مستقبل الواجهات التكيفية : المفاهيم والتقنيات والأداء

حنان سليمان عيسى محمد
مدرس بقسم الهندسة المعمارية، كلية الهندسة بالمطرية، جامعة حلوان

ملخص البحث:

خلال العقود الماضية ساهمت الإبتكارات والتطورات التقنية في تحسين كفاءة أداء العديد من عناصر البناء مثل الأغلفة والأسقف والنوافذ والجدران....ألخ ، وذلك من خلال ترجمة مصطلح ديناميكي الى وظائف وسلوك وأستجابة لمكونات البناء لتتغير بمرور الوقت لتحقيق التكيف مع متطلبات المستخدمين الداخلية الديناميكية من جهة ومع المؤثرات والظروف المناخية الخارجية المتغيرة من جهة أخرى، ومن هنا ظهر مصطلحات المباني التكيفية والمستجيبة والحركية، وتوفر واجهات المباني التكيفية تحسينات كبيرة في كفاءة إستخدام الطاقة وراحة المستخدمين من خلال قدرتها على الاستجابة وتغيير سلوكها وفقا للمؤثرات الداخلية والخارجية عن طريق المواد والمكونات والأنظمة، والتي تطورت بشكل كبير في الوقت الحالي وهناك اهتمام متزايد بدراسة وتطويرمكوناتها وتقنياتها لتحقق وظائفها المتعددة وتتكيف مع بيئتها المحيطة ومتطلبات راحة ورفاهية المستخدمين، ومن المتوقع زيادة الحلول المبتكرة لها في المستقبل القريب، بالرغم من ذلك هناك فجوة معرفية ونقص في الدراسات البحثية حول تصور الاتجاهات المستقبلية لها مما يلزم إجراء دراسات أكثر شمولاً حول مستقبل الواجهات التكيفية.

وتقوم الدراسة بالتحقق من المفاهيم الرئيسة والإتجاهات الحالية للواجهات التكيفية ودراسة المواد والمكونات والأنظمة والتقنيات لها مع التركيز بشكل خاص على فهم كيفية أداءها من خلال تحليل مجموعة من الحالات الدراسية ، للوصول لصياغة إطار متكامل للمفاهيم والأنظمة والتقنيات المستقبلية للواجهات التكيفية ، بهدف المساهمة في التطورات المستقبلية لها وتحسين أداءها وأن تحقق كامل إمكاناتها في التكيف مع مؤثرات البيئة المحيطة وتوفير الطاقة وتحسين رضا المستخدمين.

الكلمات الدالة: التكيف ، الواجهات التكيفية ، المكونات ، الأداء ، أنظمة التحكم.

المقدمة :

الواجهة عبارة عن غلاف يفصل بين بيئتين في تحول مستمر ومع ذلك ، يتم تصميمه غالباً بمكونات ثابتة تعمل بنفس الطريقة في ظل ظروف مختلفة، هذه الخاصية إلى جانب عوامل أخرى هي السبب في أن المباني تمثل ٤٠ ٪ من الطلب على الطاقة ، وتعد الواجهات من العناصر الرئيسية في المباني التي تؤثرعلى أداء الطاقة لذلك يجب تصميم عناصر الواجهات بحيث توفر المرونة اللازمة وكفاءة الأداء من حيث تدفق الطاقة والراحة للمستخدمين، لذلك تطلبت واجهات المباني أنظمة ديناميكية ذات كفاءة عالية في استخدام الطاقة وقادرة على الاستجابة للتغييرات المستمرة في الظروف والتغييرات الخارجية للمبنى ومتطلبات راحة المستخدمين في البيئات الداخلية ، ومن هنا ظهر مفهوم الواجهات التكيفية التي تستند على الأداء والتقنيات المتقدمة في قدرتها على التكيف والاستجابة الديناميكية.

المشكلة البحثية :

تطورت الواجهات التكيفية بشكل كبير في الوقت الحالي وهناك اهتمام متزايد بدراسة وتطويرمكوناتها وتقنياتها لتحقق وظائفها المتعددة وتتكيف مع بيئتها المحيطة ومتطلبات راحة ورفاهية المستخدمين، ومن المتوقع زيادة الحلول المبتكرة لها في المستقبل القريب، بالرغم من ذلك هناك فجوة معرفية ونقص في الدراسات البحثية حول تصور الاتجاهات المستقبلية لها مما يلزم إجراء دراسة أكثر شمولاً حول مستقبل الواجهات التكيفية في ٣ محاور رئيسية هي (المفاهيم – التقنيات – الأداء) .

أهداف البحث:

الهدف من هذه الدراسة هو التحقق من المفاهيم الرئيسة والتقنيات الحالية للواجهات التكيفية (مواد ومكونات وأنظمة) مع التركيز بشكل خاص على فهم كيفية أداءها، للوصول لصياغة إطار متكامل للمفاهيم والأنظمة والتقنيات المستقبلية للواجهات التكيفية بهدف المساهمة في التطورات المستقبلية لها وتحسين أداءها وأن تحقق كامل إمكاناتها في التكيف مع مؤثرات البيئة المحيطة وتوفير الطاقة وتحسين رضا المستخدمين.

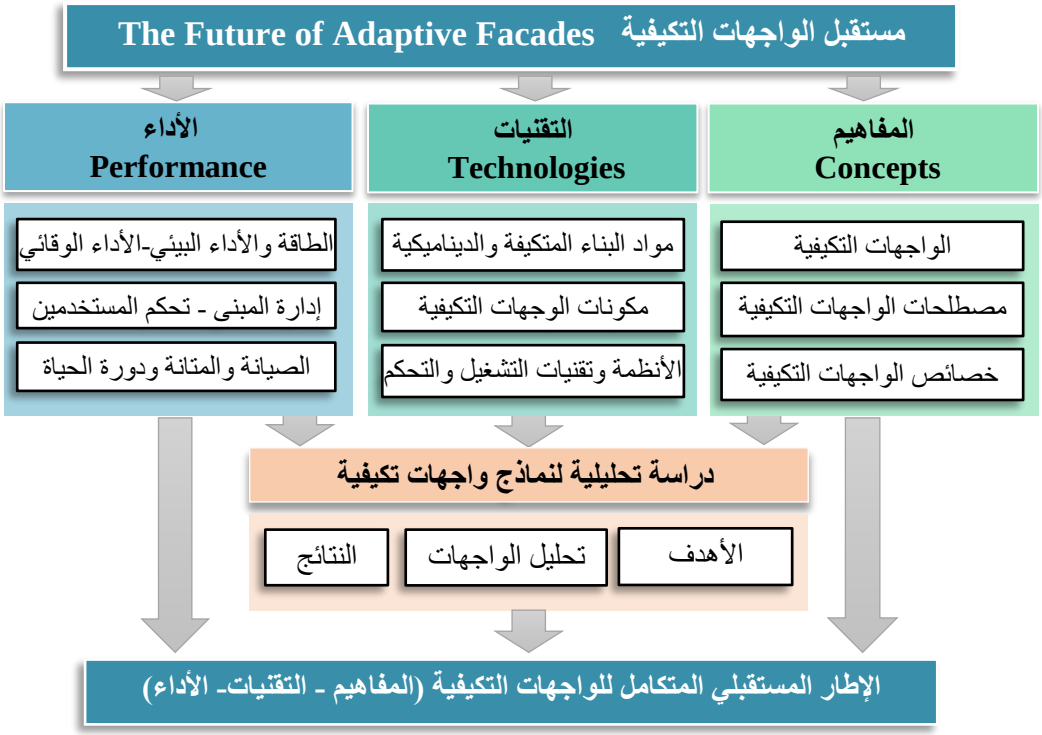
منهجية البحث:

