
في حالة قاعة رأس العين المتعددة الأغراض، تتلخص عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد بإنشاء ملف ريفيت وتحويله إلى صيغة STL، وتشريحه إلى طبقات، وتحديد مسار الطابعة، ومن ثم تحويل النموذج إلى ملف STL إلى شرائح وطبقات، وبعد ذلك يتم إيقاف تشغيل أي فئات إضافية لن تكون مطلوبة للطباعة، مثل النوافذ والأبواب، وأخيراً يُرسَل طلب الطباعة إلى الطابعة ثلاثية الأبعاد، حيث ينبغي طباعة الطبقات في الموقع حتى تتم طباعة المبنى بأكمله، نتيجة لذلك فإن مراحل البناء المتوقعة في الموقع بالطباعة ثلاثية الأبعاد موضحة على أساس نتائج Revit.

بعد تشكيل الجدران المجوفة الخارجية، التي تعد أقوى بثلاث مرات من الجدران المبنية مع الخرسانة التقليدية لتصل إلى70 MPa ، من الممكن تخصيص فراغات الجدران لاستخدامها في تمديدات السباكة.

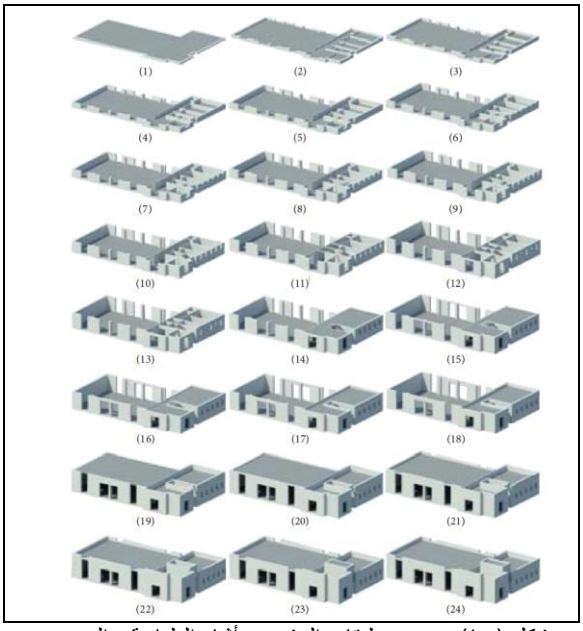
تقدر تكلفة الخرسانة باستخدام نظام الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد بـ ٨٨٧٢,٥ دينارًا أردنيًّا، مقابل ٢٦,٢٧٨ دينارًا أردنيًّا، أي إن الطباعة ثلاثية الأبعاد تقلل 66% من تكلفة البناء بالطريقة التقليدية في حال تطبيقها في الأردن (Allouzi, Al-Azhari, & Allouzi, 2020).

شكل (٧) : يوضح نموذجًا للمبنى بطريقة الإنشاء التقليدي- المصدر:
(Allouzi, Al-Azhari, & Allouzi, 2020)

شكل (٨) : يوضح REVIT Model للمشروع - المصدر:
(Allouzi, Al-Azhari, & Allouzi, 2020)



شكل (٩) : يوضح الطبقات التي ستُطبع من خلال تحويل نموذج المبنى إلى STL - المصدر: (Allouzi, Al-Azhari, & Allouzi, 2020)



شكل (١٠): يوضح طبقات المشروع أثناء الطباعة - المصدر:
(Allouzi, Al-Azhari, & Allouzi, 2020)

٧. الدراسة الميدانية:

تم اختيار خمس مشاريع للدراسة الميدانية استناداً إلى بعض المعايير:

جدول (١): يوضح معايير اختيار مشاريع الدراسة الميدانية

الرقم	المعيـــــــار
١	أن يكون من المشاريع القائمة في المملكة العربية السعودية (مدينة الرياض).
٢	مشاريع مساكن قائمة بنظام الإنشاء بالطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد ونظام الإنشاء مسبق الصنع ونظام الإنشاء التقليدي.
٣	مشاريع طبقت فيها معايير إدارة المشاريع (الوقت – الجودة – التكلفة).
٤	مشاريع تتبع لجهات حكومية أو مطورين عقاريين أو سكن خاص للشركات.
٥	وجود فريق هندسي متكامل من طرف المقاول والمالك.
٦	أن يحمل المقاول شهادة تصنيف مع هيئة المقاولين السعوديين، وأن يحمل المطور شهادات تصنيف من وزارة الشؤون القروية والبلدية، وأن تحمل الشركات شهادة تصنيف (شركة كبيرة).

