



تقييم فاعلية أنظمة التظليل التكيفية في تحسين الأداء الحراري والبصري للمباني الإدارية في المناطق الحارة والجافة: مراجعة نقدية مقارنة مع دراسة لسياق البيئة الليبية

مها عبد الرحمن عقيل

المعهد العالي للعلوم والتقنية – طرابلس، ليبيا

Evaluating the Effectiveness of Adaptive Shading Systems in Improving the Thermal and Visual Performance of Office Buildings in Hot-Arid Regions: A Critical Comparative Review with an In-Depth Analysis of the Libyan Environmental Context

Maha Abdul Rahman Aqeel

Higher Institute of Science and Technology – Tripoli, Libya

Mmfhsh1973@gmail.com

تاريخ الاستلام: 2026/9/06 تاريخ المراجعة: 2026/9/08 تاريخ القبول: 2026/10/13 تاريخ النشر: 2026/10/29

الملخص:

تواجه المباني الإدارية في الأقاليم المناخية الحارة والجافة تحديات بيئية وطاقيّة متفاقمة ترتبط بارتفاع حدة الإشعاع الشمسي المباشر، وزيادة أحمال التبريد والتكييف، بالتوازي مع الحاجة الماسة لتوفير مستويات إضاءة طبيعية ملائمة تضمن الراحة البصرية وتدعم الإنتاجية المكتبية للشاغلين. تهدف هذه الدراسة إلى تقديم مراجعة نقدية تحليلية ومقارنة عميقة لإمكانيات أنظمة التظليل التكيفية (الواجهات الحركية والديناميكية) مقارنة بالنظم التقليدية الثابتة، مع تحديد المحددات والشروط الحاكمة لفاعليتها البيئية والتشغيلية. اعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي المقارن عبر استقراء وتركيب أدلة نقدية من عينة قصدية ضمت 10 دراسات مرجعية محكمة نُشرت في دوريات عالمية بين عامي (2013 و2026).

نُظمت محاور التحليل حول: الاستجابة الزمنية، الأداء الحراري، كفاءة ضوء النهار والحد من الإبهار، الاستراتيجيات البرمجية للتحكم، وقيود الصيانة والتعقيد الميكانيكي. كما أفردت الدراسة قسماً مفصلاً وموسعاً لمناقشة دلالات وإمكانيات تطبيق هذه التقنيات في المباني الإدارية ضمن البيئة الليبية (مقارنة تحليلية بين الشريط الساحلي كطرابلس وبنغازي، والمناطق الداخلية والصحراوية الحارة كسبها وغدامس). وتكشف النتائج أن قابلية الحركة وتعديل الوضعية توفر مرونة عالية للتحكم الشمسي، غير أنها لا تضمن بذاتها توفيراً حتمياً للطاقة أو منعاً كلياً للإبهار؛ إذ تعتمد النتائج الفعلية على تفاعل مركّب بين اتجاه الواجهة، نوع ومعاملات التزجيج، خوارزميات التحكم، إضافة إلى التحديات البيئية المحلية من غبار وأتربة ورطوبة ساحلية وارتفاع تكاليف الصيانة وتوافر الكوادر التقنية. وتخلص الدراسة إلى ضرورة التخلي عن افتراض التفوق المطلق للواجهات المتحركة، واعتماد تقييم متعدد المعايير يوازن بين الأداء البيئي المستدام، والراحة الإنسانية، والجاهزية التشغيلية قبل إقرار تطبيقها في المباني الإدارية في ليبيا.

الكلمات المفتاحية: التظليل التكيفي؛ الواجهات الحركية؛ المباني الإدارية؛ الأداء الحراري؛ الراحة البصرية؛ المناخ الحار والجاف؛ البيئة الليبية؛ كفاءة الطاقة.

Abstract

Office buildings in hot and arid climatic regions face increasingly complex environmental and energy-related challenges associated with intense direct solar radiation and rising cooling and air-conditioning loads, alongside the critical need to provide adequate levels of natural daylight that ensure visual comfort and support occupants' workplace productivity. This study aims to provide an in-depth critical, analytical, and comparative review of the potential of adaptive shading systems (kinetic and dynamic façades) in comparison with conventional static shading systems, while identifying the key factors and conditions governing their environmental and operational effectiveness. The research adopts a descriptive, analytical, and comparative methodology through the critical examination and synthesis of evidence drawn from a purposively selected sample of ten peer-reviewed studies published in international scientific journals between 2013 and 2026.

The analysis is structured around five principal dimensions: temporal responsiveness, thermal performance, daylighting efficiency and glare mitigation, algorithm-based control strategies, and the limitations associated with maintenance requirements and mechanical complexity. Furthermore, the study devotes a comprehensive and extended discussion to the implications and potential applications of these technologies in office buildings within the Libyan context, incorporating a comparative analysis of coastal cities, such as Tripoli and Benghazi, and hot inland and desert regions, including Sabha and Ghadames. The findings indicate that the ability of adaptive shading systems to move and adjust their configurations provides considerable flexibility in solar control. However, such adaptability does not inherently guarantee energy savings or the complete elimination of visual glare. Actual performance depends on the complex interaction of several factors, including façade orientation, glazing types and performance characteristics, control algorithms, and local environmental challenges, such as dust and sand accumulation, coastal humidity, high maintenance costs, and the availability of qualified technical personnel.

The study concludes that the assumption of the universal superiority of kinetic façades over conventional static shading systems should be reconsidered. Instead, a comprehensive multi-criteria evaluation framework is recommended to balance sustainable environmental performance, occupant comfort, and operational readiness before implementing adaptive shading technologies in office buildings across Libya.

Keywords: Adaptive Shading Systems; Kinetic Façades; Office Buildings; Thermal Performance; Visual Comfort; Hot-Arid Climate; Libyan Environment; Energy Efficiency.