تقوم الدراسة على٣ مراحل أساسية يتم فيها استخدام المناهج التالية :

- **المنهج الوصفي التحليلي** في التعرف على مجموعة من المفاهيم التي تتعلق بالواجهات التكيفية ومصطلحاتها وخصائصها ثم التعرف على التقنيات الحالية ودراسة وتحليل المواد والمكونات والأنظمة المكونة لها مع التركيز على فهم كيفية أداءها .
- **المنهج التحليلي المقارن :** تحليل ومقارنة مجموعة من حالات الدراسة لواجهات تكيفية بهدف التحقق من الإتجاهات الحالية وتصور الإتجاهات المستقبلية لها.
- **المنهج الاستنباطي:** في الوصول لصياغة إطار متكامل للمفاهيم والأنظمة والتقنيات المستقبلية للواجهات التكيفية.

هيكل البحث:

تقوم الدراسة على ٣ محاور رئيسية للواجهات التكيفية هي (المفاهيم – التقنيات –الأداء)، ثم يتم تحليل مجموعة من الحالات الدراسية لواجهات تكيفية حديثة حالية ، للوصول لصياغة إطار متكامل للمفاهيم والأنظمة والتقنيات المستقبلية للواجهات التكيفية - شكل (١):



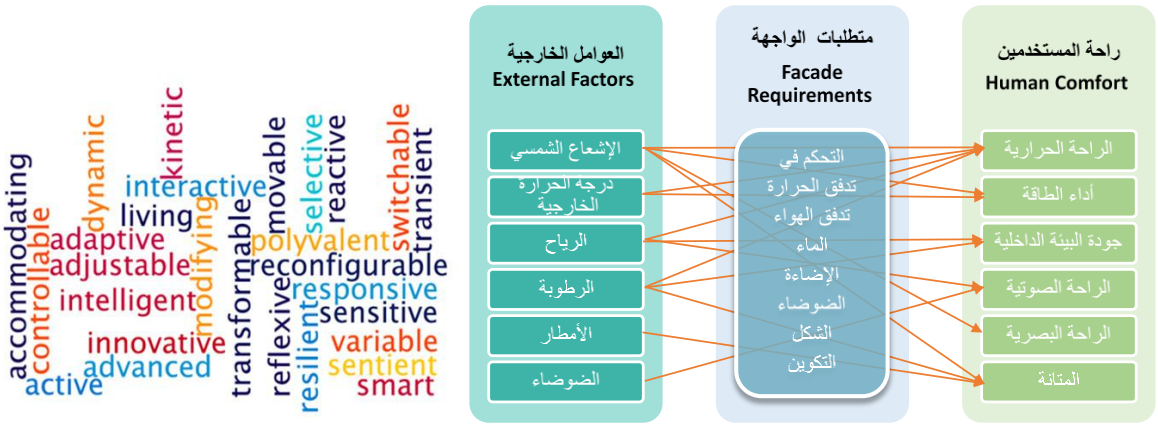
شكل (١) هيكل البحث – المصدر: الباحث

١. مفاهيم المباني والواجهات التكيفية .

يُعرف التكيف في علم الأحياء على أنه أي تغير يطرأ على الكائن الحي لتحسين أداءه في بيئته، والتكيف هو شرط أساسي لتحقيق الاستمرارية، وأي كائن لا يستطيع التكيف معرض للانقراض، ومن هذا المنطلق القدرة على التكيف في المباني هي القدرة على التغيير لتلبية الاستخدامات المختلفة، مما يتيح تكوينات مكانية ووظيفية مختلفة وتحديث التقنيات دون الحاجة إلى تعطل كبير في المبنى والأنشطة الجارية والبيئة، وعلى هذا الأساس تلعب القدرة على التكيف دورا رئيسياً في تحسين سمات المبانى المستدامة وإمكانية الاستمرار عبر الزمن بينما تستمر عناصر البناء ومكوناته في التغيير وذلك يولّد العديد من الفرص للمبنى [1].

١-١ الواجهات التكيفية

تتكون المباني التكيفية من أنظمة متعددة الوظائف والفاصل المادي فيها بين البيئة الداخلية والخارجية (أي غلاف المبنى) قادر على تغيير وظائفه أوخواصه أو سلوكه مع مرور الوقت استجابة لمتطلبات الأداء للظروف المتغيرة ، وذلك بهدف تحسين الأداء الكلي للمبنى [2] ، وحيث أن الواجهة عبارة عن غلاف يفصل بين بيئتين في تحول مستمر، ومع ذلك يتم تصميم هذا الغلاف غالباً بمكونات ثابتة تعمل بنفس الطريقة في ظل ظروف متغيرة لذلك وإلى جانب عوامل أخرى تستهلك المباني ٤٠ ٪ من الطلب على الطاقة، ومن هنا جاءت ضرورة تخفيض هذه النسبة المئوية بهدف تقليل استهلاك المباني من الطاقة ، وبدء المفهوم الجديد للواجهة التكيفية التي يمكنها الاستفادة من البيئة الخارجية بهدف تحسين البيئة الداخلية أو لحماية المبنى من التأثير السلبي للبيئة الخارجية، وبنفس الطريقة يمكن أن يحدث الاختلاف في الواجهة بسبب تغيير الظروف الداخلية التي لم تعد تلبي الإحتياجات الداخلية للمستخدمين يؤكد هذا التعريف على العلاقة بين البيئة الداخلية والخارجية وهو الأكثر تأثيرا على مستقبل الواجهات التكيفية فالقوة الدافعة للتكيف فيها، هي قدرة التفاعل مع البيئة والمستخدمون [3] - الشكل (٢).