وفقاً لما تقتضيه الدراسة بناء على المعايير التي سبق تحديدها بحدود الدراسة وبدء الدراسة الميدانية والبحثية لتحديد حجم العينة الموجهة؛ فإن مجتمع الدراسة يتمثل في:

- المسؤولين عن مشاريع الإسكان بالجهات الحكومية أو شركات التطوير العقاري.
- الأكاديميين المتخصصين في مجال الإسكان وطرق ونظم التنفيذ.
- المهندسين العاملين في مشاريع الإسكان التي يجري تنفيذها بنظام البناء التقليدي أو المسبق الصنع.
- مشاريع الإسكان الخاصة والحكومية التي يجري تنفيذها بنظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد ونظام الإنشاء التقليدي ونظام الإنشاء مسبق الصنع في المملكة العربية السعودية.

استناداً للدراسة الميدانية التي أجريت على خمس مشاريع في مدينة الرياض نُفذت بنظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد ونظام الإنشاء مسبق الصنع ونظام الإنشاء التقليدي وبعد إجراء الزيارات الميدانية والمقابلات الشخصية مع مسؤولي المشاريع الخمسة تم التوصل إلى النتائج التالية:

جدول (٢) : يوضح المشاريع التي تحددت للدراسة الميدانية

نوع النظام الإنشائي	اسم المشروع	المالك
نظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد	مشروع تجربة مسكن بنظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد	وزارة الإسكان
نظام الإنشاء مسبق الصنع	مشروع مجمع فلل الفنار	شركة الفنار
نظام الإنشاء التقليدي	مشروع مجمع ألفا.	شركة ألفا للتطوير العقاري

من خلال قراءة النتائج لنظام الإنشاء بالطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد يتوضح أن سرعة التنفيذ بحسب إفادة مهندس مشروع تجربة مسكن بنظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد تعتبر الأسرع بمعدل ٣ أيام للوحدة السكنية، والأقل تكلفة بمتوسط ٣٠٠ ريال للمتر المربع الواحدة، كما تتميز بدقة عالية في التنفيذ بحكم الروبوت الذي يتحكم بها بالنمذجة والتكامل مع BIM ومستوى عالٍ تحققه نظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد في تخفيض كمية النفايات والتلوث خارج وداخل الموقع، إلا أن نظام الإنشاء بالطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد لايمتلك قدر كافٍ من المرونة حيث صعب التعديلات المعمارية والإنشائية التي يتطلبها المسكن عادة لتحقيق احتياجات السكان التي تتغير بشكل دائم، كما يتحقق مستوى يصل إلى ١٠٠٪ في الأمن والسلامة للعاملين في المشروع.

جدول (٣): معايير مقارنة لمشروع مسكن بنظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد

نوع النظـــام	نظام الإنشاء بنظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد
اسم المشروع	مشروع تجربة مسكن بنظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد
المـــــــالك	وزارة الإسكان
سرعة التنفيذ	يعتبر من أسرع الأنظمة الإنشائية مقارنة بنظام الإنشاء المسبق الصنع ونظام الإنشاء التقليدي
	مدة إنجاز المشروع: ٣ أيام
التكلفة	تكلفة الإنشاء بنظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد أقل تكلفة مقارنة بنظام الإنشاء المسبق الصنع ونظام الإنشاء التقليدي
	تكلفة المتر المربع: ٣٠٠ ريال سعودي
دقة التنفيذ	يتميز بدقة تنفيذ عالية بحكم الروبوت الذي يتحكم بها بالنمذجة مع تقنية BIM
	دقة التنفيذ: ١٠٠٪
سهولة التكامل مع BIM	تعتبر من أساليب التنفيذ التي يمكنها تحقيق التكامل مع BIM بسهولة
	سهولة تحقيق التكامل: ١٠٠٪
المرونة	لا يتمتع الإنشاء بنظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد بالمرونة الكافية المطلوبة لتحقيق احتياجات الساكن
	نسبة المرونة: ٠٪
الإستدامة	يعتبر الإنشاء بنظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد بيئياً لتقليل كمية الهدر والنفايات
	نسبة الإستدامة: ١٠٠٪
مستوى الأمن والسلامة	تعتبر من الأنظمة الإنشائية التي تتميز بمستوى الامن والسلامة مقارنة بنظام الإنشاء المسبق الصنع ونظام الإنشاء التقليدي
	نسبة الأمن والسلامة: ١٠٠٪

جدول (٤): معايير المقارنة لمشروع مجمع فلل الفنار (نظام الإنشاء المسبق الصنع).