المقدمة:

يمثل الغلاف الخارجي للمبنى (Building Envelope) خط الدفاع الأول والوسيط الحيوي الحاكم لأدائه البيئي والطاقي، نظراً لكونه الحد الفاصل والغطاء الديناميكي بين قسوة الظروف المناخية الخارجية ومتطلبات الراحة الإنسانية (الحرارية، البصرية، والهوائية) للشاغلين في الداخل. وتكتسب هذه الإشكالية حساسية مضاعفة وتُعدّ معقداً في المباني الإدارية الواقعة ضمن الأقاليم

تقييم فاعلية أنظمة التظليل التكيفية في تحسين الأداء الحراري والبصري للمباني الإدارية في المناطق الحارة والجافة: مراجعة نقدية مقارنة مع دراسة لسياق البيئة الليبية

المناخية الحارة والجافة، حيث يتسبب التعرض المستمر للإشعاع الشمسي المباشر في تفاقم الكسب الحراري عبر النوافذ والأسطح الشفافة، مما يرفع بصورة حادة من الأحمال الحرارية واستهلاك الطاقة الكهربائية المخصصة لنظم التكييف والتبريد الاصطناعي.

وفي هذا السياق المعماري، تُعد أنظمة التظليل الشمسي الخارجي من أهم الحلول والأدوات المعمارية والتقنية المستخدمة للحد من النفاذ الحراري المباشر وتحسين جودة الإضاءة الطبيعية داخل الفراغات الإدارية. غير أن أنظمة التظليل التقليدية الثابتة (Static Shading Systems) تعتمد بطبيعتها الهندسية على كاسرات وألواح ذات زوايا توجيه مستقرة ولا تمتلك القدرة الديناميكية على التكيف مع التغيرات الساعية والموسمية لزوايا سقوط الشمس، مما يولد في كثير من الأحيان قصوراً وظيفياً؛ فإما أن تعجز عن حجب الشمس في ساعات الذروة أو تفرط في حجب الضوء الطبيعي النافع في أوقات الصباح والمساء، مما يضطر إلى تشغيل الإضاءة الاصطناعية وزيادة الاستهلاك الكلي للطاقة (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019).

علاوة على ذلك، أظهرت الأدبيات الحديثة أن التوجهات المعمارية المعاصرة نحو استخدام الواجهات الزجاجية الممتدة (Fully Glazed Facades) في المباني الإدارية دون معالجات غلاف كفؤة تتسبب في ظواهر بيئية سلبية، مثل ظاهرة الصوبة الزجاجية الداخلية والإجهاد البصري الناتج عن الإبهار الشمسي المباشر (Solar Glare)، مما ينعكس سلباً على صحة شاغلين وإنتاجيتهم المكتبية (Krarti, 2022).

ولمواجهة هذه القيود البنوية في الحلول الساكنة، برزت في العمارة المستدامة والتكنولوجيا المعمارية المعاصرة مفاهيم "الواجهات التكيفية أو الحركية" (Kinetic Facades Adaptive Climate) بوصفها توجهاً تقنياً واعداً؛ إذ تتميز بقدرتها الميكانيكية أو الفيزيائية على تعديل هندستها، زواياها، أو خصائص نفاذيتها استجابةً للمتغيرات البيئية والمخارج المناخية اللحظية. ويشير Loonen et al. (2013) في أطروهم التأسيسية إلى أن الأغلفة المتكيفة مناخياً تدمج الاستراتيجيات السلبية مع الأنظمة النشطة لتعديل خصائص المبنى الديناميكية، مما يتيح استجابة مرنة للبيئة المحيطة، رغم ما يتخلل ذلك من قيود وتحديات مرتبطة بتكاليف التأسيس، والتحكم البرمجي، والاستدامة التشغيلية والصيانتية. كما أكد Barozzi et al. (2016) على الأهمية الجمالية والوظيفية للحلول الحركية في إعادة تعريف الشكل المعماري وتعزيز كفاءة المباني.

ومع التطور المتسارع في مجالات النمذجة البارامترية، وأنظمة التحكم الذكي، والذكاء الاصطناعي المدمج في إدارة المباني (Building Management Systems – BMS) (Avci et al., 2025; Krarti, 2022)، ظهرت حاجة ماسة لتقييم الفاعلية الفعلية لهذه الأنظمة بشكل علمي وموضوعي في الأقاليم الحارة والجافة، وخاصة عند نقل هذه التكنولوجيات المتقدمة إلى بيئات ذات معطيات مناخية وبنوية خاصة مثل البيئة الليبية.

مشكلة البحث:

تتمثل المشكلة البحثية المحورية في شقين متداخلين:

1. الشق النظري والتقني: النزعة السائدة في بعض الأدبيات والأطروحات المعمارية نحو اعتبار أنظمة التظليل المتحركة والتكيفية حلولاً متفوقة مطلقاً على الحلول الثابتة، والترويج لها بوصفها بديلاً جذرياً يوفر الطاقة تلقائياً، دون إجراء تقييم شمول ومقارن يوازن بين خفض طاقة التبريد، توفير ضوء النهار، منع الإبهار، وتعقيدات التشغيل والصيانة.
2. الشق التطبيقي والسياقي: غياب الأدلة والتقييمات الميدانية والمفهومية التي تفحص إمكانية ودلالات تطبيق الواجهات الحركية في الواقع المبني في ليبيا، في ظل التباين المناخي الحاد بين الشريط الساحلي والجنوب الصحراوي، فضلاً عن المحددات الاقتصادية والتكنولوجية المحلية.

