

تطوير مظلات ذكية للفراغات العامة في المدينة المنورة: استدامة وظيفية وتفاعلية  
من خلال التقنيات الرقمية

## Developing Smart Canopies for Public Spaces in Medina: Functional and Interactive Sustainability through Digital Technologies

أ.م.د/ حنان سليمان عيسى محمد

أستاذ مساعد - كلية الهندسة بالمطرية - قسم الهندسة المعمارية - جامعة حلوان

Assist.Prof. Dr. Hanan Suliman Eissa Mohammed

Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Engineering,  
Helwan University[hanan\\_mohamed01@m-eng.helwan.edu.eg](mailto:hanan_mohamed01@m-eng.helwan.edu.eg)

أ.م.د/ داليا محمود إبراهيم خليل

أستاذ مساعد - كلية الفنون التطبيقية- قسم تصميم الأثاث والإنشاءات المعدنية - جامعة حلوان

Assist.Prof. Dr. Dalia Mahmoud Ibrahim Khalil

Assistant Professor – Department of Metal Furniture and Constructions Design –  
Faculty of Applied arts – Helwan University[dr.daliamek@gmail.com](mailto:dr.daliamek@gmail.com)

## ملخص البحث:

تُعد المدينة المنورة واحدة من أسرع المدن السعودية تطوراً عمرانياً، وتشهد توسعاً توسعاً عمرانياً متسارعاً نتيجة لحركتها الدينية والسياحية والاجتماعية، ما يفرض تحديات مناخية وبيئية كبيرة، خاصة في ظل مناخها الصحراوي الحار والجاف وكثافة الاستخدام الموسمي والدائم للفراغات العامة، وبالرغم من أهمية المظلات المعمارية في توفير الحماية المناخية وتحسين جودة الاستخدام في هذه الفراغات إلا أن الحلول الحالية لا تزال محدودة من حيث التفاعل والاستجابة البيئية، وغالباً ما تفتقر إلى التكامل بين الشكل والوظيفة والاستدامة.

يسعى هذا البحث إلى تطوير نماذج مظلات ذكية تتلاءم مع طبيعة المدينة المنورة، تجمع بين الجوانب البيئية والوظيفية والتقنية والجمالية من خلال تسخير أدوات التصميم الرقمي المعاصر، ويعتمد البحث على منهجية متكاملة تشمل التحليل النظري والدراسة التطبيقية، إذ تم استخدام تقنيات التصميم البارامتري ونمذجة معلومات البناء (BIM)، وإنترنت الأشياء (IoT) لتصميم مظلات قادرة على التكيف الديناميكي مع الظروف المناخية المتغيرة وسلوك المستخدمين وتوفير بيئة خارجية مريحة بصرياً وحرارياً، كما يتضمن البحث تحليلاً نقدياً لنماذج من المظلات الذكية محلية وإقليمية وعالمية، ويقدم البحث تطبيقاً ميدانياً لتصميم مظلتين مخصصتين لبيئتين حضريتين مختلفتين، الأولى للمحاور الطولية والثانية للمساحات المفتوحة بما يعكس استجابة وظيفية وسياقية دقيقة، وتهدف هذه النماذج إلى الدمج بين الحلول الذكية مثل التظليل التكيفي وتوليد الطاقة الشمسية مع الحفاظ على الطابع العمراني المحلي والهوية الثقافية، كما يقدم البحث نموذجاً إرشادياً للمصممين لتطوير وتصميم مظلات ذكية تفاعلية ومستدامة عالية الأداء بيئياً وتشغيلياً..

تتمثل أهمية البحث في إسهامه في تحقيق مستهدفات رؤية المملكة 2030 من خلال دعم تطوير مدن ذكية ومستدامة وتقديم حلول معمارية فعالة تعزز جودة الحياة في المدينة المنورة وتواكب تطلعات المستقبل العمراني والبيئي للمملكة.

## الكلمات المفتاحية:

المظلات الذكية، المدينة المنورة، الفراغات العامة، التصميم التفاعلي، الاستدامة، التصميم الرقمي، المدن الذكية، التصميم البارامتري، إنترنت الأشياء، نمذجة معلومات البناء، المناخ الصحراوي.

**Abstract**

Al-Madinah Al-Munawwara is one of Saudi Arabia's rapidly expanding cities, with rapid urbanization due to its religious, tourism, and social landscape, This rapid development comes with significant climatic and environmental problems, especially in the context of its hot, dry desert climate and intensive seasonal and daily use of its public areas, While architectural canopies are essential to climatic protection and optimized usability of such space, current solutions remain lacking in environmental responsiveness and are often unharmonized in form, function, and sustainability.

The research aims to develop responsive canopy models attuned to the specific conditions of Al-Madinah through synthesis of environmental, functional, technological, and aesthetic priorities with the aid of advanced digital design tools, The study utilizes an integrated methodology comprising both theoretical analysis and experimental implementation. It utilizes parametric design, Building Information Modeling (BIM), and Internet of Things (IoT) technologies to create adaptive canopy systems capable of dynamic adjustment based on varying weather conditions and user interventions, and enhance visual and thermal comfort in public spaces.

The research also provides a critical examination of local, regional, and international smart canopy precedents and leverages such knowledge to develop two site-specific canopy models, one for linear pedestrian paths and the other for open urban areas, The models showcase the intersection of adaptive shading, solar power generation, and contextualism, while upholding the city's cultural and architectural heritage, The research also presents a guideline model for designers to develop and design interactive, sustainable smart canopies.

This study contributes to the realization of Saudi Vision 2030 by promoting the development of smart and sustainable cities and delivering effective architectural solutions that enhance public life quality in Al-Madinah and balance with urban and environmental demands of the future.

**Keywords:**

Smart canopies, Al-Madinah, public spaces, interactive design, sustainability, digital design, smart cities, parametric design, Internet of Things, Building Information Modeling, desert climate.

**مقدمة**

تواجه المدن المعاصرة تحديات متزايدة في ظل التغيرات المناخية المتسارعة والنمو الحضري المتواصل، مما يفرض ضرورة البحث عن حلول مبتكرة ومستدامة لتحسين جودة البيئة العمرانية، لا سيما في الفراغات العامة، وتُعد المظلات المعمارية إحدى أهم عناصر البنية التحتية الحضرية في المناطق ذات المناخ الحار والجاف، حيث تسهم في تهئية بيئة مريحة وظيفياً ومناخياً وتوفير مساحات مظلة للمشاة وتفعيل الاستخدامات المجتمعية في الهواء الطلق.

وفي هذا السياق تشكّل المدينة المنورة نموذجاً خاصاً يجمع بين القداسة الدينية والحساسية المناخية والتوسع العمراني المتسارع، إذ تعاني العديد من فراغاتها العامة من قلة العناصر المعمارية التظليلية التي تستجيب للبيئة المحلية أو تعزز الاستدامة، ما يستدعي تطوير حلول ذكية تراعي الخصوصية السياقية والمناخية والاجتماعية للمدينة.

يأتي هذا البحث استجابةً لهذه الحاجة عبر دراسة وتطوير مظلات معمارية تفاعلية تعتمد على تقنيات التصميم الرقمي وأنظمة الاستشعار والتحكم الذكي وتوظيف مصادر الطاقة المتجددة، ويهدف إلى تقديم نماذج تصميمية تدمج بين الجمال

الوظيفي والاستدامة البيئية والمرونة التشغيلية مما يساهم في تحسين نوعية الحياة في المدينة المنورة ويواكب توجهات المدن الذكية في المملكة العربية السعودية وفق رؤية 2030، وتقديم نموذج إرشادي للمصممين لتطوير وتصميم مظلات ذكية تفاعلية ومستدامة.

### مشكلة البحث

تتعاين المدينة المنورة بوصفها مدينة ذات مكانة دينية ومناخ صحراوي حار وجاف من قصور في تفعيل حلول مظللة مستدامة وذكية في فراغاتها العامة خاصة تلك التي تشهد كثافة سكانية وحركية عالية، إذ تفتقر العديد من هذه الفراغات إلى الهياكل القادرة على التكيف مع الظروف البيئية المتغيرة واحتياجات المستخدمين، مما يؤدي إلى تدني جودة الاستخدام اليومي وارتفاع استهلاك الطاقة وعدم كفاءة الأداء الحراري، كما أن معظم التصميمات المطبقة حالياً تفتقر إلى التكامل بين الشكل الجمالي والأداء الوظيفي والتقنيات الرقمية المتقدمة، من هنا تنبع الحاجة إلى تطوير مظلات تفاعلية مخصصة للبيئة المحلية في المدينة المنورة تجمع بين الاستجابة المناخية والفعالية التقنية والاستدامة البيئية والاجتماعية.

### أهداف البحث

- ابتكار نماذج تصميمية ذكية للمظلات تعتمد على تقنيات التصميم الرقمي التفاعلي، مثل التصميم البارامتري، إنترنت الأشياء (IoT)، ونمذجة معلومات البناء (BIM).
- توظيف تقنيات الطاقة المتجددة والأنظمة الذكية للاستجابة البيئية في تصميم المظلات بهدف تعزيز الاستدامة وتقليل الاعتماد على الطاقة التقليدية.
- تقديم حلول تصميمية قابلة للتنفيذ تراعي الخصوصية الثقافية والمعمارية للمدينة المنورة، وتساهم في تحسين جودة الحياة في الفراغات الحضرية المفتوحة.
- تقديم نموذج إرشادي يمكن المصممين من تطوير وتصميم مظلات ذكية تفاعلية ومستدامة.

### فرضيات البحث

يفترض البحث أن توظيف التقنيات الرقمية والذكية في العملية التصميمية مثل التصميم البارامتري وإنترنت الأشياء ونمذجة معلومات البناء يساهم في ابتكار مظلات ذكية تتفاعل مع المناخ واحتياجات المستخدم مما يحسن الأداء البيئي والوظيفي، كما يساهم التصميم القائم على معطيات السياق المحلي في تطوير حلول قابلة للتطبيق تعزز جودة الفراغات العامة.

### أهمية البحث

- يساهم هذا البحث في تقديم حلول تصميمية مبتكرة للفراغات العامة في المدينة المنورة من خلال تطوير مظلات معمارية ذكية تعتمد على تقنيات رقمية متقدمة مثل إنترنت الأشياء والتصميم البارامتري.
- الاستجابة للتحديات المناخية التي تواجه المدينة، كارتفاع درجات الحرارة عبر حلول تفاعلية توفر الراحة الحرارية وتقلل استهلاك الطاقة.
- تعزيز الاستدامة الحضرية بما يتماشى مع توجهات رؤية المملكة 2030 نحو مدن ذكية وصديقة للبيئة.
- توفير نماذج تصميمية قابلة للتطبيق في المناطق الحضرية والسياحية وتراعي الطابع العمراني والثقافي للمدينة المنورة.
- إثراء المعرفة الأكاديمية في مجالات التصميم الذكي للفراغات الحضرية في المناخات الحارة الجافة.

## منهجية البحث

يعتمد البحث على منهجية متعددة المراحل، تجمع بين التحليل النظري، الدراسة المقارنة، والتصميم الرقمي:

- **المرحلة الأولى:** مراجعة الأدبيات تتضمن تحليل النظريات المعاصرة حول التصميم التفاعلي والمظلات الذكية، ودراسة التجارب الدولية الناجحة ذات الصلة في بيئات مماثلة مناخياً.
- **المرحلة الثانية:** تحليل السياق المحلي دراسة الفراغات العامة في المدينة المنورة (مثل الساحات المحيطة بالمساجد، المنتزهات، مواقف الزوار) من حيث خصائص المناخ، السلوكيات البشرية، والاحتياجات الوظيفية.
- **المرحلة الثالثة:** تصميم نماذج مظلات ذكية مستدامة وتفاعلية تناسب الفراغات العامة بالمدينة المنورة باستخدام أدوات التصميم الرقمي وصياغة نموذج إرشادي للمصممين لتصميم مظلات ذكية تفاعلية ومستدامة.

## الدراسات السابقة

تمثل الدراسات السابقة أساساً علمياً لبناء هذا البحث حيث أبرزت اتجاهات تصميم المظلات الذكية والتكامل بين التقنية والبيئة لتحقيق الاستدامة، ومن خلال تحليلها تم استخلاص مؤشرات ومعايير تقييم الأداء إلى جانب الأدوات الرقمية المستخدمة، ويوضح الجدول التالي مقارنة تحليلية لأبرز هذه الدراسات لاكتشاف الفجوات المعرفية ودعم التصميمات المقترحة في سياق المدينة المنورة - جدول(1)

| الباحثون              | عنوان الدراسة                     | الهدف الرئيسي                                                                                          | التقنيات                                                     | أبرز النتائج                                                                                                                                  | الفجوات البحثية                                                                                                               |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Beesley et al. (2016) | Hybrid Sentient Canopy            | تصميم مظلة تفاعلية تعتمد على الاستشعار والتعلم الآلي لمحاكاة التفاعل الحي مع البيئة المحيطة            | أجهزة استشعار بيئية - تعلم آلي - برمجة تفاعلية               | توفر المظلة تظليلاً متغيراً ذاتياً استناداً إلى الظروف البيئية ويبرز النموذج قدرة الأنظمة الذكية على خلق بيئات تفاعلية شبيهة بالكائنات الحية. | لم تُختبر الفاعلية في بيئات ذات مناخ حار وجاف وتجاهلت الاعتبارات الثقافية والسياقية الخاصة بالمجتمعات الإسلامية.              |
| Zeng et al. (2025)    | Weather-responsive Smart Canopies | دراسة أثر العوامل الميكروبيئية على الأداء الحراري للمظلات الذكية في المدن ذات الكثافة السكانية العالية | خوارزميات تعلم آلي - أنظمة تظليل متحركة - تحليل بيانات بيئية | فعالية في تقليل استهلاك الطاقة وتحسين الراحة الحرارية عبر أنظمة ذكية تتفاعل باستمرار مع المناخ.                                               | لم يتم دمج عناصر الاستدامة الثقافية أو التصميم السياقي والتركيز محدود على الأداء الحراري فقط دون منظور جمالي أو وظيفي متكامل. |