شكل(٢) وظائف الواجهات التكيفية - المصدر : الباحث من [4]

شكل (٣) مصطلحات التكيف في الواجهات [4]

١-٢ مصطلحات التكيف في الواجهات.

مصطلح التكيف في سياق الواجهات غالبا ما يرتبط مع قائمة طويلة من المصطلحات المماثلة حيث يمكن وصفها بأنها نشطة ، متقدمة ، ديناميكية ، ذكية ، حركية ، سريعة الاستجابة ، ذكية ، قابلة للتحويل.... وما إلى ذلك ، كما هو موضح في الشكل (٣)، وهو ما يشير إلى القدرة على الاستجابة أو الاستفادة من الظروف المناخية الخارجية لتلبية احتياجات شاغلي المباني بشكل ناجح [4] ، وفيما يلي بعض المصطلحات الحالية للواجهات التكيفية [5].

١-٢-١ الواجهات النشطة Active Façades

تعتمد على أنظمة تقنية تحتوي على عناصر متكاملة يتم من خلالها ضبط الواجهات ذاتياً للتغيرات التي تبدأ من بيئات المبنى الداخلية أو الخارجية ، مما يحقق ظروف الراحة مع تقليل استهلاك الطاقة، وتكون هذه الميزات النشطة تلقائية ويدوية على حد سواء ، ولا تحتاج إلى تضمين الإلكترونيات المتطورة .

١-٢-٢ الواجهات المتقدمة Advanced Façades

الواجهة المتقدمة هي التي تحمي المبنى من الطقس وتساهم في متطلبات التدفئة والتبريد والتهوية والإضاءة ويمكن أن تعزز الراحة الداخلية من خلال تدابير فعالة وموفرة للطاقة، والفرق الرئيسي بين مفاهيم الواجهة المتقدمة ومفاهيم والواجهات الأخرى ذات الكفاءة في استخدام الطاقة، هو تطبيق عناصر البناء سريع الاستجابة وتكاملها مع أنظمة خدمات المباني وأنظمة الطاقة مع التحكم المتقدم.

١-٢-٣ الواجهات الحركية Kinetic Façades

تُعد الواجهة الحركية نظاماً تقنياً يوجد فيه نوع معين من الحركة وقادر على التنقل والتغير لجميع أجزائه أو جزء منه، ويشير مصطلح "حركي" أيضاً إلى استجابة الكائن الحي لنوع معين من المحفزات، وكذلك يمكن للواجهة الحركية الإستجابة للمؤثرات الخارجية والمتطلبات الوظيفية المختلفة إعتمادا على قوة تشغيل تولد الحركة [6].

١-٢-٤ الواجهات الذكية Intelligent Façades

الواجهات الذكية هي تلك التي تجمع بين التقنيات النشطة واستراتيجيات التصميم السلبي لتوفير أقصى راحة للمستخدمين باستخدام الحد الأدنى من الطاقة، ويتم فيها دمج جميع مكونات خدمات المباني ، ويشير مصطلح "ذكي" عند تطبيقه على الواجهة إلى قدرة الواجهة على الاستجابة للتغير وفقاً للظروف البيئية من خلال إعادة التكوين التلقائي لأنظمتها لتأدية وظائفها الأساسية [7]، ولديها القدرة على الإدراك والتفكير والعمل وتغيير نفسها من خلال الضبط الذاتي ، وتحسين أنظمة المبنى فيما يتعلق بالمناخ وتوازن الطاقة وراحة الإنسان – شكل (٣).

١-٢-٥ الواجهات التفاعلية Interactive Façades

تم استخدام مصطلح "تفاعلي" بشكل أقل تكراراً فيما يتعلق بواجهات المباني مقارنة بالأعمال الفنية التي تعمل بالكمبيوتر وغيرها من البيئات المماثلة التي تشجع على المشاركة العامة النشطة، ومع ذلك تتطلب الواجهة التفاعلية مدخلات بشرية لبدء الاستجابة، وقد تكون مجهزة أيضاً بنظام آلي لإدارة المباني ومبرمجة لتحسين توفير الطاقة مع ضمان راحة المستخدمين في نفس الوقت [8].

١-٢-٦ الواجهات المستجيبة Responsive Façades

يمكن تعريف واجهات المباني سريعة الاستجابة على أنها أنظمة تكنولوجية تؤثر فيها الظروف البيئية الخارجية (مثل التهوية والرطوبة وحجم الضوء والإشعاع ودرجة الحرارة) على الراحة الداخلية للمبنى ، وتعتمد الحلول الأكثر شيوعاً على العديد من الأنظمة الفرعية المتخصصة (مثل العناصر الهيكلية ، وأجهزة الاستشعار ، والمحركات الميكانيكية ، والأغشية ، وأجهزة التحكم .....وما إلى ذلك) المسؤولة عن تغيير هندسة الغلاف وفقاً للتحفيز والأداء المبرمج [9]- شكل(٤).

١-٢-٧ الواجهات قابلة للتحويل Transformable Façades.

يتم ضبط استجابة الواجهات القابلة للتحويل بكفاءة وفقاً للظروف الخارجية مثل المؤثرات المناخية أو المتطلبات الوظيفية المختلفة أو حالات الطوارئ، ولذلك هناك حاجة إلى قوة تفعيل تولد الحركة لكي يتم التحويل من تكوين مضغوط إلى تكوين موسع أو العكس، ويجب أن تتكون مرحلة التحول من حركات مضبوطة ومستقرة وينتج عنها بنية صلبة وآمنة بمجرد تثبيتها في مكانها- شكل (٥).

١-٢-٨ الواجهات القابلة للتبديل Switchable Façades

وهي واجهات شفافة يتم فيها دمج الزجاج الذكي أو المواد التكيفية الذكية لتنظيم الضوء وتدفق الطاقة من خلال الواجهات الزجاجية.

شكل (٣) الواجهة الذكية لمبنى Active energy building في برلين ٢٠١٨ م [10]

شكل (٤) الواجهة المستجيبة لمبنى Kolding Campus بالدنمارك- ٢٠١٥م [11]

شكل(٥) الواجهة القابلة للتحويل لمبنى Hudson Yards مانهاتن – ٢٠١٩ م [12]

١-٣ خصائص الواجهات التكيفية .