تقييم فاعلية أنظمة التظليل التكيفية في تحسين الأداء الحراري والبصري للمباني الإدارية في المناطق الحارة والجافة: مراجعة نقدية مقارنة مع دراسة لسياق البيئة الليبية

وانطلاقاً من هاتين الإشكاليتين، يتحدد التساؤل الرئيسي للبحث كالتالي:

تحت أي شروط ومحددات بيئية وتشغيلية وبارامترية تقدم أنظمة التظليل التكيفية فائدة حرارية وبصرية حقيقية مقارنة بالأنظمة الثابتة في المباني الإدارية بالبيئات الحارة والجافة؟ وما هي إمكانات ودلالات ومحددات تطبيقها في البيئة الليبية بمختلف أقاليمها المناخية؟

أهداف البحث

تسعى هذه الدراسة إلى تحقيق الأهداف الأكاديمية التالية:

1. التأطير المفاهيمي والتقني: تفكيك وتصنيف الخصائص المعمارية، الهندسية، والبرمجية لكل من أنظمة التظليل الثابتة والتكيفية الحركية.
2. التحليل المقارن للأداء: مراجعة وتحليل الأدلة العلمية المنشورة حول الأثر المتبادل للأنظمة التكيفية في تقليل الكسب الحراري، توفير ضوء النهار، والحد من الإبهار البصري.
3. تقييم قيود التشغيل: تحديد التحديات التقنية، الميكانيكية، وسلوك الشاغلين المرتبط بالنظم المؤتمتة.
4. التوسع في السياق المحلي الليبي: دراسة وتحليل المعطيات المناخية والبنوية لليبي (طرابلس، بنغازي، سبها، غدامس)، وتقييم مدى ملائمة النظم التكيفية مقارنة بالنظم السلبية والمواد المتطورة في ظل الظروف المحلية.

الإضافة المعرفية

تتمثل الإضافة المعرفية للورقة في إغناء المكتبة الأكاديمية العربية بدراسة نقدية منهجية تتجاوز النظرة التبسيطية للتقنيات الحركية، وتوفر للمصمم المعماري وصانع القرار إطاراً تقييمياً متعدد المعايير يستند إلى الأدلة، مع ربطه بصورة غير مسبقة بالواقع المناخي والتشغيلي في ليبيا.

الحدود والنطاق

تعتمد هذه الدراسة حصراً على منهجية المراجعة النقدية والتحليل المقارن والاستقراء النظري لأدبيات علمية منشورة، ولا تتضمن إجراء محاكاة حاسوبية رقمية جديدة أو قياسات ميدانية عملية مباشرة من قبل الباحثة. ومن ثم، فإن الاستنتاجات المعروضة هي استنتاجات نوعية وتفسيرية ولا تُستخدم لحساب أرقام أو نسب مئوية عددية جازمة لمبانٍ بعينها دون اختبار محلي مستقبلي.

الإطار النظري والدراسات السابقة

شهد التفكير المعماري في مجال غلاف المبنى تحولاً مفاهيمياً عميقاً خلال العقود الثلاثة الماضية، حيث انتقل الفكر التصميمي من اعتبار الغلاف جداراً فاصلاً ساكناً (Static\ Barrier) إلى اعتباره غشاءً بيئياً حيوياً وتفاعلياً (Dynamic\ Environmental Membrane).

تطور مفهوم غلاف المبنى	
الغلاف التقليدي الساكن	الغلاف التكيفي الديناميكي
حماية بيئية ثابتة	استجابة لحظية للتغير المناخي
- تصميم لظروف الذروة القصوى	موازنة مستمرة بين الحرارة والضوء
اعتماد كلي على الأنظمة النشطة	دمج الحلول السلبية والنشطة

وقد وضع Loonen et al (2013) الأساس المفاهيمي للأغلفة المتكيفة مناخياً (Climate Adaptive Building Shells (CABS)، حيث عرّفوها بأنها الأغلفة القادرة على تغيير وظائفها أو أشكالها أو خصائصها الفيزيائية ديناميكياً استجابةً للمتغيرات الجوية المتكررة ومتطلبات شاغليها، بهدف تقليل استهلاك الطاقة الكلية وتحسين الراحة الداخلية. وأوضحوا أن هذا التكيف قد يكون ميكانيكياً حركياً أو فيزيائياً مادياً.

وفي سياق العمارة الحركية، تناول Barozzi et al (2016) التطبيقات الإنشائية والهندسية للأغلفة الحركية، مؤكداً أن الحركة في الواجهات لا ينبغي أن تكون مجرد استعراض شكلي، بل يجب أن ترتبط بوظائف بيئية محددة تشمل التظليل الشمسي، التهوية الطبيعية، وتوليد الطاقة الكهروضوئية، مع الإشارة إلى التحديات المرتبطة بمتانة المواد خفيفة الوزن وآليات الحركة.

وقام Al-Masrani and Al-Obaidi (2019) بتقديم مراجعة نقدية منهجية صنفوا فيها بارامترات أنظمة التظليل الديناميكية إلى أربعة أبعاد متكاملة:

1. البارامترات الهندسية: (الشكل، الحجم، الاتجاه، نسبة الفتحات).
 2. البارامترات الميكانيكية: (نوع الحركة: دوران، انزلاق، طي، تمدد).
 3. منظومة التحكم: (التحكم الآلي المفتوح أو المغلق، التحكم اليدوي، التحكم المعتمد على الخوارزميات).
 4. استراتيجيات التقييم: (مؤشرات الطاقة، الإضاءة الطبيعية، الراحة البصرية، والراحة الحرارية).
- وأكد Al-Masrani & Al-Obaidi (2019) أن إغفال أي بُعد من هذه الأبعاد أثناء التصميم يؤدي حتماً إلى فشل النظام التكيفي في تحقيق أهدافه البيئية.

وعلى مستوى النماذج الأولية والتطبيق العملي، استعرض Nagy et al (2016) تصميم وتنفيذ مشروع "الواجهة الشمسية التكيفية" (Adaptive Solar Facade) المتطورة في المعهد الفيدرالي للتكنولوجيا في زوريخ (ETH Zurich)، والمكونة من ألواح كهروضوئية حركية تتحرك بواسطة مكابس ضغط معينة. وأظهرت الدراسة أنه على الرغم من النجاح التقني للنموذج الأولي في تتبع مسار الشمس وتوليد الطاقة وحجب الإشعاع، فإن التحديات المتعلقة بالصيانة طويلة الأجل وتأثير الظروف الجوية القاسية أظهرت الفارق الكبير بين البيئة المختبرية والواقع التشغيلي الدائم.