|                                                   |                                         |                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                      |                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fortes et al. (2021)                              | Smart Tree Project                      | دمج تقنيات خضراء مع مظلات ذكية في الحرم الجامعي لتعزيز الاستدامة البيئية والجمالية          | تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - أنظمة طاقة شمسية - عناصر طبيعية | توازن بين الجمالية والتقنية وتقليل الانبعاثات وتعزيز الاستخدام الاجتماعي للمظلات.                                    | لم يُختبر في بيئات عالية الكثافة أو ذات طبيعة دينية كما أن التصميم ثابت وغير ديناميكي أو تفاعلي مع المستخدمين.                            |
| Stefańska & Rokicki (2022)                        | Structural Efficiency in Smart Canopies | تحسين التصميم الهيكلي للمظلات باستخدام أدوات تحليل رقمي متقدم للتقليل من الفاقد المادي      | التصميم الرقمي - التحليل الإنشائي - النمذجة البارامترية          | تقليل كبير في استهلاك المواد دون التأثير على الكفاءة الإنشائية مما يعزز مفهوم الاقتصاد الدائري.                      | لم تتناول الدراسة الجوانب الذكية أو التفاعلية أو المناخية وركزت على الكفاءة الهيكلية فقط دون دمج الأداء البيئي أو التكنولوجي.             |
| Sędzicki et al. (2023)                            | Canopy-integrated Air Quality Systems   | استخدام المظلات الذكية لتحسين جودة الهواء في المدن عبر دمج عناصر نباتية وأنظمة مراقبة بيئية | وحدات خضراء- أجهزة استشعار هواء- شبكات مراقبة بيئية              | تأثير إيجابي للمظلات في تقليل ملوثات الهواء وتحسين الراحة البيئية في الفراغات المفتوحة.                              | لم يُربط النظام الذكي بالتظليل أو الطاقة أو التصميم المعماري التفاعلي والغطاء النباتي يحتاج صيانة كبيرة وقد لا يكون مناسباً للمناخ الجاف. |
| Ertosun Yildiz & Yildiz (2025)                    | Façade Optimizati on in Hot Climates    | تحليل العلاقة بين التصميم الهيكلي والغطاف الخارجي في البيئات الحارة مثل المدينة المنورة     | تحليل الغلاف المناخي - المحاكاة الحرارية - تصميم استجابي         | ضرورة تصميم هياكل مظلية تأخذ بعين الاعتبار التوجيه الشمسي والتهوية لتحسين الأداء الحراري وتقليل الاعتماد على الطاقة. | لم تنطرق إلى الفراغات العامة أو المظلات كمكون حضري مستقل، والتركيز على المباني دون تضمين أنظمة ذكية أو عناصر تفاعلية.                     |
| جدول (1) مقارنة تحليلية للدراسات السابقة (الباحث) |                                         |                                                                                             |                                                                  |                                                                                                                      |                                                                                                                                           |

**الإطار النظري: تطوير مظلات معمارية ذكية ومستدامة وظيفياً وتفاعلياً**

يمثل الإطار النظري أحد الركائز الأساسية لأي بحث علمي حيث يوضح المفاهيم الأساسية والنظريات والمبادئ التي يستند إليها البحث ويقدم السياق الأكاديمي والتطبيقي للموضوع قيد الدراسة، وفي هذا البحث يتم التركيز على تطوير مظلات معمارية ذكية ومستدامة وظيفياً وتفاعلياً ويتناول الإطار النظري ثلاثة محاور رئيسية ترتبط ارتباطاً وثيقاً بأهداف البحث.

- **المحور التقني:** الذي يناقش الأنظمة الذكية والمواد المتقدمة المستخدمة في تصميم وتصنيع هذه المظلات مع التركيز على التقنيات الرقمية والنمذجة البارامترية وإنترنت الأشياء.
  - **المحور البيئي:** الذي يعالج مفاهيم الاستدامة والتفاعل المناخي وكيف يمكن للمظلات الذكية أن تسهم في تحسين جودة البيئة الحضرية من خلال استراتيجيات التكيف المناخي والتخفيف البيئي.
  - **المحور التصميمي:** الذي يستعرض الجوانب الجمالية واللغوية في التصميم مع أهمية التكامل السياقي للمظلات مع الفراغ الحضري المحيط، بما يعزز من القيمة الوظيفية والجمالية لهذه المنشآت.
- سيتم في هذا الإطار مراجعة وتحليل الدراسات الحديثة ذات الصلة ومراجعة شاملة للمراجع الأكاديمية المتخصصة بهدف تأسيس قاعدة معرفية قوية تدعم تطوير مفاهيم تصميمية وتقنية مبتكرة تلبي متطلبات المدن الذكية والمستدامة.

**المحور التقني: الأنظمة الذكية والمواد المتقدمة**

شكل المحور التقني أساساً في تطوير المظلات الذكية من خلال دمج التقنيات الرقمية والمواد المتقدمة لتعزيز الأداء التفاعلي والكفاءة البيئية، تعتمد الأنظمة الذكية على أجهزة استشعار تقيس الضوء والحرارة والرياح والرطوبة، متصلة بأنظمة تحكم تضبط حركة المظلة تلقائياً وفق البيانات الحية (Fortes S et al., 2021)، تسهم هذه الأنظمة في تحسين راحة المستخدم وتقليل استهلاك الطاقة عبر التظليل والتهوية التكيفية، كما تطيل عمر المظلة بالحماية الذاتية من الظروف القاسية (Sakhaei, 2020)، مما يجعلها عنصراً محورياً في تحقيق المرونة والفعالية البيئية وفيما يلي نستعرض أهمها.

- **تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) في التحكم الديناميكي:** تلعب تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) دوراً محورياً في التحكم الديناميكي للمظلات الذكية من خلال ربط الأجهزة الاستشعارية وأنظمة التحكم بواجهات المستخدم عبر الشبكات اللاسلكية، مما يتيح جمع البيانات البيئية وتحليلها واتخاذ قرارات تشغيلية تلقائية لتحسين الأداء، كما تتيح هذه التقنيات التحكم في المظلات عبر تطبيقات الهواتف أو الأنظمة السحابية مما يسمح بتخصيص الإعدادات وفقاً للتفضيلات أو الظروف المحيطة ويعزز كفاءة الموارد وتجربة المستخدم إضافة إلى الصيانة الاستباقية عبر رصد الأعطال (Zeng et al., 2025).

- **التصميم البارامترية ودوره في الابتكار الهندسي:** حيث يُعد التصميم البارامترية منهجاً متقدماً يعتمد على نماذج هندسية قابلة للتعديل وفق متغيرات متعددة مما يوفر مرونة في تكيف الهياكل المعمارية مع متطلبات المشروع والبيئة، ويُستخدم بفعالية في تصميم المظلات الذكية القادرة على التفاعل مع العوامل المناخية كالشمس والرياح والحرارة (Agkathidis & Brown, 2013)، ويتيح هذا النهج دمج معايير الجماليات، الأداء، والاستدامة، حيث يمكن تعديل التظليل أو الفتحات اعتماداً على بيانات حية من أنظمة استشعار ذكية مما يعزز راحة المستخدم وكفاءة الطاقة (Fortes S et al., 2021) كما يدعم التصنيع الرقمي الدقيق عبر ربط النماذج مباشرة بآلات القطع والطباعة، ما يقلل الهدر ويعزز الاستدامة والابتكار في الأشكال المعمارية المعقدة (Agkathidis & Brown, 2013).

– **المواد المتقدمة المعدنية (الفولاذ المقاوم للصدأ، الألمنيوم، السبائك الخفيفة):** حيث تلعب المواد المعدنية المتقدمة دورًا أساسيًا في تصميم المظلات الذكية إذ توفر مزيجًا من القوة الهيكلية والمرونة التصميمية ومقاومة العوامل الجوية، ويعد الفولاذ المقاوم للصدأ خيارًا شائعًا بفضل متانتته وثباته الطويل الأمد (Agkathidis & Brown, 2013)، بينما يُفضل الألمنيوم والسبائك الخفيفة لخفتها مما يسهل التركيب ويقلل الحمل الإنشائي (Fortes S et al., 2021)، كما تُعزز تقنيات المعالجة الحديثة استدامة هذه المواد وتقلل من الصيانة وتطيل عمرها الافتراضي بما يخدم مبادئ التصميم المستدام (Sakhaei, 2020).

– **تقنيات التصنيع الرقمي (الطباعة ثلاثية الأبعاد - القطع بالليزر):** حيث تشكل تقنيات التصنيع الرقمي مثل الطباعة ثلاثية الأبعاد والقطع بالليزر نقلة نوعية في إنتاج الهياكل المعدنية المعقدة للمظلات الذكية، إذ تمكّن من تنفيذ التصميمات البارامترية بدقة ومرونة وتعزز الابتكار في الأشكال المعمارية (Agkathidis & Brown, 2013)، كما تسهم في تقليل الوقت والجهد وخفض استهلاك المواد مما يدعم الاستدامة الاقتصادية والبيئية وبتيح تطوير مظلات عالية الأداء تجمع بين الكفاءة والجماليات مع تقليل الهدر (Sakhaei, 2020).

– **التكامل بين الأنظمة الذكية والمواد لتحقيق التكيف البيئي والوظيفي:** يُعد عنصرًا حاسمًا في تحقيق أداء وظيفي وبيئي متميز للمظلات المعمارية، حيث توفر المواد مثل الفولاذ المقاوم للصدأ والسبائك الخفيفة بنية مرنة ومتينة، في حين تتيح تقنيات إنترنت الأشياء وأجهزة الاستشعار استجابة ديناميكية للظروف المناخية من خلال وظائف مثل التحكم في الظل والحركة (Fortes-Rodríguez et al., 2021; Sakhaei, 2020)، ويعزز هذا الدمج من كفاءة الطاقة وراحة المستخدم ويدعم الاستدامة عبر تقليل الأثر البيئي وإطالة عمر الخدمة (Zeng et al., 2025).

– **التحديات التقنية والفرص المستقبلية:** رغم التقدم في الأنظمة الذكية تواجه المظلات الذكية تحديات تقنية تتعلق بكفاءة الأداء تحت الظروف المناخية القاسية وارتفاع تكاليف المواد والتقنيات، إلى جانب الحاجة إلى صيانة دقيقة لضمان الاستمرارية (Kantaş, 2024)، ومع ذلك توفر التطورات في الذكاء الاصطناعي والمواد الذكية والتصنيع الرقمي فرصًا لتجاوز هذه التحديات من خلال تطوير مظلات أكثر خفة ومرونة وكفاءة بيئية، قادرة على التكيف المناخي وتقليل تكاليف الصيانة بما يدعم الاستدامة الحضرية (Zeng et al., 2025; Kantaş, 2024).

### المحور البيئي: الاستدامة والتفاعل المناخي

يشكل البُعد البيئي أحد أهم المحاور في تصميم المظلات المعمارية الذكية، حيث تسعى هذه التصميمات إلى تحقيق توازن بين حماية المستخدمين من الظروف المناخية القاسية والحفاظ على الموارد الطبيعية وتقليل الأثر البيئي، يركز هذا المحور على دمج استراتيجيات استدامة متقدمة وتوظيف تقنيات تفاعلية تساهم في تحسين أداء المظلات من خلال ما يلي:

– **الاستدامة في اختيار المواد والعمليات:** وتعتمد الاستدامة في تصميم المظلات الذكية بشكل أساسي على اختيار مواد صديقة للبيئة تتميز بفعالية استخدام الطاقة وقابلية إعادة التدوير وطول عمر الخدمة، ويشير Agkathidis و Brown (2013) إلى أهمية استخدام المعادن عالية الجودة مثل الألمنيوم والفولاذ المقاوم للصدأ التي تقلل الحاجة إلى الصيانة والتبديل المتكرر مما يحد من استهلاك الموارد ويقلل من النفايات، كما يمكن معالجة الأسطح بطلاءات ذكية تقلل من امتصاص الحرارة وتعزز من كفاءة التبريد الطبيعي مما يساهم في خفض الطلب على الطاقة (Roshan Kharrat, 2024).

– **التفاعل المناخي وتحسين الراحة الحرارية:** حيث تتميز المظلات الذكية بقدرتها على التكيف مع الظروف المناخية من خلال أنظمة تحكم تعدل شكلها ووضعيتها تلقائيًا ما يحقق تظليلًا متغيرًا يوازن بين الحماية من الشمس والاستفادة من الضوء الطبيعي، ويحسن راحة المستخدم ويقلل التبريد الاصطناعي (Sakhaei, 2020)، كما تسهم تقنيات الذكاء الاصطناعي وخوارزميات التحكم البيئي في تحسين المناخ الحراري للفراغات الخارجية والحد من تأثير جزيرة الحرارة الحضرية مما يعزز الصحة والسلامة البيئية (Zeng et al., 2025).

– **استراتيجيات التصميم البيئي (التظليل الديناميكي- التهوية الطبيعية - توليد الطاقة المتجددة):** ويعد التظليل الديناميكي من أبرز وسائل تقليل سخونة الضوء الزائد عبر تعديل زوايا المظلات أو فتحها وغلقها وفق الحاجة (Fortes S et al., 2021)، وتسهم التهوية الطبيعية في خفض درجات الحرارة دون أنظمة ميكانيكية، فيما يتيح دمج الألواح الشمسية توليد طاقة متجددة تدعم استدامة المظلات كمصدر طاقة ذاتي (Zeng et al., 2025)، وتُعد المظلات الذكية منصة مثالية لتكامل الألواح الكهروضوئية حيث يوضح Roshan Kharrat (2024) إمكانية دمجها في الهيكل لتوليد طاقة لتشغيل الأنظمة الذكية وتقليل الاعتماد على الشبكة الكهربائية.