وتختلف طريقة تطبيق مفهوم القدرة على التكيف في الواجهات وفقاً للخصائص التالية :

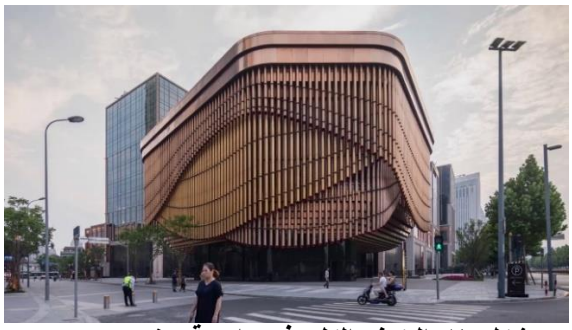
١-٣-١ السلوك Behavior

يمكن للواجهة التكيفية أن تتصرف بطريقة ديناميكية أو ثابتة وفقاً للمواد والتقنيات المستخدمة ، حيث يمكن للواجهة أن تستجيب للحافز على نطاق جزئي أو كلي.

أ- **التكيف الجزئي :** من خلال السلوك الإستاتيكي Static Behavior عن طريق اختلاف الهيكل الداخلي للمادة بسبب اختلاف الخواص الكيميائية أو الفيزيائية، حيث يحدث تغيير الحالة بسبب تحول الطاقة من شكل إلى آخر ينتج عنه تغيير في أداء المادة [13] ، مثال على تطبيق هذه التقنية هو الزجاج القابل للتحويل والذي يمكنه تغيير خصائصه البصرية بسبب تغير درجة الحرارة أو الضوء أو الكهرباء- شكل (٦).

ب- **التكيف الكلي :** من خلال السلوك الديناميكي dynamic Behavior لمكونات الواجهة عن طريق الاستجابة لمحفزات ترتبط بأجهزة استشعار تقيس الظروف المناخية الخارجية أو الداخلية ووفقاً لحجم المكون الحركي [3] ، والمثال الأكثر شهرة على ذلك هو نظام التظليل – شكل (٧)، ويحدد نمط الحركة وفقاً للإزاحة الموضعية حيث تحدث الحركة بشكل أساسي بثلاث طرق هما: التغيرالجزئي أو التغيير الكامل أو الجمع بينهما، ومن أمثلة الحركة التى تم تطبيقها فى أنظمة الواجهات التكيفية الديناميكية (الدوران- الطى- الغلق - الفتح).

شكل (٦) التكيف الجزئي والاستجابة للظروف المناخية الخارجية من خلال التصميم المبتكر للواجهة - مبنى JTI بسويسرا -٢٠١٥ م [14]



شكل (٧) التكيف الكلي في واجهة مبنى Bund Finance Center شنغهاي ٢٠١٧ م - يتكون غلافه من ثلاث طبقات من الأنابيب التي تعمل كتظليل ديناميكي [15]

١-٣-٢ عامل التكيف Agent of Adaptation

ويطلق على العوامل التي تثير عنصر الإستجابة في المبنى وتشمل [13]:

- **العوامل الخارجية:** مثل (الإشعاع الشمسي - درجة الحرارة - الرطوبة - الرياح - هطول الأمطار- الضوضاء).
- **العوامل الداخلية :** مثل (درجة الحرارة - الرطوبة - الضوء - معدل تبادل الهواء - مستوى الصوت)، ويتم تشغيل الواجهة التكيفية في الغالب بتأثير من العوامل الخارجية ومع ذلك ، فإن التواصل بين البيئة الداخلية والخارجية هو الطريقة الأكثر فعالية لتوفير الطاقة في المبنى.

١-٣-٣ التحكم في القدرة على التكيف واستهلاك الطاقة

اعتماداً على العنصر التكيفي ، يمكن أن تكون **الاستجابة ذاتياً intrinsic** - عندما يحدث التغيير تلقائياً في المادة أو تكون **الإستجابة خارجياً extrinsic** عندما يحدث التكيف استجابة لإشارة مرسلة من جهاز استشعار، في الحالة الأولى يُطلق على النظام **حلقة مفتوحة** open loop وعادة لا يتطلب أي طاقة إضافية، على العكس من ذلك يطلق على الأخير نظام **حلقة مغلقة** closed loop وله ٣ أنظمة تنظم العملية ولذلك تتطلب الحلقة المغلقة مصدر للطاقة [16]- شكل (٨).

١-٣-٤ أنظمة التحكم في الواجهات التكيفية الديناميكية.

نظام التحكم Control system هو جهاز أو مجموعة من الأجهزة التي تدير أو توجه أو تنظم سلوك الأجهزة أو الأنظمة الأخرى ويتكون نظام التحكم من ٣ مستويات [17] :

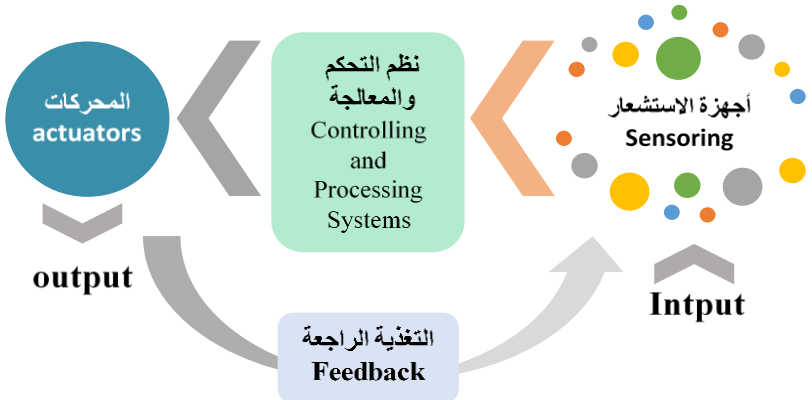
أ- **أنظمة الإدخال Iput:** يتم تمثيلها في أجهزة الاستشعار وأساليب الإدخال المختلفة ، والتي تعطي معلومات مختلفة حول البيئة المحيطة، وهناك خمسة أشكال لها : الإدخال اليدوي - أجهزة الاستشعار والكاشفات - المعلومات مسبقة الإدخال - البرمجة اليدوية - الإنترنت