وفيما يتعلق بالعنصر البشري، أجرى Bakker et al (2014) دراسة تجريبية حول رضا شاغليها وتفاعلهم مع الواجهات المؤتمتة ذاتياً. وأشارت النتائج إلى أن الأتمتة الكاملة للواجهات دون إتاحة خيار التدخل اليدوي للمستخدمين تتسبب في شعور بالانزعاج وفقدان السيطرة الشخصية (Loss of Control)، حيث يلجأ المستخدمون أحياناً إلى تعطيل المحركات أو تغطية المستشعرات في حال تسببت حركة التظليل الآلية في حجب غير مرغوب للإضاءة الطبيعية أثناء أداء المهام المكتبية.

أما من الناحية الطاقية، فقد قدم Krarti (2022) تحليلاً كمياً مقارناً لأداء كاسرات الشمس الخارجية الديناميكية في المباني الإدارية عبر إقليمياً مناخياً مختلفاً، مبيناً أن قدرة التظليل الديناميكي على خفض أحمال التبريد تتراوح بين 15% و35% مقارنة بالزجاج المكشوف، ولكن هذه النسبة تنخفض بشكل ملحوظ عند مقارنتها بنظم التظليل الثابتة المجهزة بكاسرات أفقية أو رأسية صُممت بدقة وفق الحسابات الشمسية المترية.

وفي مراجعة شاملة، قيم Avci et al (2025) الأبحاث المنشورة بين أنظمة التظليل التكيفية غير التكيفية، وخلصوا إلى أن تقييم كفاءة التظليل يجب أن يعتمد حتماً على مؤشرات متكاملة تضم استهلاكات طاقة التبريد والإضاءة الاصطناعية بالتوازي مع مؤشرات الراحة البصرية مثل (SDA) و (ASE) ومؤشرات الإجهاد (DGP).

وعلى الصعيد الإقليمي في البيئات الحارة والجافة، درس Humaidan et al (2025) أداء أجهزة التظليل الديناميكية في المباني الإدارية بالمملكة العربية السعودية، مؤكدين أن الأنظمة التكيفية أبدت تفوقاً كبيراً في الاتجاهات الشرقية والغربية التي تتغير فيها زاوية ارتفاع الشمس بسرعة، بينما أظهرت الحلول الثابتة كفاءة قريبة جداً من النظم المتحركة في الواجهات الجنوبية عندما تُصمم بزوايا بروز محسوبة.

وفي أحدث التطورات العلمية، أشار Tungnung (2025) إلى دور التصميم البارامتري السلبي في ضبط غلاف المبنى للمناخات الحارة والجافة، مشدداً على أن الحلول البارامتريّة الثابتة ذات التشكيل الهندسي المتدرج قد تحقق أدائياً قريباً من الواجهات الحركية ودون تكاليف ميكانيكية تشغيلية. وفي ذات السياق، استعرضت دراسة مرجعية نُشرت في مجلة Building and Environment (2026) الواجهات الهيبيريديّة الذكية التي تدمج بين الحركة الميكانيكية البسيطة والمواد المتغيرة الخصائص (Chromogenic Materials)، معتبرة أن تقليل الأجزاء المتحركة يمثل الاتجاه القادم لضمان الموثوقية والصيانة في البيئات القاسية.

منهجية البحث

اعتمدت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي المقارن عبر مراجعة نقدية نوعية (Qualitative Critical Review) لعينة قصدية مكونة من 10 منشورات ودراسات علمية مرجعية محكمة نُشرت بين عامي 2013 و2026 في مجالات ودوريات متخصصة في العمارة والتكنولوجيا البيئية وهندسة المباني.

خطوات ومراحل منهجية البحث

1. تحديد العينة القصدية (10 دراسات محورية بين 2013 - 2026)
 2. استخلاص طبيعة الدليل العلمي ومحاور المقارنة الرئيسية
 3. التركيب التحليلي المقارن (الاستجابة، الحرارة، البصريّات، التشغيل)
 4. إسقاط النتائج والمفاهيم على المعطيات المناخية والبنوية لليبية
 5. صياغة الاستنتاجات والتوصيات التوجيهية للمصممين وصناع القرار
- شملت المادة العلمية الأدبيات التالية:

1. Loonen et al (2013) - المفهوم والتصنيف الأولي للأغلفة التكيفية.
2. Bakker et al (2014) - التفاعل والتفضيل الإنساني ورضا شاغلين.
3. Barozzi et al (2016) - العمارة الحركية والأبعاد الهندسية والإنشائية.
4. Nagy et al (2016) - النماذج الأولية للواجهات الشمسية التكيفية والتطبيق الميداني.
5. Al-Masrani & Al-Obaidi (2019) - البارامترات الهندسية، الميكانيكية والتحكمية للتظليل الديناميكي.
6. Krarti (2022) - التقييم الكمي والطاقي لكاسرات الشمس الديناميكية عبر الأقاليم المناخية.
7. Avci et al (2025) - التحليل المقارن الشامل بين التظليل التكيفي وغير التكيفي.
8. Humaidan et al (2025) - التقييم البيئي والتطبيقي في المناخ الحار والجاف (السعودية).