– **تقييم الأثر البيئي ودورة الحياة للمواد والأنظمة:** ويعد خطوة أساسية لضمان استدامة المظلات الذكية حيث يُحلل الأثر البيئي من استخراج المواد حتى إعادة التدوير (Nejur, 2023)، وتستخدم مواد متينة كالفولاذ المقاوم للصدأ والألمنيوم لتقليل الاستبدال وتقليل الأثر البيئي (Kantaş, 2024)، رغم أن التصنيع الرقمي قد يتطلب طاقة عالية مما يستلزم الاعتماد على مصادر متجددة (Roshan Kharrat, 2024)، وتسهم الأنظمة الذكية في خفض استهلاك الطاقة من خلال التحكم التفاعلي وتوليد الطاقة الشمسية مما يدعم التصميم المستدام (He et al., 2025; Zeng et al., 2025).

– **التوافق مع المفاهيم العمرانية المستدامة:** يتطلب تصميم المظلات الذكية التوافق مع المبادئ العمرانية المستدامة التي توازن بين الأبعاد البيئية والاجتماعية والاقتصادية عبر تعزيز الكفاءة الطاقية واستخدام الموارد المتجددة (Fortes S et al., 2021)، وتسهم هذه المظلات في تقليل استهلاك الطاقة وتحسين الراحة الحرارية من خلال التظليل الديناميكي والتكيف المناخي (Sakhaei, 2020)، كما يتيح تصميمها المرن واستخدام المواد المستدامة دورًا وظيفيًا وجماليًا في البيئة الحضرية (Agkathidis & Brown, 2013)، ويتطلب تحقيق هذا التوافق دراسة السياق البيئي والاجتماعي لضمان تنمية مستدامة للأجيال الحالية والمستقبلية (Zeng et al., 2025).

– **التحديات والفرص البيئية المستقبلية:** تواجه المظلات الذكية تحديات في التكيف مع التغيرات المناخية والظروف الجوية القاسية، مما قد يؤثر على أدائها الطويل خاصة فيما يتعلق بمقاومة التآكل والحاجة إلى أنظمة تحكم دقيقة (He et al., 2025)، ومع ذلك تتيح الابتكارات في المواد الذكية والذكاء الاصطناعي تطوير مظلات أكثر مرونة واستدامة وقادرة على التكيف البيئي وتقليل الأثر السلبي مما يسهم في تحسين جودة الحياة في الفراغات الحضرية (He et al., 2025; Fortes-Rodríguez et al., 2021).

**المحور التصميمي: اللغة الجمالية والتكامل مع الفراغ الحضري**

يُعتبر المحور التصميمي من الجوانب الأساسية في تطوير المظلات المعمارية الذكية حيث يجمع بين الجماليات والتكامل الفعّال مع الفراغ الحضري، ويهدف التصميم إلى خلق توازن بين الشكل والوظيفة بحيث تعكس المظلات هوية المكان وتلبي احتياجات المستخدمين مع تعزيز التجربة البصرية والبيئية، كما يسعى التصميم إلى تحقيق انسجام معماري مع المحيط العمراني مع التركيز على التعبير الثقافي والارتقاء بالوظائف التفاعلية التي تجعل المظلات عناصر فاعلة وحيوية في الفراغات العامة من خلال مايلي :

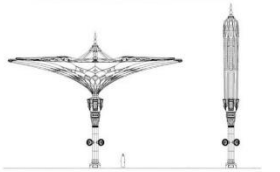
- **الجماليات في تصميم المظلات المعمارية الذكية:** والتي تُعد عنصرًا أساسيًا في تصميم المظلات الذكية، حيث تتجاوز وظيفتها المناخية لتُثري الفراغ الحضري وتعزز التجربة البصرية من خلال التوازن بين الشكل والوظيفة والتعبير عن هوية المكان، ويتيح التصميم البارامتري أشكالًا مبتكرة تُحقق تناغمًا بين الجمال والدقة الإنشائية (Agkathidis & Brown, 2013).
- **التكامل السياقي والارتباط بالبيئة العمرانية:** حيث يُعد التكامل السياقي مع البيئة العمرانية ضروريًا إذ ينبغي أن تنسجم المظلات مع المحيط من حيث المواد والأشكال وتدعم الأنشطة المجتمعية، كما في تجربة "Smart Tree" بالبحر الجامعي الذكي (Fortes S et al., 2021).
- **تعزيز التفاعل الحسي والوظيفي:** عبر الأنظمة الحركية التي تضبط الظل والإضاءة حسب الظروف المناخية واحتياجات المستخدم مما يزيد من الراحة وكفاءة الطاقة ويجعل المظلة عنصراً ديناميكياً يتفاعل مع الإنسان والبيئة (Sakhaei, 2020).
- **التعبير عن الهوية الثقافية والمعمارية:** تشكل المظلات المعمارية وسيلة لتجسيد الهوية الثقافية والمعمارية من خلال استخدام مواد وتصاميم تعكس التراث المحلي أو تدمج ملامح حديثة مما يعزز الانتماء والقبول المجتمعي ويخلق توازناً بين الحداثة والحفاظ على التراث (Roshan Kharrat, 2024).
- **دور التصميم في تحقيق الاستدامة الاجتماعية والبيئية:** يرتبط التصميم أيضاً بالاستدامة البيئية والاجتماعية حيث تسهم المظلات التي توفر الراحة والظل باستخدام مواد مستدامة وأنظمة ذكية في تقليل البصمة الكربونية وتحسين جودة البيئة الحرارية (Zeng et al., 2025).
- **التحديات التصميمية والفرص المستقبلية:** تواجه التصميم المعماري للمظلات الذكية تحديات في تحقيق توازن بين الجماليات والوظيفة وضمان التكيف مع التغيرات المناخية مع ضرورة دمج تقنيات مثل التصميم البارامتري وإنترنت الأشياء بشكل متقن ومراعاة التنوع الثقافي والاجتماعي (Smith & Jones, 2020; Lee et al., 2021)، كما يتطلب تجاوز قيود التكلفة والصيانة تطوير حلول مبتكرة تحقق كفاءة الأداء واستدامة طويلة الأمد (Kumar & Patel, 2019).

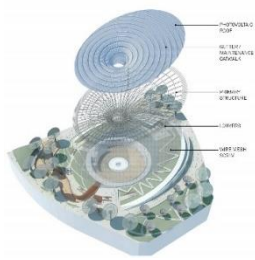
**الإطار التحليلي : نماذج من مظلات ذكية تم تنفيذها أو مقترحة، وتحليل أدائها**

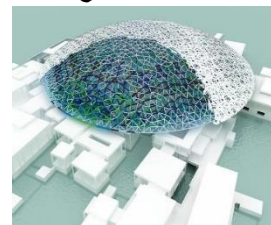
يمثل الإطار التحليلي جزءاً محورياً من هذا البحث حيث يسعى إلى دراسة عدد من النماذج العالمية والإقليمية والمحلية لمظلات معمارية ذكية، سواء تلك التي تم تنفيذها فعلياً أو النماذج المقترحة من خلال المشاريع البحثية والممارسات المعمارية، وتم تحليل هذه النماذج وفق ثلاثة محاور رئيسية ( الجانب التقني- الجانب البيئي- الجانب التصميمي)، بهدف استخلاص مؤشرات تصميمية وتقنية يمكن توظيفها في تطوير نماذج ملائمة للفراغات العامة في المدينة المنورة.

## نماذج مظلات ذكية تم تنفيذها

يُقدم الجدول التالي تحليلاً تفصيلياً لأبرز نماذج المظلات الذكية التي تم تنفيذها فعلياً في مشاريع معمارية بارزة حول العالم، يركز التحليل على تقييم الفعالية التقنية لكل نموذج من حيث الأنظمة الذكية المستخدمة، والكفاءة البيئية من خلال استخدام المواد والتقنيات المستدامة، إضافة إلى الجوانب التصميمية التي تجمع بين الجمال والوظيفة، يهدف الجدول إلى إبراز أفضل الممارسات العملية التي حققت نجاحاً في تطوير مظلات معمارية ذكية ومستدامة - جدول (2).

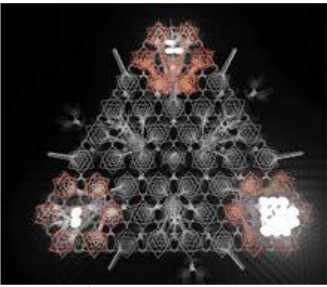
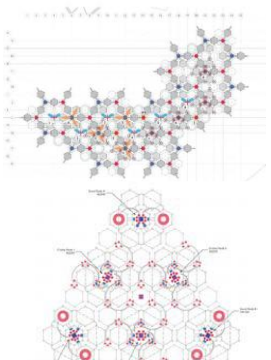
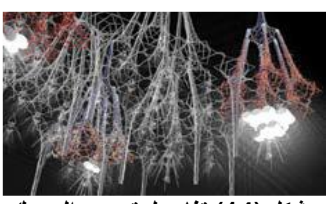
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | مظلات المسجد النبوي - المدينة المنورة                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>التحليل التقني</b></p>  <p>شكل (1) مظلة المسجد النبوي</p> <p><a href="https://www.pinterest.com/pin/488429522107470022/">https://www.pinterest.com/pin/488429522107470022/</a></p> <p>(Accessed 01/06/2025)</p>          | <p>تعتمد مظلات المسجد النبوي على نظام تشغيل هيدروليكي متقدم مدعوم بحساسات مناخية ذكية (مثل حساسات الضوء والرياح والحرارة)، مما يتيح تشغيلاً أوتوماتيكياً يتفاعل مع التغيرات البيئية بدقة وكفاءة، وتتميز المظلات بأنها قادرة على الفتح والإغلاق خلال دقائق وتغطي مساحات واسعة دون الحاجة لتدخل بشري مباشر، ما يعكس دمجاً ناجحاً بين الأنظمة الذكية والبنية المتحركة في البيئات الدينية المكتظة.</p>                                                                                                                                  |
| <p><b>التحليل البيئي</b></p>  <p>شكل (2) الواجهة أثناء فتح وغلق المظلة</p> <p><a href="https://www.akhbaar24.com/article/detail/442563">https://www.akhbaar24.com/article/detail/442563</a></p> <p>(Accessed 01/06/2025)</p> | <p>تُسهّم المظلات في خفض درجات الحرارة المحيطة بنحو 10:8 درجات مئوية من خلال توفير تظليل واسع وفعال محسوبة للهواء، مما يحسن من جودة البيئة الحرارية ويقلل تأثير الإشعاع الشمسي المباشر، إضافة إلى ذلك تُسهّم في تقليل الحاجة لاستخدام أنظمة تبريد اصطناعية في الساحات الخارجية، بما ينسجم مع مبادئ الاستدامة البيئية في المناطق المناخية القاسية كمنطقة المدينة المنورة.</p>                                                                                                                                                        |
| <p><b>التحليل التصميمي</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <p>يعتمد التصميم الجمالي للمظلات على اللغة المعمارية الإسلامية من خلال أنماط الأرابيسك والزخارف الهندسية المدمجة في الهياكل المعدنية والنسيج السقفي، مما يعزز الطابع الروحي ويؤكد على الهوية الثقافية للمكان، كما أن توحيد اللون والشكل وتوزيعها المحوري داخل الساحات يحقق تكاملاً بصرياً مع قباب المسجد والمآذن في انسجام معماري دقيق بين التراث والحداثة.</p>                                                                                                                                                                     |
| المرجع                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | (Beesley et al., 2016)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | مظلات Expo 2020 – The Sustainability Pavilion - دبي                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <p><b>التحليل التقني</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <p>تتميز مظلات جناح الاستدامة بتقنية متطورة تعتمد على أنظمة تتبع شمسي ديناميكية، حيث تتوزع ألواح شمسية دائرية على أذرع متحركة تشبه "الألواح الزهرية" القابلة للدوران، تم تزويد هذه الألواح بأنظمة محوسبة وكابلات ذكية قادرة على توجيه الألواح تلقائياً بحسب حركة الشمس طوال اليوم، مما يضاعف من كفاءة توليد الطاقة، الهيكل الداعم للمظلات صُمم باستخدام مواد خفيفة وقوية تسمح بالتحرك المرن وتقلل من استهلاك الموارد، كما أن تكامل الأنظمة الرقمية والهيدروليكية يعكس توظيفاً دقيقاً للتقنيات الذكية في المجال المعماري البيئي.</p> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  <p>شكل (3) مظلات جناح الإستدامة</p>                                                                                                                                                                 | <p><b>التحليل البيئي</b></p> <p>يُعد التصميم البيئي لجناح الاستدامة أحد أبرز إنجازات إكسبو 2020، إذ صُممت المظلات لتعمل كمصدر لتوليد الطاقة النظيفة باستخدام الألواح الشمسية عالية الكفاءة، مما يساهم في تحقيق الاكتفاء الذاتي للطاقي للجناح، إضافة إلى ذلك، فإن المظلات توفر تظليلاً واسعاً يقلل من امتصاص الحرارة ويخفف الحاجة إلى أجهزة التكييف، وهو ما يساهم في خفض استهلاك الطاقة بنسبة كبيرة، كما أن توزيع النباتات والمواد الطبيعية أسفل المظلات يعزز التهوية الطبيعية، ويخلق مناخاً محلياً مريحاً ضمن بيئة صحراوية، محققاً بذلك أهداف التصميم المناخي المستدام.</p>                                                                                                                                                                                      |  |
|  <p>شكل (4) قطاع في سقف الجناح</p>  <p>شكل (5) تفاصيل تصميم السقف</p>                                              | <p><b>التحليل التصميمي</b></p> <p>من الناحية التصميمية، يستلهم شكل المظلات من شجرة النخيل، بوصفها رمزاً بيئياً وثقافياً عميق الارتباط بالهوية المحلية لدولة الإمارات، وقد تم تجسيد ذلك من خلال إنشاء مظلات ضخمة تشبه أوراق النخيل في انتشارها وشكلها العضوي، ما يمنح الجناح طابعاً بصرياً فريداً يجمع بين الحداثة والانتماء المكاني، التصميم يتبنى فلسفة البيوفيليا (Biophilia)، التي تدمج الطبيعة في الحلول المعمارية، فالشكل لا يعبر فقط عن جمالية محلية، بل يعمل أيضاً كوسيط بين التكنولوجيا والبيئة، كذلك، فإن التكوين الشعاعي للمظلات يعزز التوجه الرمزي نحو الشمس والاستدامة، ويمنح الزوار تجربة معمارية حسية ومتفاعلة مع المناخ والضوء.</p>                                                                                                               |  |
| <p><a href="https://amazingarchitecture.com/pavilion/terra-the-sustainability-pavilion-expo-2020-dubai-designed-by-grimshaw/">https://amazingarchitecture.com/pavilion/terra-the-sustainability-pavilion-expo-2020-dubai-designed-by-grimshaw/</a> (Accessed 10/06/2025)</p>          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
| <p><b>مظلة مركز تسوق ION Orchard Mall - سنغافورة</b></p>                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|  <p>شكل (6) سقف ومظلة مركز التسوق بسنغافورة</p>  <p>شكل (7) الأعمدة التي تحمل المظلة لمركز التسوق بسنغافورة</p> | <p><b>التحليل التقني</b></p> <p>تمثل المظلة إنجازاً هندسياً فريداً كونها أول هيكل أحادي الجسم (Monocoque) في سنغافورة، مما سمح بتحقيق تصميم منحنى حر معقد، اعتمد بناؤها على تقنيات نمذجة ثلاثية الأبعاد متقدمة واستخدام مواد كالزجاج المزدوج والمعدن مع التغلب على تحديات تقنية دقيقة في التصنيع، كما تدمج المظلة تقنيات رقمية متطورة عبر واجهتها الإعلامية (LED Media Façade) التي تحولها إلى شاشة عرض ديناميكية مما يبرز الابتكار التقني في التصميم والوظيفة.</p> <p><b>التحليل البيئي</b></p> <p>تُعد المظلة حلاً مناخياً متكاملاً حيث توفر حماية فعالة للمشاة من شمس سنغافورة الحارقة وأمطارها الغزيرة مما يعزز الراحة الحرارية ويسمح بدخول الضوء الطبيعي بذكاء، ويساهم تصميمها الزجاجي المزدوج والأسطح الخضراء المدمجة في تقليل امتصاص الحرارة واستهلاك</p> |  |