- **الإدخال اليدوي:** إعطاء الأوامر مباشرة من المستخدم دون الحاجة إلى طرق تحكم مختلفة مثل الضغط على مفتاح للتشغيل أو للتعليق.
- **أجهزة الاستشعار:** هى أجهزة ذات تقنيات ذكية ، تقوم بالأحساس بالتغيرات البيئية مثل(الإشعاع الشمسي، التلوث، والضوضاء..... وغيرها) ثم تقوم بجمع البيانات وإعطاء النظام أشارة ليقوم بالتغيرات المطلوبة حسب البيانات المجمعة، وقد تطورت تقنيات الاستشعار والتشغيل في السنوات الأخيرة حيث تم تطوير أنظمة ذات مستشعرات مختلفة مثل الأنظمة التي لا تحتوي على تفضيلات مستخدمي أجهزة الاستشعار، والأنظمة التي لا تحتوي على خوارزميات مضبوطة مسبقاً على المستشعرات، والأنظمة المزودة بأجهزة استشعار مركزية، والأنظمة المزودة بأجهزة استشعار لامركزية ، والأنظمة المزودة بأجهزة استشعار المواد.
- **المعلومات مسبقة الإدخال** : حيث يتم تزويد النظام بمعلومات لاتخاذ القرارات الضرورية دون الحاجة إلى أجهزة استشعار مثل القرارات المتعلقة بالوقت .
- **البرمجة اليدوية:** والتي يمكن استخدامها اعتماداً على ظروف تشغيل المبنى وتعديل برامج التشغيل وفقاً لراحة المستخدم أو الشخص المسؤول عن نظام التشغيل بحيث تتوافق مع جميع الظروف المختلفة.
- **الإنترنت:** يمكن توصيل النظام بالإنترنت للحصول على معلومات إضافية مثل المناخ وغيرها أو التحديثات المتعلقة بهذا النظام من قبل الشركة المصنعة.

ب- **نظم التحكم والمعالجة Controlling and Processing Systems :** وتتمثل في وحدة الحاسب الآلي والبرامج المثبتة عليه، استنادا على قواعد البيانات أو برامج الذكاء الصناعي لتحقيق الإستجابة المطلوبة من خلال وحدات تحكم بإحدى الطرق حيث تنقسم إلى عدة أنواع هي :

- **أنظمة تعمل يدوياً** : وتعتمد على العناصر التي يمكن تحريكها عن طريق التحكم اليدوي
- **أنظمة مفتاح التحكم:** تعمل من خلال الضغط على مفتاح التشغيل أو التعليق
- **أنظمة تحكم مركزية:** وتتمثل في وحدة تحكم واحدة تسيطر على كافة أركان وأجزاء المبنى وتوفر التكامل بين كافة أنظمة المبنى وإتخاذ القرار المتكامل والأنسب الذي يجمع بين العديد من المؤثرات المختلفة.
- **أنظمة تحكم لامركزية:** وتتمثل في وحدات تحكم متعددة تتواجد في نقاط متفرقة من المبنى، وتوفر الإستقلالية في إتخاذ القرار دون الرجوع للوحدة المركزية .
- **أنظمة تحكم قائمة على المواد:** تتوقف فيها القدرة التكيفية على المواد الذكية.

ج - **أنظمة الإخراج Output:** تتمثل في الإستجابة الحادثة على مستوى العناصر المختلفة بالمبنى سواء تحريك أو توجيه بعض العناصرأو في تشغيل أو إيقاف بعض وحدات الإضاء أو غير ذلك، ومن أهمها **المحركات actuators** وهى الأجهزة المسؤلة عن التغير فى العنصر المتحرك وفقاً للأوامر الصادرة من عمليات وحدة التحكم ، وغالبا يكون مصدر الطاقة أما كهربيائية أو المحركات التي تعتمد على الضغط مثل المكابس الهيدروليكية والمحركات الهوائية ومحركات المواد [18] .



شكل(٨) الحلقة المغلقة closed loop للتحكم في الواجهات التكيفية ، المصدر: الباحث

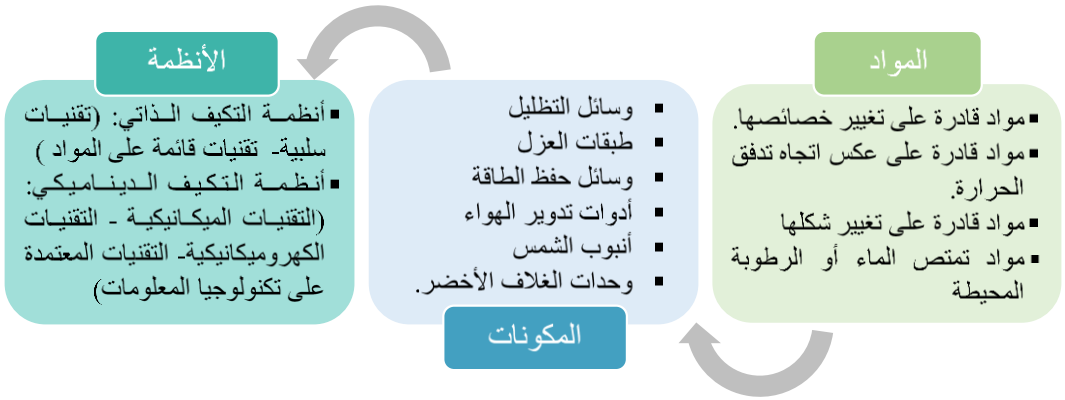
هذه المنظومات الثلاثة تستمر في العمل والتغذية الراجعة Feedback ، فبناء على نتائج نظم الإخراج تتغير حالة البيئة المحيطة فتقوم المستشعرات بقراءة جديدة وتخبر الحاسب بالمعلومات الجديدة ليبدأ في تغيير الحركة – شكل (٨).

١-٣-٥ زمن الاستجابة Response time

بينما يحافظ المناخ الداخلي على نفس المتطلبات تقريباً تتغير الظروف الخارجية بشكل كبير على مدار العام، وبالتالي فإن واجهة المبنى يجب أن تستجيب لذلك للحفاظ على الراحة في الأماكن المغلقة [13]، ويُحدد وقت الاستجابة إعتماداً على نوع المتطلبات وخاصية الواجهة وطبيعة المحرك ، ففي حالة وجود تقنية حلقة مغلقة closed loop يمكن التحكم في زمن الاستجابة بسهولة أكبر [3].

٢. تقنيات الواجهات التكيفية .

تتكون الواجهات التكيفية من أنظمة متعددة الوظائف عالية التكيف، حيث تكون الواجهة بمثابة الفاصل المادي بين البيئة الداخلية والخارجية القادرعلى تغيير وظائفه أو ميزاته أو سلوكه بمرور الوقت، استجابةً لمتطلبات الأداء وأحتياجات المستخدمين من خلال قدرتها على الاستجابة وتغيير سلوكها وفقا للمؤثرات الداخلية والخارجية، عن طريق ٣ عناصر رئيسة هي (المواد - المكونات - الأنظمة) والتي تطورت بشكل كبير في الوقت الحالي – شكل(٩).



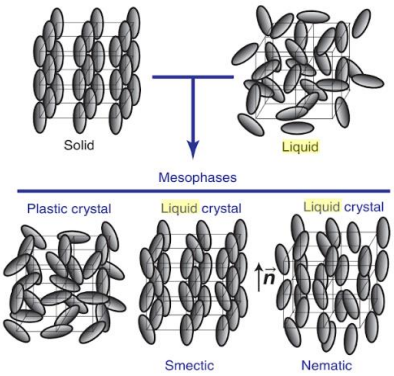
شكل(٩) العناصر الرئيسية للواجهات التكيفية ، المصدر: الباحث من [19]

٢-١ مواد الواجهات التكيفية.