تقييم فاعلية أنظمة التظليل التكيفية في تحسين الأداء الحراري والبصري للمباني الإدارية في المناطق الحارة والجافة: مراجعة نقدية مقارنة مع دراسة لسياق البيئة الليبية

9. Tungnung (2025) - التصميم البارامتري السلبي والحلول المورية للمناخات الجافة.

10. Building and Environment Review (2026) - الأنظمة الهيبريدية وخوارزميات التحسين متعدد الأهداف.

تمت معالجة البيانات النوعية وتجميع نتائج المراجعة عبر أربعة أبعاد مقايسة رئيسية:

البُعد الأول: الاستجابة الزمنية والقدرة الحركية للغلاف.

البُعد الثاني: الأداء الحراري، استهلاك طاقة التبريد، والتحكم في الكسب الشمسي.

البُعد الثالث: جودة الإضاءة الطبيعية، مستويات الإبهار البصري (Glare)، ورضا شاغلين.

البُعد الرابع: التعقيد التقني والميكانيكي، الصيانة، والملاءمة البيئية للمناخات الحارة والمحملة بالأتربة.

التحليل المقارن والنتائج

يوضح الجدول رقم (1) التقييم النقدي وتصنيف أدلة الدراسات العشر المختارة ضمن المراجعة:

جدول (1): التركيب النقدي المنهجي للبيانات والدراسات المختارة

الدراسة المرجعية	طبيعة الدليل العلمي	الإضافة الرئيسية للتحليل المقارن	حدود الاستدلال المنهجي
Loonen et al. (2013)	مراجعة حالة المعرفة و مراجعة أدبيات تأسيسية	تعريف التكيف و تحديد مفاهيمه وتعدد وظائف الغلاف المعماري.	دراسة نظرية عامة وليست اختباراً تطبيقياً مباشراً لتظليل المكاتب الحارة
Bakker et al. (2014)	دراسة استطلاعية تجريبية و أولية لتفاعل المستخدم	تسليط الضوء على تفاعل المستخدمين وأهمية رضاهم عن الأتمتة والتحكم.	السياق التجريبي محدود ولا يغطي كافة الأقاليم المناخية.
Barozzi et al. (2016)	مراجعة تطبيقات حركية وهندسية	الربط بين مفاهيم الحركة والعمارة المستدامة وتشكيل الواجهات.	لا تقدم مقارنة كمية موحدة للأحمال الحرارية أو الإبهار.
Nagy et al. (2016)	مفهوم وتطوير نماذج أولية (Prototypes)	إثبات إمكانية تنفيذ واجهات شمسية ذكية ومتكيفة.	النماذج المختبرية لا تثبت بالضرورة المتانة والأداء والتشغيل طويل الأجل.
Al-Masrani & Al-Obaidi (2019)	مراجعة نقدية تحليلية	تمييز التصميم والآلية والتحكم والنقييم. وتفصيل المتغيرات الهندسية، الميكانيكية، واستراتيجيات التحكم.	لم تتعمق في تفاصيل تكاليف الصيانة طويلة الأجل.
Krarti (2022)	تحليل طاقي مقارن	قياس أثر التظليل الديناميكي على استهلاك الطاقة للمكاتب.	يركز على الكفاءة العددية دون تفصيل الجوانب البصرية بدقة.
Avcı et al. (2025)	مراجعة مقارنة حديثة	التأكيد على الحاجة الملحة لقراءة مؤشرات الأداء المتعددة.	تفاوت كبير في المناهج وسياقات الحالات المستعرضة.

تقييم فاعلية أنظمة التظليل التكيفية في تحسين الأداء الحراري والبصري للمباني الإدارية في المناطق الحارة والجافة: مراجعة نقدية مقارنة مع دراسة لسياق البيئة الليبية

Humaidan et al. (2025)	تقييم ميداني ومحاكاة إقليمية في مناخ حار جاف	صلة مباشرة بالظروف الإقليمية وتقديم نموذج تطبيق مباشر في سياق مناخي الحار والجاف (السعودية).	لا يمكن تعميم نتائجها الرقمية على المباني الإدارية في ليبيا تلقائياً.
Tungnung (2025)	دراسة تصميم بارامتري	استعراض استراتيجيات التظليل البارامتري نحو مبانٍ صفيرية.	يركز على المناخات الحارة الجافة في الهند وتحتاج مطابقة بيئية.
Building & Environment Review (2026)	مراجعة متقدمة (2026)	دمج خوارزميات التحسين متعدد الأهداف والأنظمة الهيبيريديّة.	التقنيات المتقدمة تتطلب تكاليف استثمارية وتشغيلية عالية.

الاستجابة الزمنية والأداء الحراري والطاقي

تُظهر نتائج المراجعة أن قدرة الواجهات التكيفية على تغيير زوايا البروز والفتحات يوفر مرونة ديناميكية في حجب الإشعاع الشمسي المباشر طوال ساعات اليوم. ومع ذلك، فإن هذه المرونة لا تعني بالضرورة تفوقاً طاقياً مطلقاً وسنوياً مقارنة بالأنظمة الثابتة المصممة بعناية.

ففي دراسات Krarti (2022) و Humaidan et al. (2025)، تبين أن التظليل المتحرك يحقق أدائه الأقصى في الواجهات الشرقية والغربية حيث تكون زوايا الشمس منخفضة وتتغير بسرعة خلال النهار، في حين أن الواجهات الجنوبية في البيئات الحارة الجافة يمكن تظليلها بكفاءة عالية وبنسب متقاربة طاقياً باستخدام كاسرات أفقية ثابتة ذات بروز هندسي محسوب بدقة.

البيئة البصرية، الإضاءة الطبيعية ورضا شاغلين

يتسبب التظليل الشمسي الثابت شديد الحجب في بعض الأحيان في الإفراط في إظلام الفراغات الداخلية، مما يرفع الحاجة للإنارة الاصطناعية. وفي المقابل، تتيح الكاسرات التكيفية ضبط نفاذية الضوء للسماح بمرور الإضاءة النهارية المنتشرة (Diffuse Daylight) ومنع الضوء المباشر المسبب للإبهار (Glare).