نوع النظـــام	نظام الإنشاء مسبق الصنع.
اسم المشروع	مشروع مجمع فلل الفنار.
المـــــــالك	شركة الفنار.
سرعة التنفيذ	يعتبر نظام الإنشاء مسبق الصنع أعلى سرعة في التنفيذ مقارنة بنظام الإنشاء التقليدي وأقل من نظام الإنشاء بتقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد.
	مدة إنجاز الوحدة السكنية: ٧ أيام
التكلفة	تكلفة الإنشاء بنظام الإنشاء المسبق الصنع أعلى قليلاً من نظام الإنشاء التقليدي
	تكلفة المتر المربع: ٩٠٠ ريال سعودي
دقة التنفيذ	يتميز بدقة تنفيذ عالية تفوق نظام الإنشاء التقليدي
	دقة التنفيذ: ١٠٠٪
سهولة التكامل مع BIM	تعتبر من أساليب التنفيذ التي يمكنها تحقيق التكامل مع BIM بسهولة
	سهولة تحقيق التكامل: ١٠٠٪
المرونة	لا يتمتع نظام الإنشاء مسبق الصنع من الأنظمة الإنشائية بالمرونة الكافية المطلوبة لتحقيق احتياجات الساكن
	نسبة المرونة: ٠٪
الإستدامة	يعتبر نظام الإنشاء مسبق الصنع بيئياً لتقليل كمية الهدر والنفايات
	نسبة الإستدامة: ١٠٠٪
مستوى الأمن والسلامة	تعتبر من الأنظمة الإنشائية التي تتميز بمستوى الامن والسلامة مقارنة بنظام الإنشاء التقليدي
	نسبة الأمن والسلامة: ١٠٠٪

جدول (٧): معايير المقارنة لمشروع مجمع ألفا (نظام الإنشاء التقليدي).

عدد المشاريع	نظام الإنشاء التقليدي.
نوع النظـــام	مشروع مجمع ألفا.
اسم المشروع	شركة ألفا للتطوير العقاري.
سرعة التنفيذ	يعتبر نظام الإنشاء التقليدي الأقل سرعة مقارنة بنظام الإنشاء المسبق الصنع ونظام الإنشاء بالطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد ويعتبر متماشياً إلى حد ما مع الجدول الزمني المقرر.
	مدة إنجاز الوحدة السكنية : ١٠٠ يوم
التكلفة	تكلفة الإنشاء التقليدي الأقل تكلفة مقارنة بنظام الإنشاء المسبق الصنع ونظام الإنشاء بالطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد.
	تكلفة المتر المربع: ٦٧٥ ريال سعودي
دقة التنفيذ	يعتبر نظام الإنشاء بالطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد ونظام الإنشاء مسبق الصنع أعلى دقة من نظام الإنشاء التقليدي.
	دقة التنفيذ: ٧٠ % (نظراً لسوء اختيار المقاول)
دقة التنفيذ	يعتبر نظام الإنشاء بالطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد ونظام الإنشاء مسبق الصنع أعلى دقة من نظام الإنشاء التقليدي.
	دقة التنفيذ: ٧٠ % (نظراً لسوء اختيار المقاول)
سهولة التكامل مع BIM	تعتبر من أساليب التنفيذ التي يمكنها تحقيق التكامل مع BIM بسهولة
	لم تستخدم تقنية BIM في تنفيذ المشروع لكن يمكن تحقيق ذلك بسهولة
المرونة	يتميز نظام الإنشاء التقليدي بمرونة عالية وإمكانية إجراء التعديلات بسهولة.
	نسبة المرونة: ١٠٠٪ (بما لايتعارض مع العناصر الإنشائية)
الإستدامة	يتسبب نظام الإنشاء التقليدي بكمية كبيرة من النفايات أثناء التنفيذ.
	نسبة الإستدامة: ٢٥٪ مقارنة مع نظام الإنشاء المسبق الصنع.
مستوى الأمن والسلامة	تعتبر من الأنظمة الإنشائية التي تعاني من مستوى ضعيف من الأمن والسلامة مقارنة بنظام الإنشاء المسبق الصنع ونظام الإنشاء بالطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد.
	نسبة الأمن والسلامة: ٣٥٪