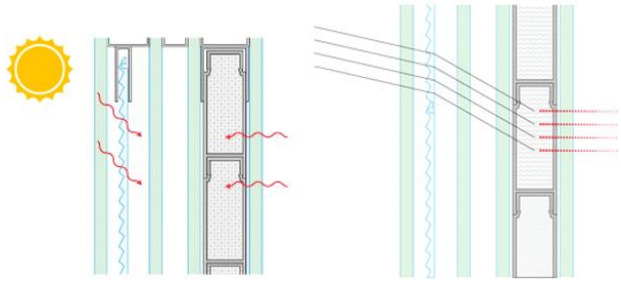
تلعب المواد في واجهات المباني التكيفية دوراً رئيسياً في استهلاك الطاقة وتحدد خصائص هذه المواد الأداء التشغيلي لها، ويتم تصنيف المواد التكيفية وفقاً لسلوك أو أداء ديناميكي يمكنهم تقديمه استجابة لحافز محدد أو أكثر من العوامل البيئية ، من خلال قدرة المادة على تعديل إحدى مميزاتها أو خصائصها وفهم الظروف التي قد تحدث، وتقسم هذه المواد إلى أربعة فئات رئيسية محددة حسب نوع التفاعل وهي[19] :

٢-١-١ مواد قادرة على تغيير خصائصها (تغيير اللون أو التعتيم) وتشمل:

- **مواد التلون حراري thermochromic** هي مواد تغير لونها أو شفافيتها عندما تصل الي درجة حرارة محددة.
- **مواد التلون الكهربائي electrochromic** وهي المواد التي تتغير من الصفاء الى الإعتام عند تعرضها لتيار كهربائي وتستخدم في النوافذ للتحكم في الإشعاع الشمسي.
- **مواد التلون الضوئي photochromic** وهي المواد التي يتغير لونها أو درجة شفافيتها عند تعرضها لطول موجة محددة من الإشعاع الشمسي، بجانب خصائصها الجمالية نتيجة تغيير لونها فلها فوائد في تقليل إستهلاك الطاقة والتحكم في الإشعاع الشمسي.
- **البلورات السائلة الحراريّة Thermotropic liquid crystals** وهي مواد في حالة بين الصلد والسائل فحين تعرضها لدرجة حرارة معينة تصبح بلورات سائلة تمتاز هذه البلورات السائلة بأن جزيئاتها تتدفق بحرية كالسائل العادي وتقوم بحجب الأشعة المارة خلالها، ولكنها تمتلك بعض الخواص البصرية للمواد الصلبة نتيجة إنتظام جزيئاتها وتستخدم هذه المواد للتحكم في العزل الحراري وتخزين الحرارة في الواجهة - شكل (١٠) .



شكل(١٠) البلورات السائلة الحراريّة [20]



شكل(١١) استخدامات المواد متغيرة الطور في الزجاج الخازن للحرارة [21]

٢-١-٢ مواد قادرة على عكس اتجاه تدفق الحرارة

للتغلب على الفجوة المتزايدة في الطلب على الطاقة والاستهلاك المتزايد ونضوب موارد الوقود ، ظهرت الحاجة لتطوير تقنيات للإستفادة من مصادر الطاقة المتجددة وظهرت **المواد متغيرة الطور phase change materials** وهي مجموعة من المواد التي لديها القدرة الجوهرية على الإمتصاص والتخزين وإطلاق الحرارة أعتمادا على حالة صلابة وسيولة المادة خلال مراحلها المختلفة، فعندما تبدأ درجة الحرارة في الارتفاع فأنها تمتص الحرارة وعندما تصل إلى درجة حرارة معينة فإنها تستمر في امتصاص الحرارة حتى تتحول الى الحالة السائلة ، وعندما تنخفض درجة الحرارة فإنها تتصلب وتميل الحرارة الكامنة المخزنة إلى الانطلاق، ومن أمثلة أستخدام هذه المواد في الوجهات التكيفية ألواح الزجاج الخازنة للحرارة [22]- شكل (١١).

٢-١-٣ مواد قادرة على تغيير شكلها .

تشمل المواد الذكية المتغيرة الشكل مواد ومنتجات قادرة على تغيير شكلها أو أبعادها استجابة لأحد المحفزات أو أكثر من خلال التأثيرات الخارجية (تأثير الضوء ، درجة الحرارة ، الضغط ، مجال كهربائي أو مغناطيسي ، أو تحفيز مادة كيميائية)، وتنقسم الى مواد ومنتجات قادرة على تغيير شكلها دون تغيير أبعادها، وغيرها من المواد والمنتجات التي تحتفظ بشكلها ولكنها تغير أبعادها، والبعض أيضا قادر على تغيير كلا من الشكل والأبعاد في نفس الوقت، ومن أمثلة هذه المواد (**المواد المتذكرة أو الحافظة للشكل shape memory**) ومنها السبائك المتذكرة للشكل Shape memory alloys – شكل (١٢) ، والبوليمرات المتذكرة للشكل shape memory polymers – شكل (١٣) ، حيث تقوم هذه المواد بتغيير شكلها وأبعادها تبعا لتغييرات البيئة المحيطة دون أن يكون هذا التغيير دائم لانها تتذكر شكلها الأصلي قبل التغيير وتعود له بعد زوال المؤثر [23].

٢-١-٤ مواد تمتص الماء أو الرطوبة المحيطة.

وهي مواد قادرة على إمتصاص الرطوبة من الهواء وتبخيره، وبذلك تعمل على تبريد المبنى داخلياً حتى ٥ درجات مئوية وبالتالي التوفير في استهلاك الطاقة، مثل **الهيدروجيل Hydrogel** : وهي عبارة عن كبسولات تتكون من شبكة غير قابلة للذوبان من سلاسل البوليمر التي تتضخم عند إضافة الماء وتتميز بامتصاص عالي وتخزين كميات كبيرة من الماء ، كما أنها تتمتع بدرجة من المرونة تشبه إلى حد كبير الأنسجة الطبيعية نظراً لمحتواها المائي الكبير [24]- شكل (١٤).