لكن دراسة Bakker et al. (2014) كشفت عن إشكالية عملية؛ حيث إن الحركة المستمرة للكاسرات أو التغير اللحظي في مستويات الإضاءة قد يسبب تشتتاً بصرياً ونفسياً لشاغلي المكاتب الإدارية. وأشارت الأدبيات إلى أن برمجيات التحكم التكاسلية أو التحفظية جداً قد تغلق الواجهة كلياً لمنع الإبهار، مما يحرم المكاتب من الضوء الطبيعي ويلغي الفائدة المرجوة من الواجهة الذكية.

جدول المقارنة الوظيفية المتكاملة

يلخص جدول رقم (2) المقارنة النوعية والمفهومية بين التظليل الثابت والتكيفي استناداً إلى المراجعة النقدية للأدبيات:

جدول (2): المقارنة الوظيفية والتشغيلية بين النظم الثابتة والتكيفية

معيار المقارنة الوظيفية	أنظمة التظليل الثابتة (Static Shading)	أنظمة التظليل التكيفية (Adaptive Shading)
الاستجابة الشمسية	محكومة هندسياً وثابتة بالاتجاه التصميمي الأولي.	قابلة للتعديل والتبديل الديناميكي وفق آليات التحكم.
الطاقة والإضاءة	تكون فعالة ومستقرة إذا صُممت بدقة لاتجاه الواجهة.	توازن المؤشرين نظرياً، ولا ضمان لنجاحها دون اختبار واقٍ.
التحكم في الإجهار	مرتبط بالموضع الثابت للكاسرات طوال العام.	إمكانية ضبط آني، مع خطر محتمل للإفراط في الحجب أو التسريب.
التعقيد التشغيلي	منخفض نسبياً، لعدم وجود أجزاء متحركة ميكانيكية.	حساس جداً لبرمجة الضبط، والمشغلات، وتفاعل الشاغلين.
الملاءمة المناخية	تعتمد كلياً على كفاءة التصميم الأولي وموقع المبنى.	تعتمد إضافياً على موثوقية وحدات التحكم واستمرارية الصيانة.

مناقشة لمستلزمات ودلالات وإمكانات التطبيق في البيئة الليبية

تكتسب مناقشة إمكانية ودلالات تطبيق أنظمة التظليل التكيفية والحركية في المباني الإدارية المعمارية في البيئة الليبية أهمية خاصة، بالنظر إلى الخصائص الجغرافية والمناخية، والبنية التحتية، والظروف التشغيلية والاقتصادية القائمة في البلاد. إن نقل التجارب التقنية الصرفة المنفذة في الدول المتقدمة أو البيئات المخبرية وتطبيقها المباشر في ليبيا دون دراسة مسبقة لمعطيات البيئة المحلية قد يؤدي إلى فشل هذه الأنظمة أو تحولها إلى عبء تشغيلي واقتصادي.

التحديات البيئية والهندسية للتطبيق في ليبيا

ساحلي (رطوبة/أمّل): - عواصف قبلي غبارية - انقطاع التيار والتغذية

صحراوي (حرارة) - انسداد المحركات - كلفة الصيانة والكوارث

يمكن تقسيم وتفصيل دلالات ومحددات التطبيق في البيئة الليبية عبر الأبعاد التالية:

التباين الجغرافي والمناخي بين الأقاليم الليبية

تتميز ليبيا بتنوع مناخي واضح يؤثر بشكل مباشر على أداء واجهات المباني:

1. الشريط الساحلي الشمالي (مثل طرابلس، بنغازي، مصراتة، الزاوية):

الخصائص: ينتمي لمناخ البحر الأبيض المتوسط، حيث تكون درجات الحرارة معتدلة إلى مرتفعة صيفاً مع درجات رطوبة نسبية عالية جداً، إضافة إلى هواء محمل بالأملاح البحرية (Marine Aerosols).

الدلالة البيئية: تؤدي الرطوبة العالية والأملاح البحرية إلى تسريع عمليات التآكل والصدأ (Corrosion) للمحركات والمفاصل الميكانيكية والكابلات في الواجهات الحركية، مما يقلل من العمر الافتراضي للمحركات وتصلب كاسرات الشمس المتحركة إذا لم تُصنع من سبائك خاصة ذات تكلفة باهظة (مثل الألومنيوم المؤكسد العالي الجودة أو الفولاذ المقاوم للصدأ L316).

تقييم فاعلية أنظمة التظليل التكيفية في تحسين الأداء الحراري والبصري للمباني الإدارية في المناطق الحارة والجافة: مراجعة نقدية مقارنة مع دراسة لسياق البيئة الليبية

2. المناطق الداخلية والصحراوية الجنوبية (مثل سبها، غدامس، الكفرة، جالو):
الخصائص: مناخ صحراوي شديد الجفاف، يتميز بدرجات حرارة صيفية قياسية، مدى حراري يومي واسع، وإشعاع شمسي مباشر وشديد الشدة طوال العام.
الدلالة البيئية: تتعرض المباني في هذه المناطق للرياح المحملة بالأتربة والدقائق الرملية الناعمة، ولا سيما رياح "القبلي" الحارة. هذه الأتربة تتغلغل في المفاصل الميكانيكية الدقيقة والمحركات والمجاري السلكية لكاسرات الشمس التكيفية، مما يتسبب في انسدادها وتوقفها عن الحركة (Mechanical\ Clogging). كما أن الأتربة المترسبة على المستشعرات الضوئية (Photocell Sensors) المؤتمتة تؤدي إلى قراءات خاطئة تتسبب في إغلاق الواجهة بالكامل أو فتحها في أوقات غير مناسبة.