جدول (٨) نتائج تحليل الدراسة الميدانية للمشاريع بنظام الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد ونظام الإنشاء مسبق الصنع ونظام الإنشاء التقليدي

معيار المقارنة	الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد	الإنشاء مسبق الصنع	الإنشاء التقليدي
سرعة التنفيذ. مدة إنجاز المشروع	٣ -٥ يوم	٦-٧ يوم	٧٠-١٠٠ يوم
التكلفة	٣٠٠ ريال	٩٠٠- ١١٠٠ ريال	٦٥٠-٧٥٠ ريال
دقة التنفيذ	١٠٠ %	١٠٠ %	٧٠ - ٩٠٪
سهولة التكامل مع BIM	١٠٠ %	١٠٠ %	---
المرونة	٠ %	٠ %	١٠٠٪
الإستدامة	١٠٠ %	١٠٠ %	٠ %
مستوى الأمن والسلامة	١٠٠ %	٩٠- ١٠٠ %	٣٠- ٥٠ %

٨. النتائج:

تعتبر تقنية الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد بدايات لثورة تقنية في مجال تشييد المساكن في المستقبل ومن أهم التقنيات التي تدعم جهود المملكة للتحول الرقمي وأتمتة مجال صناعة التشييد للمساكن في الوقت الحالي.

إلا ان انتشار تقنية الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد في مجال تشييد المساكن على المستوى المحلي ضعيف جداً على الرغم من إمكانيات وقدرة الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد.

وتعتبر مجالات استخدام تقنية الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد واسعاً سواءً في المساكن الفردية وإسكان التطوير العقاري إلى المرافق والمراكز التجارية وخدمات البناء الإسعافي للكوارث والحروب نسبةٍ أعلى كونها تقنية سريعة وتساعد في تحقيق مأوى كريم في أوقات ضيقة وحرجة.

ونظراً لحداثة تقنية الطابعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد فلابد من تحديات تواجه انتشار وتطور هذه التقنية لاسيما الحاجة لاستثمارات أولية عالية ويساعد الاستثمار في مجال البحث والتطوير لدعم انتشار هذه التقنية بشكل أسرع وأوسع إضافة إلى العديد من الأساليب التي يمكن أن تحقق انتشار أوسع لاستخدام هذه التقنية في مجال المباني السكنية منها تقديم تسهيلات ودعم حكومي، إضافة إلى سن تشريعات حكومية لتشجيع الباحثين والمعاهد البحثية للاهتمام أكثر في دراسة هذه التقنية وأهميتها وإمكانياتها.

تعتبر المعارض ووسائل الإعلام من أساليب التعريف بإمكانيات وقدرات تقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد ودورها في دعم مجال صناعة التشييد ليتسنى عرض إمكانيات هذه الطابعة لجميع شرائح المجتمع مع مختصين ومهتمين نظراً أن الحواجز النفسية والأحكام الشخصية المسبقة عن التقنيات نقص وعدم انتشار المعلومات عن فوائد وإمكانيات تقنيات الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد في مجال تشييد المساكن تمثل أحد مسببات عدم انتشار قبولها أو استخدامها في مجال تشييد المساكن باعتبار استخدام تقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد هو الخيار الأكثر مناسبة لتشييد العديد من أنماط المسكن السعودي خياراً ممكناً لأن يكون أحد أنماط المسكن السعودي وأكثر جدوى من الناحية الفنية والمالية في المستقبل القريب (٥-١٠ سنوات).

٩. التوصيات:

لقد توصلت هذه الدراسة إلى مجموعة من التوصيات:

٩-١ للمسؤولين عن مشاريع الإسكان بالجهات الحكومية:

- دعم تقنيات البناء الحديثة بما فيها الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد من خلال سن التشريعات والقوانين اللازمة لدعم مشاريع الإسكان وتعزيز برامج وزارة الشؤون البلدية والقروية والإسكان بما يتوافق مع رؤية المملكة ٢٠٣٠.
- وضع السياسات والمعايير بهدف تحديد وتحفيز دور القطاع الخاص لتهيئة بيئة استثمارية نموذجية في تقنية الطابعات الخرسانة ثلاثية الأبعاد، لاسيما الشراكات مع الشركات العقارية والتمويلية.
- دعم وتمويل الهيئات والشركات التي تهدف إلى العمل والبحث بتقنية الطابعات الخرسانة ثلاثية الأبعاد.
- تأهيل الكوادر الفنية ذات الخبرة لدعم مشاريع الإسكان القائمة بتقنية الطابعات الخرسانة ثلاثية الأبعاد.
- زيادة التعاون بين المسؤولين عن مشاريع الإسكان مع الجهات والهيئات الحكومية الخدمية لتحديد استراتيجية الدعم للمشاريع السكنية القائمة بتقنية الطابعات الخرسانة ثلاثية الأبعاد، كالشركة السعودية للكهرباء وشركة المياه الوطنية والجهات الأخرى، عبر توفيرها في جميع المشاريع القائمة بتقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد وتخفيض رسوم هذه الخدمات باعتبارها تقنية صديقة للبيئة.
- دعم المطورين العقاريين بالمشاريع السكنية القائمة بتقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد عبر تقديم التسهيلات المالية، وتسهيل إجراءات العمل بتقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد وتخفيض رسوم وإجراءات العمل بها.
- دعم الأفراد عبر تقديم التسهيلات المالية وتخفيض الضرائب وتسهيل إجراءات الرخص والبناء للمشاريع السكنية القائمة بتقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد.

٩-٢ المسؤولين عن مشاريع الإسكان في شركات التطوير العقاري:

- الاستثمار في تقنية الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد بمشاريعها القادمة باعتبارها إحدى تقنيات البناء الواعدة.

٩-٣ صندوق التنمية العقارية والشركات التمويلية:

- زيادة ودعم قيمة التمويل للمشاريع السكنية التي سيتم تنفيذها بتقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد.
- دعم تمويل المشاريع السكنية القائمة بتقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد.
- إلغاء الفائدة على تمويل المشاريع السكنية القائمة بالطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد.

٩-٤ للجامعات والمعاهد البحثية:

- زيادة وعي الأكاديميين بمجال الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد وتطبيقها في المناهج ذات العلاقة.
- تطوير المناهج الدراسية لمواكبة آخر التطورات في تقنيات البناء كالطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد وطرق ونظم التنفيذ لضمان وعي وإطلاع المهندسين من مرحلة الدراسة الأكاديمية على تقنية الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد.
- توجيه المعاهد البحثية بالاستثمار في أبحاث تقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد بالتعاون مع الشركات المحلية والعالمية عبر تهيئة المختبرات والمرافق اللازمة نظراً للعديد من التحديات التي تواجه تقنية الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد والمساهمة في تطويرها.
- زيادة الأبحاث الخاصة بتقنية الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد بالمشاركة مع المهتمين والطلبة والأكاديميين المتخصصين في تقنية البناء.
- توجيه أبحاث طلبة الدراسات العليا والمبتعثين نحو تقنية الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد.
- عمل دورات تدريبية للطلاب عن تقنية الطباعة الخرسانية ثلاثية الأبعاد

٩-٥ صندوق الاستثمارات العامة وشركات الاستثمار:

- التوجه نحو الاستثمار بتقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد على المستوى المحلي والعالمي باعتبارها إحدى أهم تقنيات البناء في المستقبل القريب وتحقيق شراكات عالمية واعدة بها.

٩-٦ الهيئة السعودية للمهندسين:

- توجيه ودعم وتحفيز الشركات الهندسية الإستشارية للمشاريع القائمة بتقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد في الدراسات والإشراف لتسهيل الإعتماد على هذه التقنية.
- نشر الوعي المعرفي عن تقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد ومستجداتها من خلال إقامة المحاضرات والاستفادة من مصادر النشر الخاصة بالهيئة السعودية للمهندسين.

٩-١٠ الهيئة السعودية للمقاولين:

- إطلاق حملات توعوية وتثقيفية تشمل جميع الجهات ذات العلاقة، من أفراد، وشركات وجهات حكومية وتمويلية باعتبارها أحد أهم مصادر الثقة حول تقنيات البناء في المملكة العربية السعودية لكونها تعني في تنظيم أعمال المقاولين في السوق السعودي
- إطلاق لوائح تشريعية وتنظيمية للمقاولين العاملين بتقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد.
- دراسة وتأهيل المقاولين الراغبين بالعمل بتقنية الطابعات الخرسانية ثلاثية الأبعاد لرفع مستوى وكفاءة العاملين بهذه التقنية.