شكل (١٢) السبائك متذكرة الشكل [25]

شكل (١٣) البوليمرات المتذكرة للشكل [26]

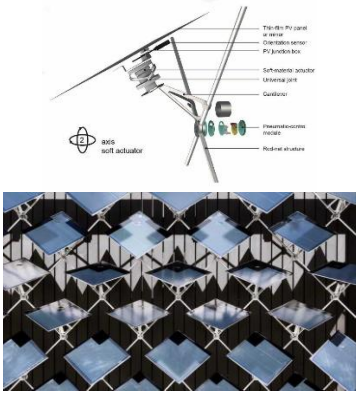
شكل (١٤) مادة مطورة من الطين والهيدروجيل من إبتكار طلاب في كلية العمارة- كاتالونيا [27]

٢-٢ مكونات الواجهات التكيفية :

يمكن للواجهات التكيفية توفير تحسينات كبيرة في كفاءة الطاقة والاقتصاد في المبنى ، من خلال قدرتها على تغيير سلوكها في الوقت الحقيقي وفقاً للمعايير الداخلية والخارجية ، من خلال المواد والمكونات والأنظمة، ويمكن تعريف المكون على أنه تجميع لمجموعة مختلفة من العناصر لتشكل وحدة وظيفية أو إنشائية متكاملة كجزء من الواجهة مثل (وحدات التظليل - وسائل حفظ الطاقة - أدوات تدوير الهواء - وحدات الغلاف الأخضر - أنبوب الشمس....إلخ) والعديد من المكونات التكيفية في الواجهات التي لا تهدف فقط إلى المساهمة بفعالية في توازن الطاقة في المبنى وتخفيض استهلاك الطاقة، ولكن أيضاً المساهمة نحو جوانب الإتصال بالوسائط المتعددة وفيم ما يلي عرض لبعض المكونات التكيفية الشائع إستخدامها بالواجهات :

- **وحدات التظليل الديناميكية :** هي وحدات مثبتة على الواجهة تعمل كأنظمة للتظليل وتُمكن من حجب أشعة الشمس وتوفير الإضاءة الطبيعية وغيرها من الوظائف التى تساعد على راحة مستخدمى المبنى، ويتم تنظيم الوحدات بطريقة تسمح بحركتها عن طريق(الدوران أو الطى أو الغلق والفتح ....إلخ) حسب المحركات المستخدمة، وقد ساهم إدخال أنظمة الأستشعار وأنظمة التحكم في القدرة على أن تعمل كل وحدة بشكل فردي بنظام مستقل وذلك عن طريق الأستجابة وفقاً للبيانات التي تتلقاها من أنظمة الأستشعار الخاص بها [28]- شكل (١٥).
- **الوحدات الكهروضوئية:** هي وسيلة لتوليد الطاقة الكهربائية عن طريق تحويل الإشعاع الشمسي إلى كهرباء مباشرة، وتعتبر عناصر التظليل من أهم طرق تكامل الوحدات الكهروضوئية حيث يمكن تركيب الوحدات الكهروضوئية على هيكل خفيف الوزن على غلاف المبنى، وهي بذلك تكون متعددة الوظائف فضلاً عن إنتاج الطاقة فإنها توفر التظليل والتحكم في ضوء النهار [29]- شكل (١٦).
- **وحدات الغلاف الأخضر:** تساهم أنظمة المساحات الخضراء العمودية المدمجة في غلاف المبنى في تحسين الأداء الحراري في واجهات المباني بالإضافة الى تنقية وتبريد الهواء قبل دخوله للفراغ وإنتاج الاكسجين وتقليل إنبعاث الكربون وخفض الضوضاء داخل المباني ايضاً، وهو بذلك يعتبر نظام تكيف قادر على تغيير سلوكه في الوقت الفعلي بفضل الخصائص الطبيعية للنباتات [30] – شكل (١٧).

شكل (١٥) نظام التظليل مطار زيوريخ بسويسرا الذي يعمل استجابة للظروف المناخية المتغيرة وضوء النهار [28].



شكل (١٦) الواجهة التي تم تطويرها في مشروع بحثي بجامعة ETH Zurich بألمانيا لتجمع بين إنتاج الطاقة والتظليل الذكي [31]

شكل (١٧) الغلاف الأخضر في مبنى Tree House في سنغافورة [32]

٢-٣ أنظمة الواجهات التكيفية

يمكن تصنيف الأنظمة المستخدمة في الواجهات التكيفية إلى مجموعتين بناء على المعايير الخاصة بتقنيات بالتحكم والاستشعار والتشغيل والمواد التكنولوجية والهيكلية حيث يمكن أن يكون التحكم عبارة عن نظام حلقة مغلقة أو حلقة مفتوحة كما ذكر سابقاً.

أ- المجموعة الأولى: أنظمة التكيف الذاتي

التي تتوقف فيها القدرة التكيفية على الموارد الطبيعية أو المواد الذكية ولا تتضمن قابلية النظام للتكيف بالضرورة تغييراً في التكوين المكاني ولكن يتعلق بتنظيم الخواص الفيزيائية الحرارية استناداً إلى الظروف المناخية الخارجية وتضم نوعين من التقنيات في التحكم والتشغيل : تقنيات سلبية - تقنيات قائمة على المواد .

ب- المجموعة الثانية : أنظمة التكيف الديناميكي

وفيها تكون القدرة على التكيف واضحة في قدرة نظام الواجهة على نقل جميع أو بعض أجزائه، تُعرف هذه الأنظمة بأنها أنظمة الواجهات الحركية وهي قادرة على التغيير عن طريق التحرك في الفضاء واتخاذ هياكل وتكوينات مختلفة بمرور الوقت [34]، وتضم ٣ أنواع من التقنيات : التقنيات الميكانيكية - التقنيات الكهروميكانيكية - التقنيات المعتمدة على تقنية المعلومات، ويعتمد هذا التصنيف على أنواع تقنيات التشغيل المستخدمة في الاستجابة لأنظمة الواجهات التكيفية [9].

شكل (١٩) فندق Marina Bay Sands Hotel في سنغافورة [33]

٢-٣-١ التقنيات السلبية Passive technologies: الواجهات مزودة بأنظمة لا تتطلب طاقة وضوابط وتتطلب القليل من الصيانة أو لا تحتاج إلى صيانة، ويتم تصميم بعض هذه الواجهات بأجزاء مفصلية يتم تحريكها باستخدام الموارد الطبيعية مثل الرياح والمياه وأشعة الشمس كمصادر للطاقة [35] ، وهي بذلك تعتبر التقنيات البديلة للتقنيات المعتمدة على الطاقة الميكانيكية والكهربائية واليدوية – شكل(١٨)، كما في تصميم واجهة فندق Marina Bay Sands Hotel في سنغافورة حيث تم تغطية الإطار الزجاجي بلوحات من الراتنج المفصلي متصلة بهيكل شبكي تتأرجح مع حركة الرياح وتحجب ٥٠٪ من ضوء الشمس والحرارة [9]– شكل (١٩).