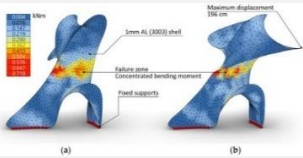
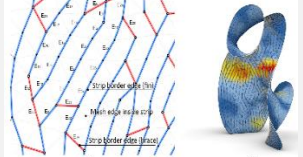
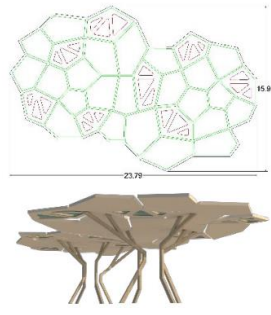
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
|  <p>شكل (8) التصميم الحر للمظلة</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <p>الطاقة الكلي للمبنى مع إمكانية جمع مياه الأمطار مما يعكس التزاماً بالاستدامة البيئية والتكيف مع المناخ الاستوائي.</p> <p>تتميز المظلة بتصميم جمالي فريد مستوحى من الطبيعة يعكس تاريخ المنطقة ويمنح المبنى هوية بصرية مميزة بأشكالها المنحنية السلسة، ولا يقتصر دورها على توفير الظل فقط بل تخلق تجربة مكانية جاذبة ومريحة للمشاة معززة التفاعل مع الفراغ العام، وبفضل واجهتها الإعلامية الديناميكية تتحول المظلة ليلاً إلى أيقونة بصرية تبرز الابتكار المعماري وتجذب الأنظار مما يجعلها علامة فارقة في المشهد الحضري بسنغافورة.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <p><b>التحليل<br/>التصميمي</b></p> |
| <p><a href="https://archello.com/project/ion-orchard">https://archello.com/project/ion-orchard</a> (Accessed 15/06/2025)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <p><b>المرجع</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <p><b>4</b></p>                    |
| <p><b>مظلة حديقة متحف اللوفر Louvre Museum - أبو ظبي</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <p><b>التحليل<br/>التقني</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <p><b>4</b></p>                    |
|  <p>شكل (9) مظلة حديقة متحف اللوفر</p>   <p>شكل (10) تداخل الوحدات الهندسية من الخارج والداخل</p>  <p>شكل (11) الهيكل الإنشائي للمظلة</p> | <p>تعتمد مظلة متحف اللوفر أبوظبي على هيكل هندسي معقد يتكون من 8 طبقات معدنية متداخلة تشكل قبة ضخمة قطرها 180 متراً، صُممت القبة باستخدام تقنية النمذجة الرقمية المتقدمة، حيث تتشابك وحدات هندسية (نجوم ثمانية) تتكرر بزوايا مختلفة، مما يسمح بتشكيل فراغات موزونة تتيح للضوء بالمرور بطريقة مدروسة، الهيكل مدعوم بأعمدة خفية ما يمنح الزائر شعوراً بأن القبة "تطفو" فوق المبنى، ما يتطلب دقة هندسية عالية في توزيع الأحمال والتوازن الإنشائي.</p> <p>تُعد القبة مظلة بيئية في جوهرها إذ تعمل كمرشح طبيعي للضوء والحرارة، وتُعرف ظاهرة الضوء المار من خلالها باسم (مطر الضوء Rain of Light)، وهي نتيجة تداخل الوحدات الهندسية في القبة بطريقة تسمح لأشعة الشمس بالمرور بشكل متناثر ومُريح بصرياً، هذا التصميم يقلل بشكل كبير من الحاجة إلى التكييف والإنارة الصناعية خلال النهار مما يجعلها عنصر تظليل واستدامة فعال ضمن مناخ أبوظبي الصحراوي، كما تعمل على حماية الزوار من الشمس دون إغلاق الفراغ بصرياً ما يعزز الانفتاح والتكامل مع البيئة</p> | <p><b>التحليل<br/>البيئي</b></p>   |
| <p><a href="https://architizer.com/blog/practice/details/louvre-abu-dhabi-dome/">https://architizer.com/blog/practice/details/louvre-abu-dhabi-dome/</a> (Accessed 15/06/2025)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <p>استُوحى الشكل العام للمظلة من العمارة العربية التقليدية ولا سيما استخدام "المشربية" كعنصر يسمح بتصفية الضوء والهواء كما أن النمط النجمي المتكرر في القبة يستحضر الزخارف الإسلامية الهندسية في المساجد والأسواق القديمة مما يمنح المبنى هوية بصرية محلية بِنَفَسٍ عالمي، القبة لا تظلل فقط بل تُشكل تجربة حسية كاملة حيث يمتزج الضوء بالظل والصلاية بالفراغ وتتحول المظلة إلى رمز معماري يمثل الجسر الثقافي بين الشرق والغرب وهو ما يعكس فلسفة المتحف بحد ذاته.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <p><b>التحليل<br/>التصميمي</b></p> |
| <p><b>المرجع</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <p><b>المرجع</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <p><b>المرجع</b></p>               |
| <p><b>جدول (2) النماذج المنفذة من المظلات الذكية (الباحث)</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                    |

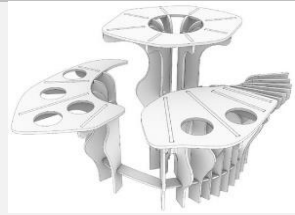
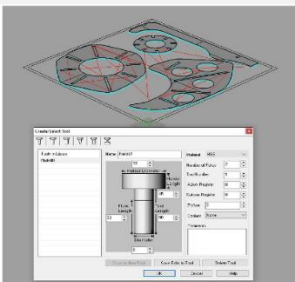
## نماذج مظلات ذكية في مراحل التصميم

يعرض الجدول التالي مجموعة من النماذج التي لا تزال في مراحل التصميم والتطوير لمظلات ذكية مستدامة مع التركيز على الابتكارات التقنية والبيئية الحديثة، ويتناول التحليل إمكانية دمج تقنيات إنترنت الأشياء والأنظمة الذكية المتطورة إلى جانب المواد المستدامة والتصاميم المعاصرة التي تتماشى مع متطلبات البيئات الحضرية الحديثة، يوفر الجدول منظراً استشرافياً يساعد الباحثين والمصممين على استكشاف فرص تحسين الأداء البيئي والتقني للمظلات الذكية قبل تنفيذها عملياً.

| Canopy – Hybrid Sentient<br>مظلة تفاعلية                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
|  <p>شكل (12) نموذج ثلاثي الأبعاد للمظلة</p>  <p>شكل (13) المسقط الأفقي للمظلة</p>  <p>شكل (14) تفاصيل تصميم المحرك الاهتزازي وتجميع المستشعر</p> | <p>يعتمد مشروع "Hybrid Sentient Canopy" على دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مع الأنظمة الحسية والاستجابية لإنشاء مظلة "شبه واعية" تتفاعل مع محيطها، يقوم النظام على شبكة من الحساسات (مثل أجهزة قياس الضوء، ومستشعرات الصوت والحركة، والحرارة) المرتبطة بوحدات معالجة موزعة تعمل وفق خوارزمية تعتمد على التعلم بالفضول (Curiosity-based learning)، هذه الخوارزمية تتيح للهيكل تجربة سلوكيات جديدة وتحليل نتائجها وتعديلها تدريجياً لتحقيق استجابات أكثر دقة للمثيرات البيئية، تشمل البنية التحتية كذلك محركات صغيرة (actuators) لتحريك الأجزاء وأنظمة إنارة قابلة للتعديل ومكبرات صوت تتفاعل مع المستخدمين.</p> | <p><b>التحليل التقني</b></p> |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <p>يركز التصميم على التفاعل الديناميكي مع البيئة المحيطة حيث تستجيب المظلة للضوء الطبيعي والحرارة وحركة الأجسام عبر تقنيات الاستشعار المتقدمة، مما يتيح لها ضبط مستوى الظل والتهوية والإضاءة تبعاً للظروف البيئية، ويساعد هذا النظام التفاعلي على تحسين الراحة الحرارية والبصرية للمستخدمين دون الحاجة إلى تقنيات تقليدية كثيفة الاستهلاك للطاقة، كما أن المظلة تُصمم بطريقة معيارية مما يجعل من السهل تكيفها مع مواقع</p>                                                                                                                                                                                  | <p><b>التحليل البيئي</b></p> |

|                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|                                                                                                                        | مختلفة وظروف مناخية متباينة ويعزز من قابليتها للتطبيق كمظلة مستدامة قابلة للتوسع.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |        |
|                                                                                                                        | <p><b>التحليل التصميمي</b></p> <p>يتبنى المشروع لغة تصميمية عضوية مستوحاة من الطبيعة إذ يتكون الهيكل من شبكة وحدات خفيفة الوزن تشبه الكائنات الحية في طريقة حركتها واستجابتها، لا يهدف التصميم فقط إلى الجمال الشكلي بل إلى تجربة حسية وتفاعلية كاملة، فالضوء يتخلل الفراغات والمظلة تتحرك وتضيء وتصدر أصواتاً وفقاً لتفاعل المستخدم، هذا يخلق إحساساً بأن المظلة "حية" وواعية بوجود المستخدم مما يحولها إلى عنصر معماري ذكي يدمج بين الفن والتكنولوجيا، كما يرسخ المشروع فكرة العمارة التكيفية الحسية (Responsive Architecture) التي تتغير باستمرار لتواكب محيطها وتخدم مستخدمها بطريقة غير تقليدية.</p> |        |
|                                                                                                                        | Beesley, P. (2016)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | المرجع |
|                                                                                                                        | Smart Tree مظلة الحرم الجامعي الذكي                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 2      |
|                                      | <p><b>التحليل التقني</b></p> <p>تُعد مظلة "الشجرة الذكية" محوراً تكنولوجياً بفضل دمجها المكثف لتكنولوجيا المعلومات والاتصالات (ICT) وتتضمن أنظمة متقدمة من المستشعرات لجمع البيانات البيئية، وتوفر خيارات اتصال مثل شبكة Wi-Fi إلى جانب الإضاءة الذكية ونقاط الشحن، ويكمن التحدي التقني في تكامل هذه المكونات المتنوعة لإنشاء نظام مترابط يخدم وظائف متعددة بكفاءة.</p>                                                                                                                                                                                                                                   |        |
|  <p>شكل (15) مظلة الحرم الجامعي</p> | <p><b>التحليل البيئي</b></p> <p>تركز "الشجرة الذكية" ببنياً على تعزيز الاستدامة وتقليل الأثر البيئي السلبي من خلال دمج العناصر الخضراء لتحسين جودة الهواء بامتصاص الملوثات وتوليد الأكسجين، كما أنها تهدف إلى توفير الظل الفعال مما يساهم في تخفيف "تأثير الجزر الحرارية الحضرية" وتحسين الراحة الحرارية للمستخدمين وبالتالي تقليل استهلاك الطاقة في تبريد المباني المحيطة.</p>                                                                                                                                                                                                                           |        |
|  <p>شكل (16) وحدات السقف للمظلة</p> | <p><b>التحليل التصميمي</b></p> <p>من الناحية التصميمية تمثل "الشجرة الذكية" نهجاً متعدد التخصصات يجمع بين العمارة والتخضير وتكنولوجيا المعلومات والاتصالات لخلق بنية متكاملة، حيث يسعى التصميم إلى تحقيق قيم جمالية وظيفية تتناسب مع البيئة الحضرية، ويستلهم الأشكال الطبيعية (كالشجرة) لتعزيز الانسجام البصري، الهدف هو توفير مساحة جذابة ومريحة وقابلة للتكيف مع ضمان سهولة التفاعل للمستخدمين.</p>                                                                                                                                                                                                     |        |