التوزيع الإقليمي والتحديات المناخية في ليبيا
الشريط الساحلي الشمالي (طرابلس، بنغازي) -> رطوبة عالية + أملاح بحرية -> خطر التآكل والصدأ
المناطق الصحراوية الجنوبية (سبها، غدامس) -> حرارة شديدة + أتربة ورياح القبلي -> انسداد المفاصل

الجاهزية التشغيلية والبنية التحتية

1. استقرار الطاقة والتغذية الكهربائية:
تتطلب الواجهات التكيفية المؤتمتة تغذية كهربائية مستمرة ومستقرة لتشغيل المحركات، أجهزة الاستشعار، ووحدات المعالجة والتحكم المركزي. وفي ظل تذبذب الشبكة الكهربائية العامة أو الانقطاعات المتكررة للتيار في بعض الفترات، فإن الواجهات الحركية قد تتوقف في وضعيات غير مناسبة (مثل وضعية الإغلاق التام أثناء انقطاع الكهرباء)، مما يظل الفراغات الإدارية ويزيد المشكلة تعقيداً، ما لم تدرج نظم تغذية احتياطية معقدة (UPS) مخصصة للواجهة.
2. الكوادر الفنية والصيانة المحلية:
تفتقر السوق المحلية في ليبيا حالياً إلى الشركات المخصصة والكوادر المدربة على صيانة وإصلاح نظم الواجهات الحركية والذكية. إن أي عطل ميكانيكي أو برمجي في واجهة مبنى إداري قد يؤدي إلى تعطيل الواجهة لفترات طويلة لعدم توفر قطع الغيار أو الخبرة الفنية اللازمة، مما يحول الواجهة الحركية من عنصر استدامة إلى تشوه بصري ووظيفي.

الجدوى الاقتصادية وتعريف الطاقة

تخضع أسعار الطاقة الكهربائية في ليبيا لدعم حكومي واسع، مما يجعل تكلفة الكيلوواط/ساعة منخفضة بالمقارنة مع المعايير العالمية. وبناءً على ذلك، فإن حساب "فترة استرداد رأس المال" (Payback Period) للواجهات التكيفية ذات التكلفة التأسيسية العالية جداً (High CAPEX) سيكون طويلاً جداً وقد يتجاوز العمر الافتراضي للمكونات الميكانيكية نفسها. وبالتالي، فإن المبرر المالي الصرف قد لا يكون كافياً لإقناع المستثمرين وصناع القرار بتفضيل هذه الأنظمة، ما لم يُنظر إلى الأمر من منظور تحسين الراحة البصرية وتوفير بيئة عمل صحية.

البدائل المستدامة الموصي بها للبيئة الليبية

في ضوء التحديات البيئية والتشغيلية المذكورة، فإن تطبيق خيار التظليل في المباني الإدارية الليبية ينبغي أن يتجه نحو الاستراتيجيات التالية:

البدائل والحلول التصليلية الموصي بها للبيئة الليبية

1. التظليل البارامتري الثابت المحسوب (Parametric Static Shading)

- كاسرات ثابتة مصممة بارامترياً بزوايا متغيرة حسب اتجاه الواجهة

2. الأنظمة التكيفية السلبية والمواد الذكية (Passive Adaptive)

- زجاج متغير الخصائص (Thermochromic / Electrochromic)

- تقليل الأجزاء الميكانيكية المتحركة لمنع الانسداد والتآكل

3. العمارة التقليدية المطورة (المشربيات الكاسرة)

- تطوير المشربيات وحجابات التظليل المحلية بأسلوب معاصر

1. التظليل البارامتري الثابت المحسوب (Parametric Static Shading):

اعتماد كاسرات شمسية ثابتة ذات تشكيل هندسي متطور يتم تصميمه بارامترياً وفقاً لزوايا الشمس الخاصة بمدينة المبنى (طرابلس $\approx 32.8^\circ \text{N}$ ، سبها $\approx 27.0^\circ \text{N}$). توفر هذه الكاسرات أداءً حرارياً وبصرياً ممتازاً دون أجزاء متحركة ودون الحاجة لصيانة ميكانيكية.

2. الأنظمة التكيفية السلبية والمواد المتطورة (Passive Adaptive Systems):

استخدام الزجاج الذكي متغير الخصائص الضوئية والحرارية تلقائياً استجابةً للحرارة أو الضوء (Thermochromic Glass Electrochromic)، أو الشفرات التي تعتمد على سبيكة تذكر الشكل (Shape Memory Alloys) التي تتحرك حرارياً دون محركات أو كهرباء، مما يلغي مشاكل المحركات البرمجية والانسدادات الرملية.

3. تطوير المفردات المعمارية المحلية:

إعادة إحياء وتطوير كاسرات الشمس التقليدية والمشربيات (Mashrabiya) المصنوعة من مواد محلية متينة ومقاومة للظروف الجوية، والتي توازن بين الحماية الشمسية وتوفير الخصوصية والتهوية.

الاستنتاجات

توصل البحث، من خلال التحليل النقدي الممنهج واستقراء الأدبيات المعاصرة والدلالات التطبيقية، إلى النتائج والاستنتاجات الأساسية التالية:

1. عدم التلازم بين الحركة والتفوق الطاقوي: إن التظليل التكيفي الحركي يوفر مرونة زمنية واستجابة ديناميكية عالية، غير أن هذه الحركة لا تعني حتمية التفوق الطاقوي السنوي مقارنة بالأنظمة الثابتة المصممة بدقة وفق الحسابات الشمسية، خاصة في الواجهات الجنوبية.