|                                                                                                                                                                                                              | (Fortes et al., 2021)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | المرجع                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Architectural Folding Structures – مظلات قابلة للطي</b>                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>3</b>                       |
|                                                                                                                             | <p>يوظف النموذج تقنيات تصميم رقمية متقدمة مدعومة بمحاكاة فيزيائية باستخدام أدوات مثل Kangaroo لتحليل القوى وشكل الطي، يتيح ذلك إنتاج مظلات عالية الدقة قابلة للتصنيع عبر تقنيات رقمية مثل القص بالليزر والطباعة ثلاثية الأبعاد، مع إمكانية تطويرها مستقبلاً لتتضمن حساسات بيئية أو أنظمة استجابة ذكية للحركة والضوء مما يمنحها قابلية للتحويل إلى مظلة تفاعلية بالكامل.</p>                                                      | <p><b>التحليل التقني</b></p>   |
| <p><b>شكل (17) مظلات قابلة للطي</b></p>   | <p>يتميز النموذج بكفاءة مادية عالية بفضل تقنيات الطي مما يسمح بتحقيق الصلابة الإنشائية باستخدام كميات قليلة من المواد، كما أن وحداته خفيفة الوزن وسهلة النقل والتجميع مما يقلل الأثر الكربوني الناتج عن التركيب، إضافةً إلى ذلك يساهم شكل السطح المطوي في تعزيز التهوية الطبيعية وتوليد الظلال بطريقة ديناميكية دون الحاجة إلى أنظمة ميكانيكية معقدة ما يجعله مثلاً على الدمج الفعال بين التصميم الجمالي والاستدامة البيئية.</p> | <p><b>التحليل البيئي</b></p>   |
| <p><b>شكل (18) محاكاة الأداء البيئي</b></p>                                                                               | <p>يعتمد التصميم المعماري في هذا النموذج على مبدأ الطي الإنشائي الذي يتيح تشكيل هياكل خفيفة الوزن بأسطح منحنية وديناميكية دون الحاجة إلى دعائم تقليدية، يتيح هذا النهج توليد فراغات مرنة ذات تعبير بصري مميز يعكس روح الحداثة والانسيابية، كما أن الطبيعة الفردية للنموذج تسهل إعادة التكوين حسب احتياجات الموقع، مما يجعله ملائماً للتطبيق في فراغات متنوعة كالأسواق والمماشي.</p>                                              | <p><b>التحليل التصميمي</b></p> |
|                                                                                                                                                                                                              | (Nejur, 2023)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | المرجع                         |
| <b>Kinetic Canopy with Legacy Preservation – مظلات متحركة</b>                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>4</b>                       |
|  <p><b>شكل (19) المسقط والواجهة لمظلة متحركة</b></p>                                                                      | <p>النموذج يعتمد على تصميم خوارزمي باستخدام أدوات رقمية مثل Rhino - Grasshopper ، ويتضمن آليات حركة ذكية باستخدام محركات مدمجة داخل الأعمدة التي تشبه جذوع الأشجار، وتستجيب المظلة لحركة الركاب في محطة القطار عبر مستشعرات تحفز فتح البتلات بحركة تموجية، ما يخلق تفاعلاً مباشراً بين الشكل المعماري والمستخدمين، كما صُممت مفصلات الحركة بمرونة عالية عبر عقد مركزية مرتبطة بمحاور قابلة للدوران.</p>                          | <p><b>التحليل التقني</b></p>   |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>شكل (20) النموذج المادي للمظلة</p>  <p>شكل (21) تصور ثلاثي الأبعاد</p>                                                                                             | <p><b>التحليل البيئي</b></p> <p>يقدم التصميم استجابة مناخية غير مباشرة تعتمد على التحكم في التظليل وتوجيه الحركة الهوائية عبر الفراغات المفتوحة بين الطبقات، تم استخدام مواد خفيفة ومرنة في النموذج الأولي (مثل الورق المقوى والأشرطة المطاطية)، مما يُشير إلى إمكانية تنفيذ النموذج فعلياً بمواد مستدامة خفيفة مثل الألمنيوم والبوليكربونات الشفاف، كما يخلق النظام توازناً بين الإضاءة الطبيعية والتظليل مستفيداً من الشكل المعماري لاستخدام الضوء كعنصر تفاعلي.</p> <p><b>التحليل التصميمي</b></p> <p>يتبنى التصميم لغة عضوية مستلهمة من الطبيعة تحديداً من أشكال نبات البامبو والأنظمة الهيكلية الشجرية لخلق قشرة معمارية تفاعلية ثلاثية الطبقات، ويعتمد النموذج على تقسيم هندسي دقيق باستخدام هندسة فورونوي (Voronoi Geometry) ما ينتج عنه فراغ ديناميكي يتفاعل بصرياً ووظيفياً مع المستخدم، والقبة مكونة من بتلتين (Petals) تعملان في تناغم لتوجيه الحركة وتنظيم الظل.</p> <p><b>المرجع</b></p> <p>(Sakhaei, 2020)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p><b>5 Computer-Aided Greenery Design – مظلات خضراء ذكية</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|   <p>شكل (22) تصميم مظلات خضراء ذكية</p>  <p>شكل (23) النموذج المصغر للمظلة</p> | <p><b>التحليل التقني</b></p> <p>اعتمد التصميم على أدوات رقمية متقدمة مثل Rhinoceros®، Ladybug®، Grasshopper® لدمج المعطيات البيئية مع تصميم الهيكل وتحديد مواقع النباتات باستخدام خوارزميات أوتوماتيكية، كما تم تنفيذ الهيكل باستخدام تقنيات التصنيع الرقمي لتقليل الهدر وتحقيق الدقة في القطع والتجميع، وتم اختيار الخشب الرقائقي المقاوم للماء كمادة أساسية لما يتمتع به من صلابة وقابلية عالية للتصنيع الرقمي</p> <p><b>التحليل البيئي</b></p> <p>ركز المشروع على إنشاء بيئة مناخية مصغرة باستخدام هيكل مظلي أخضر يوفر دعماً لنمو أنواع متعددة من النباتات المتسلقة، مع مراعاة عوامل مثل التعرض للشمس والحرارة والرطوبة ونوع التربة، وقد تم تطوير قاعدة بيانات نباتية وتوظيفها في نماذج خوارزمية لاختيار النباتات المناسبة لكل موقع في الهيكل مما يعزز الأداء البيئي والاستدامة الحضرية.</p> <p><b>التحليل التصميمي</b></p> <p>تميز التصميم بالتكامل بين الشكل الجمالي والأداء الوظيفي حيث تم تطوير الهيكل ليعكس تنوعاً نباتياً بصرياً وجمالياً مع مراعاة الاستخدام الفعال للمواد وتبسيط عمليات البناء، كما ساهم التكرار المعياري في تعزيز قابلية التركيب وسرعة التنفيذ، إذ تم بناء النموذج المصغر بالكامل في غضون 5 أيام فقط، كما أتاح التصميم إمكانية الصيانة السهلة وتحديث التركيبة النباتية حسب الحاجة.</p> <p><b>المرجع</b></p> <p>Sędzicki, D., Cudzik, J., &amp; Nyka, L. (2023)</p> |
| <p><b>جدول (3) النماذج في مراحل التصميم من المظلات الذكية (الباحث)</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

من التحليل المعمق للمظلات الذكية التفاعلية عبر الجوانب الثلاثة (التقني - البيئي - التصميمي) يمكن استخلاص مجموعة من المعايير التصميمية التي تمثل إطاراً استرشادياً لأي مشروع يهدف إلى تطوير مظلات معمارية ذكية ومستدامة، وفيما يلي هذه المعايير مصنفة بحسب المجال:

| المجال                                | المعايير التصميمية لتصميم مظلات معمارية ذكية ومستدامة                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| التقني                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ أظهرت المظلات الذكية قدرة عالية على تحليل البيانات البيئية والبشرية أنياً باستخدام مستشعرات للضوء والحركة والحرارة والصوت.</li> <li>■ تطبيق خوارزميات الذكاء الاصطناعي خصوصاً أنظمة التعلم الآلي والتتبع الشمسي أتاح اتخاذ قرارات تشغيلية تلقائية (مثل فتح أو تدوير أو تعديل زاوية المظلة) دون تدخل بشري مباشر.</li> <li>■ استخدمت عدة مشاريع أنظمة هيدروليكية وميكانيكية متقدمة ذات كفاءة عالية ومرونة مما سهّل التحكم في الظل والحركة وساهم في استجابة أكثر دقة.</li> </ul> |
| البيئي                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ ساعدت المظلات في خفض درجات الحرارة ضمن الفراغات المفتوحة خاصة في البيئات الحارة مثل الخليج العربي عبر خلق مناطق مظلة محسنة مناخياً.</li> <li>■ دمج الألواح الشمسية ضمن تصميم المظلات ساهم في تحقيق توليد ذاتي للطاقة النظيفة مما دعم مفاهيم الاستدامة وتقليل البصمة الكربونية.</li> <li>■ أدت الوظائف البيئية للمظلات إلى تقليل الاعتماد على التكييف والإنارة الصناعية مما يحسن الأداء البيئي العام ويعزز من جودة الاستخدام اليومي.</li> </ul>                                |
| التصميمي                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ استلهمت التصاميم الناجحة للمظلات الذكية من عناصر ثقافية وطبيعية (كشجرة النخيل - الزخارف الإسلامية - الأشكال العضوية.... إلخ) مما عزز الانتماء المكاني والرمزية البصرية.</li> <li>■ دمج الشكل مع الأداء التفاعلي خلق تجربة معمارية حيّة تتجاوب مع المستخدم وتخلق نوعاً من العلاقة التشاركية بين الإنسان والعنصر المعماري.</li> <li>■ تجاوزت المظلة دورها التقليدي كعنصر تظليل لتصبح رمزاً معبراً عن الابتكار والهوية ما يعزز من قيمة الفراغ بصرياً ووظيفياً.</li> </ul>        |
| جدول (4) نتائج تحليل النماذج (الباحث) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

### الإطار التطبيقي: نماذج تصميمية لمظلات ذكية في المدينة المنورة

يهدف هذا الإطار التطبيقي إلى تصميم نماذج مبتكرة لمظلات ذكية تناسب خصوصية المدينة المنورة من خلال استغلال التقنيات الحديثة وأساليب التصميم المستدام لتوفير بيئة ظليلة مريحة تدعم الاستخدام الأمثل للفراغات العامة، كما تسعى النماذج إلى الاستفادة من الهوية الثقافية المحلية والتراث العمراني في صياغة حلول تصميمية تعزز الانتماء المكاني وتلبي الاحتياجات المناخية والاجتماعية.

### الفراغات العامة في المدينة المنورة: تحديات مناخية وفرص للتطوير الحضري المستدام

تشهد المدينة المنورة تحولاً حضرياً استراتيجياً يتجلى في تطوير وتأهيل شبكة واسعة من الفراغات العامة والمماشي الجديدة، والساحات المفتوحة وذلك في إطار جهود تحقيق رؤية المملكة 2030 الرامية إلى تعزيز جودة الحياة وتوفير بيئات جاذبة ومحفزة، ولم تعد هذه الفراغات مجرد ممرات عبور بل أصبحت نقاط تجمع حيوية للأنشطة الاجتماعية

والترفيهية وممارسة الرياضة لا سيما مع مكانة المدينة الدينية التي تستقطب ملايين الزوار سنوياً، وتكتسب المماشي الممتدة على طول الشرايين الحضرية الجديدة والساحات المحيطة بالمعالم البارزة أهمية متزايدة كبنى تحتية تعزز التفاعل المجتمعي وتدعم الاقتصاد المحلي من خلال تنشيط الاستخدامات اليومية والفعاليات الموسمية.

ورغم هذه الاستثمارات المتنامية في البنية التحتية الحضرية إلا أن الفائدة القصوى من هذه الفراغات تواجه تحدياً مناخياً صارخاً يتمثل في البيئة الصحراوية القاسية للمدينة المنورة، فدرجات الحرارة المرتفعة والإشعاع الشمسي المباشر الذي يسود معظم أوقات النهار على مدار العام يجعل من استخدام هذه الفراغات أمراً غير مريح بل قد يكون مستحيلاً في أوقات الذروة الحرارية مما يحد بشكل كبير من قابليتها للاستخدام الفعلي والوظيفي، ويزداد هذا التحدي حدة في ظل تفاقم ظاهرة الجزر الحرارية الحضرية الناتجة عن تراكم الحرارة في الأسطح الإسفلتية والمباني الصلبة مما يرفع درجات الحرارة المحلية داخل المناطق العمرانية مقارنة بالمناطق الطبيعية المحيطة (Fortes et al., 2021)، وفي ظل هذا الواقع المناخي أصبح من الضروري تجاوز الحلول التقليدية للتظليل مثل الأشجار الطبيعية والمظلات الثابتة نحو حلول تصميمية تفاعلية تعتمد على تقنيات ذكية قادرة على التكيف مع المتغيرات البيئية واحتياجات المستخدمين بشكل لحظي، فالمظلات المعمارية الذكية المستندة إلى تقنيات التصميم البارامتري وإنترنت الأشياء (IoT) والأنظمة الحركية التكيفية باتت تشكل حلاً معمارياً واعداً يمكنه أن يعيد تعريف العلاقة بين الإنسان والمناخ داخل المدينة من خلال تحسين الراحة الحرارية وتوفير بيئة ظل مرنة، مع دمج عناصر وظيفية وجمالية تساهم في تنشيط الاستخدام اليومي لهذه المساحات، إن دمج مثل هذه الحلول ضمن خطة تطوير الفراغات العامة في المدينة المنورة يتطلب فهماً عميقاً لطبيعة السياق المحلي وأنماط الاستخدام وتوزيع الحركة البشرية على مدار اليوم والمواسم بما يضمن أن تأتي هذه المظلات الذكية كجزء من نسيج حضري متكامل، فهي لا تؤدي فقط وظيفة الحماية من المناخ بل تُعد عناصر فاعلة في تشكيل تجربة حضرية تفاعلية وصديقة للبيئة تساهم في تعزيز جودة الحياة وتوفير بيئات حضرية قابلة للعيش حتى في الظروف المناخية القاسية. وفي سياق الدراسة الميدانية لتحديد الفراغات العامة ذات الأولوية في المدينة المنورة، تبرز عدة مواقع حضرية استراتيجية تحتاج إلى تدخلات تصميمية مبتكرة لتحسين قابليتها للاستخدام طوال العام- جدول (5).

|                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>شكل (24) ممشي الهجرة - المدينة المنورة</p> | <p><b>ممشي الهجرة :</b> يعتبر من أطول المماشي في المدينة المنورة ويمتد بمحاذاة طريق الهجرة الحيوي، ويشهد الممشى كثافة استخدام من قبل السكان المحليين لممارسة المشي والجري والأنشطة الرياضية لا سيما في فترات المساء، إلا أن محدودية الظلال وارتفاع الحرارة خلال النهار تقلل من كفاءته كفراغ نشط في معظم ساعات اليوم، ويمكن أن يشكل موقعاً مثالياً لتطبيق نظم مظلات ذكية تتفاعل مع حركة الشمس والحشود.</p>        |
|  <p>شكل (25) جادة أهد - المدينة المنورة</p>    | <p><b>ممشي جادة أهد :</b> يربط بين المسجد النبوي الشريف وميدان سيد الشهداء وجبل أهد وهو نموذج معماري حضري يعزز جودة الفراغات العامة بتصميمه الذي يراعي مناخ المدينة عبر مسارات واسعة مظلة بأشجار محلية ومواد عاكسة للحرارة ويوفر مرافق تدعم التفاعل الاجتماعي والاستدامة، ورغم وجود تظليل طبيعي فإنه غير كافٍ مما يستدعي تطوير مظلات ذكية ومرنة قابلة للتعديل لتغطية المسار بالكامل ومواكبة حركة المستخدمين.</p> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <a href="https://geoservices.amana-md.gov.sa/madina-projects/project-details/1081">https://geoservices.amana-md.gov.sa/madina-projects/project-details/1081</a><br>(Accessed 18/06/2025)                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
|  <p>شكـل (26) ساحة مسجد سيد الشهداء – المدينة المنورة</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |
| <p>ساحة مسجد سيد الشهداء : تحيط هذه الساحة التاريخية بموقع معركة أحد وتشهد توافد أعداد كبيرة من الزوار المحليين والدوليين خصوصاً في المواسم الدينية، وعلى الرغم من تأهيل الموقع جزئياً إلا أن المساحات المفتوحة فيه تفتقر إلى بنى تظليل كافية أو عناصر تصميمية تحسّن من الراحة الحرارية أو تستوعب الاستخدامات المتنوعة، ويعد دمج مظلات ذكية مستلهمة من الهوية الإسلامية والمعمارية المحلية قد يسهم في تعزيز التجربة الروحية والثقافية في هذا الموقع.</p> |  |
| <a href="https://www.visitsaudi.com/ar/madinah/attractions/uhud-martyrs-square-madinah">https://www.visitsaudi.com/ar/madinah/attractions/uhud-martyrs-square-madinah</a><br>(Accessed 18/06/2025)                                                                                                                                                                                                                                                       |  |
|  <p>شكـل (27) المنطقة المركزية حول الحرم النبوي – المدينة المنورة</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |
| <p>المنطقة المركزية حول الحرم النبوي : تعد من أكثر الفراغات الحضرية استخداماً وزخماً على مدار العام وهي بالفعل تحتضن مظلات ضخمة قائمة في ساحة الحرم تُعد من أرقى أمثلة التكامل بين التصميم والهندسة الذكية، إلا أن الفراغات المحيطة بالحرم، مثل الشوارع التجارية والمناطق الانتقالية للمشاة ما زالت تفتقر إلى نظم تظليل ذكية تدعم التنقل اليومي وتحسن من مستوى الراحة للزوار والسكان.</p>                                                                |  |
| <a href="https://x.com/MED_Projects/status/1546915003814612995">https://x.com/MED_Projects/status/1546915003814612995</a> (Accessed 18/06/2025)                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |
| جدول (5) مواقع حضرية استراتيجية بالمدينة المنورة (الباحث)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |

هذه المواقع الأربعة تمثل تنوعاً في أنماط الاستخدام والكثافة الحركية والسياقات الاجتماعية والدينية مما يجعلها بيانات اختبار مناسبة لتطبيق نموذج المظلات الذكية التفاعلية، ويعزز هذا التحليل من أهمية أن يكون التصميم المقترحة مرنة ومتكيفة مع خصوصيات كل موقع من حيث التوجه العمراني وكثافة الاستخدام والنسيج المعماري والثقافي.

### النماذج المقترحة لمظلات ذكية ومستدامة في المدينة المنورة

من خلال تحليل صور Google Earth إضافة إلى الصور الميدانية تم تحديد نوعية السطوح وكثافة الغطاء النباتي وتوزيع المرافق وأنماط تدفق الحركة، وأظهرت النتائج أن معظم الفراغات العامة المستهدفة:

- تتعتمد على الأسفلت والخرسانة المكشوفة في الغالب مما يفاقم من ظاهرة امتصاص الحرارة.
- تفتقر إلى عناصر تظليل طبيعية أو معمارية كافية.
- تتميز بوجود محاور حركة طويلة ومناطق تجمع مما يفرض الحاجة إلى حلول مظلية مرنة تواكب تغيرات الكثافة الحركية.

بناءً على التحليل المكاني ودراسة سلوك المستخدمين ميدانياً تم تصنيف مواقع التدخل إلى فئتين تصميميتين رئيسيتين، مع مراعاة تحقيق التنوع في الحلول بما يتناسب مع خصوصية كل موقع واحتياجات مستخدميه كما يلي:

■ **المحاور الطولية (Linear Nodes) :** تشمل الممرات الممتدة مثل ممشى الهجرة وممشى الشهداء حيث تحتاج إلى مظلات معيارية قابلة للتكرار والتوسعة، ويُفضل توزيع المظلات على نسق وحدات نمطية منتظمة لتغطية المسار بشكل مستمر مع التركيز على الإيقاع البصري والراحة المناخية للمشاة على طول المحور.

■ **الساحات والمناطق الانتقالية الديناميكية: (Dynamic Plazas & Transition Zones)**

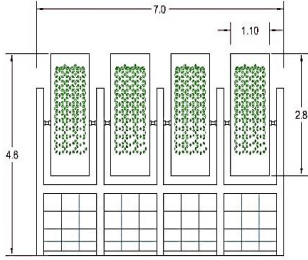
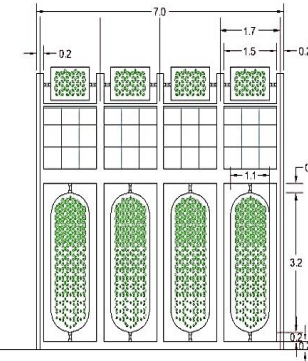
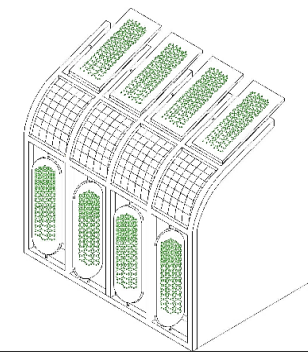
تشمل الساحات المفتوحة ذات الامتدادات الكبيرة مثل ساحة سيد الشهداء والمناطق الانتقالية ذات الكثافة العالية بالقرب من الحرم النبوي الشريف، وتتطلب هذه المواقع مظلات مركزية ومرنة ذات قدرة على التكيف مع حجم الحشود المتغير وظروف المناخ، ويُفضل استخدام مظلات قابلة للطي أو الانكماش وسهلة التركيب والنشر مع إمكانية التحكم الديناميكي في توزيع الظلال وتوفير تهوية طبيعية.

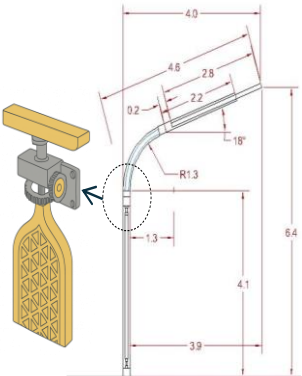
| التصميم الأول: للمحاور الطولية                                                                                                            | التصميم الثاني: للساحات المفتوحة                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>شكل (28) التصميم الأول المقترح للمحاور الطولية</p> |  <p>شكل (29) التصميم الثاني المقترح للساحات المفتوحة</p> |

**التصميم الأول : المظلة الذكية التفاعلية للمحاور الطولية – وصف معماري وتقني متكامل**

يمثل التصميم المقترح مظلة ذكية مستدامة مكونة من أربع وحدات متكررة، تُجسّد تكامل الهوية الإسلامية مع الحلول البيئية الذكية، وتُصمّم لتوفير تظليل ديناميكي وتحسين جودة الفراغات العامة في البيئات الحارة كالمدينة المنورة - جدول(6).

|                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
|  <p>شكل (30) تصور ثلاثي الأبعاد للتصميم المقترح لمظلة المحاور الطولية - الباحث</p> | <p>الألواح الخشبية العلوية: مزخرفة بنقوش هندسية إسلامية ومثبتة على محور أفقي قابل للدوران وتتحرك استجابةً لحركة الشمس بهدف تعديل زاوية الظل خلال النهار، تتيح هذه الحركة ضبط التظليل بما يتناسب مع التوقيت والموقع الجغرافي.</p> <p>الألواح الرأسية: مكونة من زخارف خشبية مفرغة ومثبتة ضمن إطارات معدنية وقابلة للدوران على محور رأسي لضبط التظليل</p> | <p>العناصر المادية والجمالية</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|

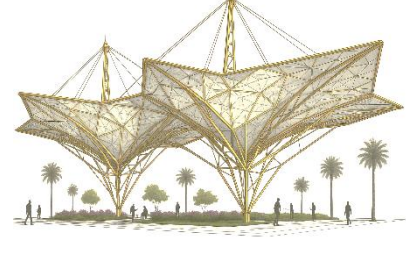
|                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|  <p>شكل (31) المسقط الأفقي للمظلة - الباحث</p>   | <p>الجانبى وتوجيه التهوية والخصوصية حسب اتجاه الشمس.</p> <p><b>السقف المقوس:</b> يحتوي على خلايا شمسية مدمجة شفافة أو شبه شفافة موزعة على امتداد كل وحدة، هذه الخلايا تمكن المظلة من توليد طاقة شمسية نظيفة تُستخدم مباشرة لتشغيل آلية حركة الألواح الخشبية (العليا والجانبية) مما يخلق نظاماً ذاتياً مستقلاً وموفرًا للطاقة.</p>                                                                           |                                                       |
|  <p>شكل (32) الواجهة الخلفية للمظلة - الباحث</p> | <p><b>مستشعرات ذكية (Sensors):</b> تقوم أجهزة استشعار ضوئية ومناخية بقياس زاوية أشعة الشمس وشدةها ودرجة الحرارة مما يسمح للمنظومة بالتحكم التلقائي في حركة الألواح لتوفير التظليل الأمثل.</p> <p><b>الخلايا الشمسية:</b> الشفافة أو شبه الشفافة تعتمد غالباً على مواد مثل طبقات الأكسيد المعدني الرقيقة (Thin-Film Solar Cells) أو خلايا التراكب العضوي والتي تسمح بمرور الضوء مع توليد طاقة مقبولة.</p>    | <p><b>البعد التقني والخصائص الذكية والتفاعلية</b></p> |
|  <p>شكل (33) أيزومتري للمظلة - الباحث</p>       | <p><b>نظام تشغيل ذاتي بالطاقة الشمسية:</b> تعمل منظومة التحريك بالكامل دون الحاجة إلى مصدر طاقة خارجي مما يجعلها مناسبة للمناطق المفتوحة والمشاريع المستدامة.</p> <p><b>آليات الدوران متعددة المحاور:</b> استخدام محورين للحركة (أفقي للرأسية، ورأسي للألواح الجانبية) يتطلب محركات دقيقة ذات استجابة عالية وقوة مناسبة لتحريك الألواح الخشبية دون إحداث اهتزازات تؤثر على الاستقرار أو الراحة البصرية.</p> | <p><b>البعد البيئي والإستدامة</b></p>                 |
| <p>شكل (34) إمكانية تكرار المظلة بشكل متسلسل على طول الممشى ومتقابل من الجهتين للممشى - الباحث</p>                                | <p><b>تحسين الراحة الحرارية:</b> من خلال تعديل زاوية الألواح الخشبية وفقاً لموقع الشمس، وتوفير المظلة تظليلاً متغيراً يقلل من تعرض الفراغات للشمس المباشرة مما يخفض درجات الحرارة السطحية والحرارة المحيطة.</p>                                                                                                                                                                                             |                                                       |