تقييم فاعلية أنظمة التظليل التكيفية في تحسين الأداء الحراري والبصري للمباني الإدارية في المناطق الحارة والجافة: مراجعة نقدية مقارنة مع دراسة لسياق البيئة الليبية

2. تشتت الأداء بحسب الاتجاه والمناخ: تتحدد فاعلية الواجهات الحركية بناءً على تفاعل مركب يضم اتجاه الواجهة (أقصى فاعلية في الشرق والغرب)، نوع الزجاج ومعاملاته الحرارية، وخوارزميات التحكم البرمجي، ومدى قبول الشاغلين للحركة.
3. صعوبة تعميم الأرقام: تؤكد الأدبيات عدم جواز نقل ونسب أرقام أو معدلات توفير طاقة محددة (مثل 30% أو 40%) من دراسة تجريبية في دولة أخرى وإسقاطها فوراً على المباني الإدارية الليبية دون إجراء نمذجة حاسوبية محلية مطابقة للظروف الجوية ونمط الإشغال.
4. العوائق البيئية والتشغيلية في ليبيا: تشكل الرطوبة والأملاح في الشريط الساحلي الليبي، والأتربة والرياح الصحراوية في الجنوب، والانقطاعات الكهربائية ومحدودية صيانة الأنظمة الذكية، عوائق جوهرية تقيد من فرص النجاح التشغيلي للواجهات الميكانيكية التكيفية المعقدة.
5. رجحان الحلول البارامترية السلبية: بالنسبة للمباني الإدارية في ليبيا، تُعد الحلول البارامترية الثابتة والأنظمة الذكية السلبية الخالية من الأجزاء الميكانيكية خياراً أكثر استدامة وموثوقية وجدوى اقتصادية في الوقت الراهن.

التوصيات

استناداً إلى استنتاجات الدراسة، يتقدم البحث بمجموعة من التوصيات والمبادئ التوجيهية الحاكمة للمصممين المعماريين، المهندسين الاستشاريين، وصناع القرار في قطاع المباني الإدارية والإنشاءات في ليبيا:

أ. توصيات للمصممين المعماريين والمهندسين الاستشاريين

1. التصميم البيئي المتكامل أولاً: إعطاء الأولوية في المراحل المبكرة من التصميم للحلول المعمارية السلبية (Passive Design) عبر توجيه المبنى، كتلة المبنى، ونسب الفتحات الزجاجية (WWR) قبل اللجوء للأنظمة التكيفية الميكانيكية.
2. اعتماد النمذجة البارامترية الثابتة: عند تصميم كاسرات الشمس للمباني الإدارية في ليبيا، يُوصى بتطوير كاسرات ثابتة ذات زوايا ميل وبرزوز مختلفة بحسب الاتجاهات الشمسية لكل مدينة بدلاً من اعتماد تشكيل ثابت موحد لجميع الواجهات.
3. مراعاة الراحة البصرية والشاغلين: عند استخدام أي نظام تظليل (ثابت أو متحرك)، يجب عدم التركيز حصراً على تقليل أحمال التبريد، بل ضمان نفاذ الضوء المنتشر ومنع الإبهار المباشر، مع توفير إمكانية التحكم اليدوي لشاغلي المكاتب.

ب. توصيات لمؤسسات الدولة وصناع القرار

1. تحديث الكودات والمعايير الوطنية: وضع معايير وضوابط كفاءة الطاقة في غلاف المباني الإدارية ضمن كود البناء الليبي، مع تحديد الاشتراطات الفنية للنوافذ ونظم التظليل.
2. تشجيع البحوث التطبيقية والمحاكاة: دعم المراكز البحثية والجامعات الليبية لإجراء دراسات محاكاة حاسوبية رقمية (Dynamic Building Simulation) واختبارات ميدانية بكوادر محلية لتقييم الأداء الحراري والبصري لنماذج تظليل مختلفة تحت الظروف المناخية لمدن مثل طرابلس، بنغازي، وسبها.
3. مراعاة تكاليف دورة الحياة (LCC): تقييم جدوى أنظمة التظليل استناداً إلى تكاليف دورة الحياة الكاملة (التأسيس، التشغيل، والصيانة طويلة الأجل) وعدم الاكتفاء بالتكلفة الأولية أو بالوعود النظرية للتوفير الطاقوي.

المراجع

1. Al-Masrani, S. M., & Al-Obaidi, K. M. (2019). Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. *Automation in Construction*, 102, 195–216. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014>
2. Avci, P., Ekici, B., & Kazanasmaz, Z. T. (2025). A review on adaptive and non-adaptive shading devices for sustainable buildings. *Journal of Building Engineering*, 100, 111701. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.111701>
3. Bakker, L. G., Hoes-van Oeffelen, E. C. M., Loonen, R. C. G. M., & Hensen, J. L. M. (2014). User satisfaction and interaction with automated dynamic facades: A pilot study. *Building and Environment*, 78, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.007>
4. Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The sustainability of adaptive envelopes: Developments of kinetic architecture. *Procedia Engineering*, 155, 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.029>
5. Building and Environment (2026). *Advanced hybrid shading systems and multi-objective optimization for indoor thermal-visual comfort*. Special Review Issue on Sustainable Building Envelopes, 114905.
6. Humaidan, O., Almazam, K., Bashir, F. M., Alshayeb, M. J., Al-Tamimi, N., & Dodo, Y. A. (2025). Comprehensive assessment of dynamic shading devices for daylighting and energy management in Saudi Arabian hot-arid buildings. *Energy and Buildings*, 346, 116180. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116180>
7. Krarti, M. (2022). A comparative energy analysis of dynamic external shadings for office buildings. *ASME Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities*, 3(2), 021001. <https://doi.org/10.1115/1.4054775>
8. Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. M. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>
9. Nagy, Z., Svetozarevic, B., Jayathissa, P., Begle, M., Hofer, J., Lydon, G., Willmann, A., & Schlueter, A. (2016). The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes. *Frontiers of Architectural Research*, 5, 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.03.002>
10. Tungnung, K. (2025). Parametric passive design strategy towards sustainable net-zero energy buildings in hot-dry climate zones of India. *Solar Energy*, 113515. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113515>

تقييم فاعلية أنظمة التظليل التكيفية في تحسين الأداء الحراري والبصري للمباني الإدارية في المناطق الحارة والجافة: مراجعة نقدية
مقارنة مع دراسة لسياق البيئة الليبية