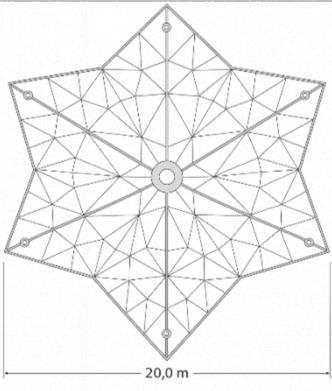
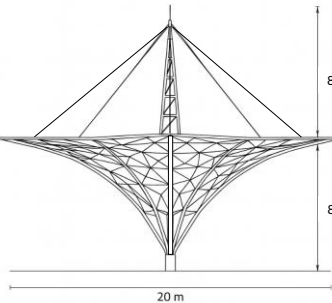
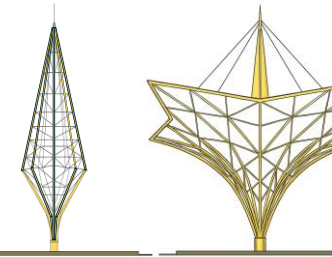
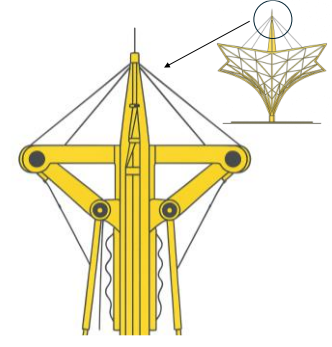
|                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                | <p><b>التهوية الطبيعية:</b> الألواح الرأسية الدوارة تسمح بضبط فتحات التهوية الجانبية مما يعزز تدفق الهواء الطبيعي ويساعد في تقليل الحاجة إلى التبريد الصناعي ويخفض استهلاك الطاقة.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                         |
| <p><b>شكل (35) قطاع عمودي على المظلة وتفصيله</b><br/>تثبيت الألواح الرأسية الدوارة - الباحث</p> | <p><b>استخدام الطاقة المتجددة:</b> اعتماد خلايا شمسية مدمجة يجعل النظام يعمل بطاقة نظيفة ومتجددة ويحد من البصمة الكربونية للنظام ويعزز الاستدامة البيئية للمشروع.</p> <p><b>المواد الطبيعية:</b> يعتمد التصميم على استخدام ألواح خشبية معالجة خصيصاً لمقاومة العوامل المناخية المحلية كالرطوبة العالية، وتقلبات درجات الحرارة والتعرض المباشر لأشعة الشمس والمطر، وتُشكل هذه الألواح عنصراً وظيفياً وجمالياً في آنٍ واحد</p> <p><b>مساهمة النظام في الاقتصاد الدائري :</b> قابلية تفكيك المكونات وترميمها يعزز من عمر المظلة ويقلل من نفايات البناء، كما يسمح بتحديث المكونات التقنية بسهولة عند الحاجة دون هدم كامل.</p> |                                         |
|                                                                                                 | <p><b>الهوية الثقافية:</b> الزخارف الإسلامية المفرغة تخلق ظلالاً متغيرة طوال اليوم مما يُضفي بعداً بصرياً وروحياً على الفراغ، ويُجسد انتماء التصميم للسياق الثقافي المحلي.</p> <p><b>حركة ديناميكية:</b> تنغم الشكل والحركة يعطي المظلة حضوراً معاصراً ينبض بالحياة والمرونة، ويعزز من جاذبية الفراغ.</p> <p><b>التوازن بين الحداثة والتقاليد:</b> دمج التكنولوجيا الذكية مع العناصر التراثية الهندسية يحقق توازناً بين الطابع المعاصر والروح الثقافية مما يجعل المظلة رمزاً للابتكار المستدام في بيئة ذات تاريخ عميق.</p> <p><b>التكامل مع البيئة الحضرية:</b> يُسهم تصميم المظلة المقوسة والمتكررة في تحقيق مرونة</p>   | <p><b>الجانب التصميمي والمعماري</b></p> |

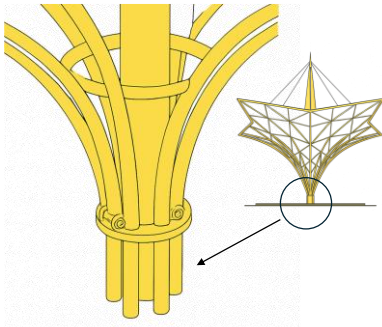
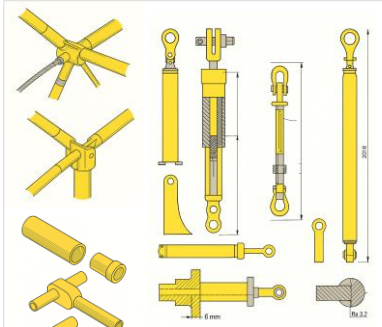
|                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                           |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|                                                                                              | تركيبية عالية، حيث تتيح الوحدات إمكانية التثبيت بشكل متسلسل منفرد أو متقابل لتشكل معاً قوساً مدبباً مستوحى من الهوية المعمارية المحلية، كم يمكن التحكم في عدد وحدات المظلة بما يناسب مختلف المواقع مثل الممرات والمماشي ومحطات الانتظار مع الحفاظ على انسجام بصري ووظيفي. |        |
|                                                                                              | الباحث                                                                                                                                                                                                                                                                    | المرجع |
| جدول (6) المظلة الذكية التفاعلية للمماشي بالمدينة المنورة - وصف معماري وتقني متكامل (الباحث) |                                                                                                                                                                                                                                                                           |        |

### التصميم الثاني : المظلة الذكية التفاعلية للساحات المفتوحة - وصف معماري وتقني متكامل

يمثل التصميم المقترح مظلة ذكية مستدامة تم استلهام هذا التصميم من الطبيعة تحديداً من الشجرة باعتبارها كائناً عضوياً يوفر الظل ويواجه تغير المناخ بمرونة ويتناغم مع الإنسان والمكان، وتم تحويل عناصر الشجرة (الجذع - الأغصان - الأوراق - الجذور) إلى رموز بنائية ووظيفية في دمج إبداعي بين البيوفيليا والهندسة الذكية، وعند تكرارها تشكل تجربة معمارية شاملة (ظل - حركة - ضوء - صوت - اتصال - راحة حرارية) كلها في كيان واحد أنيق - جدول (7).

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
|  | <p>العمود المركزي: يمثل الجذع مصنوع من فولاذ مجلفن مقاوم للحرارة والتآكل بلمسة سطحية تشبه اللحاء الطبيعي.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                          |
|  | <p>الأذرع الشعاعية المنبسطة: تنطلق من القمة كأغصان، مصنوعة من سبائك الألمنيوم خفيفة الوزن تفتح وتغلق بحركة موجهة.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                          |
| <p>شكل (36) تصور ثلاثي الأبعاد للتصميم المقترح لمظلة الساحات - الباحث</p>           | <p>الغشاء العلوي (الغطاء): القماش الغشائي عبارة عن نسيج تقني مثل PTFE أو ETFE، هما مادتان من البوليمرات الفلورية ولكل منهما خصائص فريدة، PTFE يتميز بمقاومته العالية للحرارة والمواد الكيميائية، بينما ETFE يتميز بمتانتة العالية وقابليته للأنثناء وشفافيته مما يجعله مناسباً لتطبيقات مثل الأغشية الهيكلية، ومشدود بتصميم يشبه انسيابية الأوراق ونصف شفاف يسمح بمرور الضوء الطبيعي بشكل خفيف ويمنع الأشعة الضارة.</p> | <p>العناصر<br/>المادية<br/>والجمالية</p> |
|                                                                                     | <p>الكابلات: فولاذ مجلفن مشدود بدقة لربط ودعم الهيكل</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                          |

|                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|  <p>شكل (37) المسقط الأفقي للمظلة من أعلى - الباحث</p>            | <p><b>المحركات الكهربائية :</b> مثبتة داخل القاعدة والأعمدة وتعمل أوتوماتيكياً لفتح وإغلاق المظلة</p> <p><b>نظام القفل:</b> مفاصل ميكانيكية وهيدروليكية توفر ثباتاً عند التمدد الكامل</p>                                                                                                                                                                            |                                                      |
|  <p>شكل (38) واجهة المظلة - الباحث</p>                            | <p><b>البعد الجمالي والرمزي:</b> تتجاوز المظلة وظيفتها الإنشائية لتجسد بُعداً رمزياً وجمالياً عميقاً، حيث تظهر كتكوين معماري مستوحى من الطبيعة أشبه بمنحوتة ضوئية تربط بين السماء والأرض، وبانفتاحها الشكلي ترمز إلى الترحاب والسكينة ويمكن قراءتها كتمثيل معاصر لمفهوم "الظل الظليل" بما يحمله من دلالات الرحمة والطمأنينة والقدسية.</p>                            |                                                      |
|  <p>شكل (39) تصور المظلة أثناء إغلاقها - الباحث</p>             | <p><b>تفاصيل الإنشاء والوصلات الميكانيكية:</b> مفاصل كروية وهيدروليكية تسهل الانفتاح والانغلاق، وأنظمة قفل تلقائية لضمان الثبات عند الفتح الكامل، وتتوزع الأنابيب الإشعاعية المركزية بشكل هندسي دقيق حول العمود المركزي، واستخدام تقنية الفولاذ الخفيف المدهون لتقليل الوزن مع ضمان القوة.</p>                                                                       |                                                      |
|  <p>شكل (40) تفاصيل آلية التحكم الميكانيكي بالمظلة - الباحث</p> | <p><b>أنظمة التشغيل الذكي:</b> المظلة مزودة بـ محرك كهربائي مدمج ( Electric Retractable System ) يقوم بفتح الأذرع تدريجياً يعمل بتقنية التلسكوب الداخلي، حيث تنزلق الأذرع داخل بعضها كما تنمو الأغصان من جذع الشجرة، مجهزة بحساسات حرارة وشمس ورياح للتحكم الأوتوماتيكي (Auto-open/Auto-close) ويمكن ربطها بـ أنظمة المدن الذكية ( Smart Urban Infrastructure ).</p> | <p><b>البعد التقني والخصائص الذكية التفاعلية</b></p> |
|                                                                                                                                                    | <p><b>نظام تحكم مركزي:</b> متصل سحابياً يتحكم بمظلة واحدة أو مجموعة كاملة (كما في ساحات المساجد النبوي)، يسمح بالإدارة عن بُعد من خلال تطبيق</p>                                                                                                                                                                                                                     |                                                      |

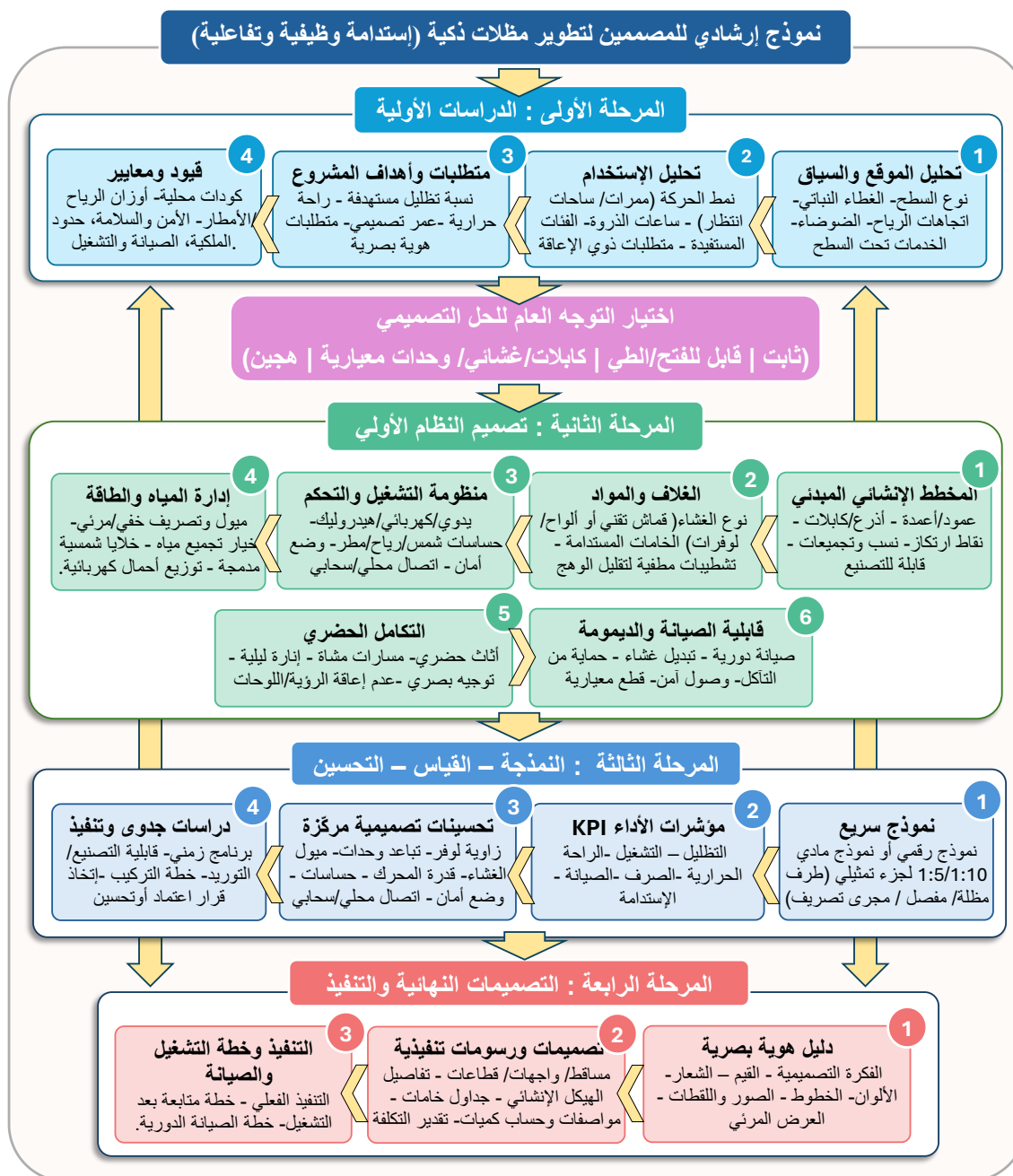
|                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                                                                 | <p>على الهاتف، كما يُمكن تشغيل المظلة يدويًا أو جدولاً للفتح والإغلاق.</p> <p><b>خلايا شمسية مدمجة:</b> في أطراف الغشاء والهيكل توفر مصدر طاقة ذاتي لتشغيل الأنظمة الذكية أو الإضاءة.</p>                                                                                                                                                                                                                                  |                                         |
| <p>شكل (41) تفاصيل قاعدة المظلة - الباحث</p>                                    | <p><b>سهولة الصيانة:</b> يتم استخدام مفاصل هيدروليكية مقاومة للتآكل كما يمكن استبدال القماش بسهولة دون تفكيك كامل الهيكل، والمحركات محمية داخل غلاف مقاوم للغبار والحرارة.</p>                                                                                                                                                                                                                                             |                                         |
| <p>شكل (42) تفاصيل الوصلات - الباحث</p>                                       | <p><b>الاستدامة البيئية:</b> المظلة توفر ظلًا طبيعيًا يقلل من الحاجة إلى التكييف الخارجي في المناطق المفتوحة.</p> <p><b>توفير الطاقة:</b> من خلال دمج خلايا شمسية في نسيج غشاء المظلة لتوليد الكهرباء اللازمة لتشغيل المحركات والإضاءة.</p>                                                                                                                                                                                |                                         |
| <p>شكل (43) تصور ثلاثي الأبعاد للمظلة أثناء الغلق - الباحث</p>                | <p><b>التقليل من البصمة الكربونية:</b> عبر استخدام مواد قابلة لإعادة التدوير وأنظمة تعتمد على الطاقة الشمسية.</p> <p><b>إدارة مياه الأمطار:</b> من خلال تصميم الغشاء بانحدار مدروس نحو نقاط تصريف خفية مع إمكانية تجميع المياه في خزان أرضي.</p> <p><b>توجيه الهواء والضوء:</b> باستخدام فتحات مصممة بارتفاعات توجه التهوية في الاتجاه الأمثل وتسمح بمرور ضوء ناعم وموزع مستوحى من طريقة تسرب الضوء عبر أوراق الأشجار.</p> | <p><b>البعد البيني والإستدامة</b></p>   |
| <p>شكل (44) تصور ثلاثي الأبعاد لإمكانية تكرار المظلة في الساحات - الباحث</p>  | <p><b>الشكل المعماري:</b> تأخذ المظلة شكل زهرة سداسية الأضلاع أو نجمة من الأعلى بتصميم هندسي عضوي ديناميكي يعتمد على التماثل المحوري ويخلق إحساسًا بالحركة والمرونة حتى وهو في وضعية الثبات، والهيكل يبدو خفيفًا بصريًا رغم كونه كبير الحجم بفضل استخدام الأقمشة الشفافة والهيكل المعدني الرشيق.</p>                                                                                                                       | <p><b>الجانب التصميمي والمعماري</b></p> |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |        |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|  | <p>الهوية المعمارية والتاريخية: تتخذ المظلة هيئة نجمية سداسية من الأعلى تذكيرًا بالزخارف الإسلامية المنتشرة في قباب المسجد النبوي وعماراته، ويتكرر في التفاصيل الهيكلية للمظلة استخدام الخطوط الهندسية الدقيقة والزوايا المتناظرة التي تمثل العمارة الإسلامية التقليدية في تناغمها وجمالها.</p>                                                                                                         |        |
|  | <p><b>التكامل الحضري والوظيفي:</b> تم تصميم المظلة كوحدة مستقلة قابلة للتكرار يمكن تركيبها فرادى في الحدائق العامة أو بشكل شبكي في الساحات المركزية كما هو الحال في ساحات المساجد أو المساحات التجارية المفتوحة كما يمكن التحكم في أبعادها ونسبها حسب الفراغات المحيطة، وعند تكرارها في شبكة تعمل المظلات بشكل تفاعلي جماعي كمظلات تتصل ببعضها تستجيب للظروف البيئية معًا وتكون مشهدًا حضريًا حيًا.</p> |        |
|  | الباحث                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | المرجع |

وأخيرًا يثبت الجزء التطبيقي من البحث أن تصميم مظلات ذكية باستخدام التقنيات الرقمية الحديثة يمكن أن يحقق حلولاً فعالة تتلاءم مع مناخ المدينة المنورة وسياقها الحضري، وقد أظهر النموذجان المقترحيان (للمحاور الطولية والساحات المفتوحة) قدرة عالية على تحسين الراحة المناخية وتوفير تظليل مرن ودمج الوظيفة مع الجمال والاستدامة، وتؤكد الدراسة أن هذه النماذج قابلة للتطبيق العملي وتدعم توجهات المدينة نحو بيئة عمرانية مستدامة ذكية ومتجاوبة.

### صياغة نموذج إرشادي للمصممين لتصميم مظلات ذكية (استدامة وظيفية وتفاعلية)

يعرض النموذج التالي إطارًا تكامليًا لتطوير تصميم المظلات الذكية التفاعلية المستدامة، قد تم تطويره استنادًا إلى الأطر النظرية والتحليلية والتطبيقية للبحث - شكل (45).



شكل (45) نموذج إرشادي للمصممين لتصميم مظلات ذكية تفاعلية ومستدامة - (الباحث)

ويعتمد هذا الإطار على تسلسل مرحلي متكامل يبدأ بـ الدراسات الأولية التي تتناول تحليل الموقع والسياق (نوع السطح- الغطاء النباتي - اتجاهات الرياح- شبكات الخدمات)، وتحليل أنماط الاستخدام وساعات الذروة وتحديد متطلبات المشروع والقيود والمعايير، يلي ذلك إختيار التوجه التصميمي العام للحل (ثابت - قابل للطي- غشائي- كابلات - وحدات معيارية - هجين)، في تصميم النظام الأولي تُحدّد البنية الإنشائية والغلاف والمواد ومنظومة التشغيل والتحكم وآليات إدارة المياه والطاقة مع مراعاة التكامل الحضري وقابلية الصيانة، بعد ذلك تُفعل حلقة النمذجة والقياس والتحسين من خلال عمل نموذج (رقمي أو مادي)، تتبعه قياسات لمؤشرات الأداء الرئيسية (الظل- الراحة الحرارية - السلامة الريحية - الصرف- زمن التشغيل - استهلاك الطاقة)، ثم إدخال تحسينات تصميمية مركزة بالتوازي مع دراسة الجدوى والتنفيذ، وتختتم

المنهجية — دليل هوية بصرية يضمن الاتساق البصري والتواصل، والتصميمات التنفيذية النهائية وتشمل الرسومات والتفاصيل وتقدير التكلفة ومرحلة التنفيذ الفعلي وخطة تشغيل وصيانة دورية، بهذه الدورة القصيرة المتكررة يتم ربط القرار التصميمي بالأداء الفعلي ويُخفض زمن الانتقال من الفكرة إلى التطبيق.

### نتائج البحث:

- أثبتت الدراسة فاعلية توظيف أدوات التصميم الرقمي المتقدمة مثل النمذجة البارامترية وتقنيات إنترنت الأشياء (IoT) في تطوير مظلات ذكية قادرة على الاستجابة للظروف المناخية الحارة والجافة في المدينة المنورة من خلال التحكم التلقائي في التظليل والتهوية وتعزيز الراحة البيئية.
- أظهرت النماذج التحليلية إمكانية تحقيق تكامل وظيفي وبيئي عبر استخدام مواد خفيفة ومستدامة وتقنيات تصنيع رقمية دقيقة تقلل من الفاقد المادي مما يدعم كفاءة الطاقة ويحد من الأثر البيئي.
- أوصت الدراسة بتطوير حلول تصميمية تنطلق من الخصوصية الثقافية والعمرانية للمدينة المنورة عبر توظيف مفردات جمالية إسلامية ضمن لغة معمارية ذكية ومعاصرة تساهم في تحسين البيئة الحضرية وتحقيق مستهدفات رؤية المملكة 2030.
- تشير الدراسة إلى تصاعد التداخل بين العمارة والأنظمة الذكية حيث لم تعد المظلة مجرد غطاء معماري تقليدي، بل أصبحت بنية تفاعلية مدعومة بالبيانات والتقنيات المتقدمة تساهم في تعزيز الاستدامة والتصميم التشاركي وتحسين جودة الحياة.
- أظهر التصميم التطبيقي للمظلتين فاعلية واضحة في الاستجابة للأنماط المختلفة للفراغات العامة في المدينة المنورة، حيث تم تطوير مظلة خطية مخصصة للمحاور الطولية (مثل الممشي) باستخدام وحدات معيارية قابلة للتكرار، توفر تظليلاً مستمراً ومرونة تشغيلية عالية تتكيف مع حركة المستخدمين والظروف المناخية، في المقابل تم تصميم مظلة مركزية مخصصة للساحات المفتوحة ذات طابع شعاعي وهيكلي عضوي تدمج بين التظليل الذكي وتوليد الطاقة وتتيح استخدامات متعددة اجتماعية ومناخية.
- قدم البحث نموذجاً إرشادياً عملياً يمكن المصممين من تصميم مظلات ذكية مستدامة عبر مخطط مرحلي واضح يدمج النمذجة والقياس والتحسين ويسترشد بمؤشرات أداء واضحة.

### توصيات البحث:

#### أولاً: للجهات الحكومية وبلديات التخطيط العمراني

- تبني سياسات تصميمية تعتمد على المظلات الذكية ضمن مشاريع تطوير الفراغات العامة وأنسنة المدن خاصة في المناطق ذات الكثافة الحركية والدينية.
- تخصيص ميزانيات للمشاريع التجريبية (Pilot Projects) لتطبيق النماذج المقترحة ضمن المدينة وقياس أثرها البيئي والاجتماعي.

#### ثانياً: للمصممين والمعماريين

- اعتماد النموذج الإرشادي المقترح كإطار عمل ملزم لفرق التصميم والتنفيذ في مشاريع المظلات الذكية.
- استخدام أدوات التصميم الرقمي المتقدم مثل التصميم البارامترى وإنترنت الأشياء ونمذجة معلومات البناء BIM في تطوير مظلات تفاعلية تتكيف مع تغيرات المناخ وسلوك المستخدم.

- استلهم عناصر التصميم من الهوية الثقافية والسياق المحلي والتكامل بين الوظيفة والجمال في تصميم المظلات بما يعزز من قيمة الفراغات العامة.
- اعتماد الوحدات المعيارية القابلة للتكرار والتوسع لتسهيل التركيب والصيانة خاصة في مظلات المحاور الطولية والساحات العامة.

#### ثالثاً: للمهندسين والمختصين الفنيين

- تطوير أنظمة ذكية للتحكم في التظليل والتهوية والإضاءة باستخدام الحساسات البيئية والبرمجيات المرتبطة بإنترنت الأشياء IoT .
- اختيار مواد خفيفة ومستدامة (مثل الألمنيوم المعالج أو السبائك المتقدمة) تراعي الظروف المناخية وتقلل من تكاليف الصيانة باستخدام مفاصل ذكية ونقاط تثبيت معيارية وتوصيلات مرنة.
- تحسين أنظمة تصريف المياه وتجميع الطاقة الشمسية ضمن بنية المظلات لتحقيق وظائف بيئية متقدمة.

#### رابعاً: للجامعات ومراكز البحث

- دعم البحث التطبيقي في تصميم المظلات الذكية وربطه بواقع المدينة المنورة من حيث المناخ والسياق الديني والثقافي.
- إنشاء معامل مشتركة مع البلديات لتجربة نماذج مظلية تفاعلية وتطبيقية لتقييم أداء النماذج المقترحة في بيئة المدينة المنورة الحقيقية واختبار كفاءتها.
- تدريب الطلبة والباحثين على التصميم التفاعلي المستدام باستخدام أدوات رقمية متقدمة وتطبيقات الذكاء الاصطناعي في البيئة العمرانية.

#### المراجع

- Agkathidis, A., & Brown, A. (2013). Tree-structure canopy: A case study in design and fabrication of complex steel structures using digital tools. *International Journal of Architectural Computing*, 11(1), 87–104. <https://doi.org/10.1260/1478-0771.11.1.87>
- Beesley, P. (2016). Hybrid Sentient Canopy: An implementation and visualization of proprioceptive curiosity-based machine learning. <https://doi.org/10.52842/CONF.ACADIA.2016.362>
- Block, P., Boller, G., DeWolf, C., Pauli, J., & Kaufmann, W. (2024). Proposal for a Responsive Canopy Integrating Curved Line Folding Technique and Cable-Driven Systems.
- Ertosun Yıldız, M., & Yıldız, M. A. (2025). Impact Analysis of Building Structure on Building Envelope Design in the Context of Sustainability. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 8(2), 480-495. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1616966>
- Fortes, S., Hidalgo-Triana, N., Sánchez-la-Chica, J.-M., García-Ceballos, M.-L., Cantizani-Esteva, J., Pérez-Latorre, A.-V., Baena, E., Pineda, A., Barrios-Corpa, J., & García-Marín, A. (2021). Smart Tree: An Architectural, Greening and ICT Multidisciplinary Approach to Smart Campus Environments. *Sensors*, 21(21), 7202. <https://doi.org/10.3390/s21217202>
- He, J., Zhou, Y., Wu, S., Cao, J., Han, B., Wang, Z., ... & Ma, P. (2025). Unlocking the Capacity and Stability Limitations of Perovskite Electrodes and Achieving the Design of

- a Flame-Retardant Supercapacitor Through the “Tree Canopy” Structure. ACS Energy Letters, 10(4), 1680-1687. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.5c00154>
- Huang, Y., Cai, Y., Jiao, J., Pan, C., Wang, G., Li, C., ... & Zhou, G. (2025). The Impact of Meteorological Factors and Canopy Structure on PM2.5 Dynamics Under Different Urban Functional Zones in a Subtropical City. Forests, 16(3), 479. <https://doi.org/10.3390/f16030479>
  - Kantaş, Y. (2024). Design for PV-integrated smart urban furniture (Order No. 31701604). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (3132869875). Retrieved from <https://www.proquest.com/dissertations-theses/design-pv-integrated-smart-urban-furniture/docview/3132869875/se-2>
  - Nejur, A. (2023). Structural Folding for Architectural Applications. Engineering Proceedings, 43(1), 27. <https://doi.org/10.3390/engproc2023043027>
  - Roshan Kharrat, R. (2024). Dynamic and Adaptive Photovoltaic Shading Systems: Design and Architectural Integration for Energy Production and Indoor Comfort (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
  - Sakhaei, H. (2020). Interactive kinetic canopy with industrial architecture legacy preservation approach. Journal of Architectural Research and Development, 4(2), 1-10. <https://ojs.bbwpublisher.com/index.php/JARD/article/view/1033>
  - Sędzicki, D., Cudzik, J., & Nyka, L. (2023). Computer-Aided Greenery Design—Prototype Green Structure Improving Human Health in Urban Ecosystem. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(2), 1198. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021198>
  - Stefańska, A., & Rokicki, W. (2022). Architectural Design Optimisation in Reticulated Free-Form Canopies. Buildings, 12(8), 1068. <https://doi.org/10.3390/buildings12081068>
  - van Ameijde, J., Ma, C. Y., Goepel, G., Kirsten, C., & Wong, J. (2022). Data-driven placemaking: Public space canopy design through multi-objective optimisation considering shading, structural and social performance. Frontiers of architectural research, 11(2), 308-323. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.10.007>
  - Zeng T, Ma X, Luo Y, et al. Improving outdoor thermal environmental quality through kinetic canopy empowered by machine learning and control algorithms. Building Simulation, 2025, 18(4): 699-720. <https://doi.org/10.1007/s12273-025-1246-6>