شكل (١٨) مخطط نظام التقنيات السلبية - المصدر: الباحث

٢-٣-٢ تقنيات قائمة على المواد Material-based Technologies

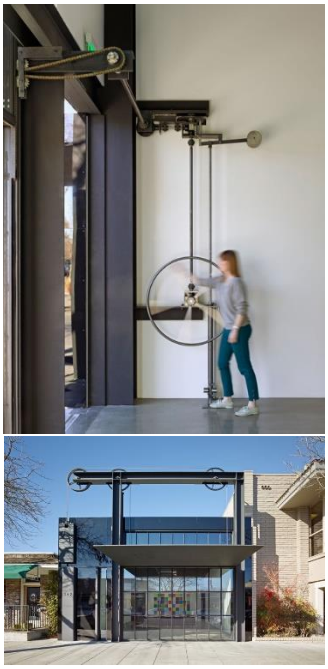
وفرت التطورات في علوم المواد فرصا لاتجاه أخر لتصميم الواجهات التكيفية، حيث توفر التقنيات المستندة إلى المواد الذكية الفرص لاستخدام المواد نفسها لتحل محل المكونات الميكانيكية أو الميكانيكية والكهربائية [36]، تعمل التقنيات القائمة على المواد بناءاً على التغيرات الجزيئية في هياكل المواد عندما يتم تحفيزها بواسطة إشارات خارجية مثل فوتونات الأضواء وتغيرات درجة الحرارة والمواد الكيميائية وقوى المجال المغناطيسي وتدفقات الكهرباء، يتم التكيف هنا من خلال حركات المواد عن طريق التغييرات في الحجم والشكل واللون والسيولة والتيارات الكهربائية، ونظراً لأنه يتم دمج كل من أجهزة الاستشعار والمحركات وأنظمة التحكم في داخل المواد نفسها، فإن تقنيات التكيف القائمة على المواد لا تتطلب أجهزة استشعار ومحركات وموارد طاقة خارجية [37] – شكل (٢٠)، كما في واجهة مبنى المؤتمرات Swisstech في سويسرا، حيث أستخدم على الواجهة ألواح شمسية ذات تزجيج شفاف ملون من الخلايا المصبوغة يؤدي وظيفة مزدوجة (الحماية الشمسية للواجهة ومنتج للطاقة)، فقد تم إستخدامها كأجهزة تظليل رأسية ويحتوي كل منها على محول صغير مخصص يتكيف باستمرار مع ظروف الإضاءة المتغيرة مما يزيد من إنتاج الطاقة في التركيب بأكمله [19] - شكل (٢١).

شكل (٢٠) مخطط نظام التقنيات القائمة على المواد المتقدمة المصدر: الباحث

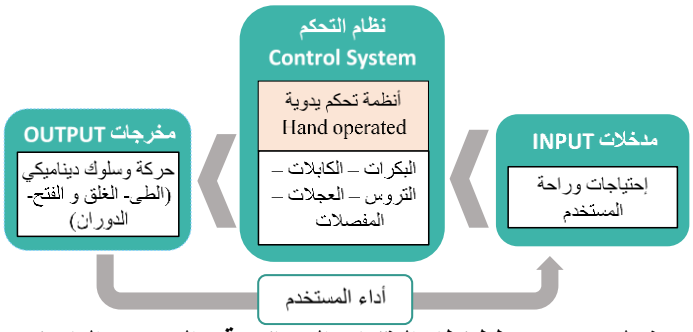
شكل (٢١) واجهة مركز المؤتمرات Swisstech- سويسرا ٢٠١٤م [19]

٢-٣-٣ التقنيات الميكانيكية Mechanical Technology

تتألف هذه الأنظمة من عناصر ميكانيكية مترابطة من شأنها أن تغير من حجم واتجاه ونقطة تطبيق القوى بإستخدام البكرات والعجلات والمفصلات والكابلات والتروس- شكل (٢٢) ، وكان أول نظام للواجهة بإستخدام تقنية ميكانيكية يستجيب للمكفوفين ويعمل يدوياً مع آلية من التروس والبكرات والكابلات وتم الحصول على براءة اختراع الأنواع الأفقية من الستائر المعدنية في بريطانيا عام ١٧٦٠م ، وتم اختراع الستائر الرأسية في الولايات المتحدة في الستينيات بعد قرنين من الزمان في الستينيات، ومثال على هذا النظام للواجهات التي يتم تشغيلها يدوياً حديثاً ، الحائط الستائري النشط لمعرض كاليفورنيا - عام ٢٠١٢، حيث تستخدم عجلة اليد لتحفيز سلسلة من التروس والبكرات لحركة الواجهة [9]– شكل (٢٣).



شكل (٢٣) التشغيل اليدوي لواجهة معرض كاليفورنيا ٢٠١٢م [38]

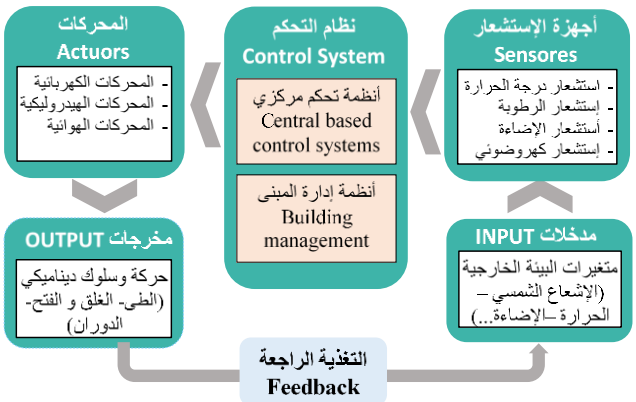


شكل (٢٢) مخطط نظام التقنيات الميكانيكية - المصدر: الباحث

٢-٣-٤ التقنيات الكهروميكانيكية

تم تطوير آليات الواجهات الميكانيكية بعد توفر الكهرباء وأجهزة التحكم في الستينيات وكان جناح الولايات المتحدة في معرض مونتريال إكسبو ٦٧ واجهة مستقبلية، فقد كانت التكنولوجيا المستخدمة في هذه الواجهة سريعة الاستجابة عبارة عن نظام تظليل تم تشغيله استناداً على المحركات الكهروميكانيكية مع مستشعرات ضوئية للتحكم الحراري في البيئة الداخلية للهيكل [39]، وتتمتع هذا النوع من التقنيات بمزايا عديدة مثل التوحيد القياسي لعناصرومكونات التصميم والرصد والتحكم المركزي، حيث يتم تشغيل أنظمة الواجهة بواسطة أنظمة تحكم مركزية مبرمجة على أساس بيانات الطقس الإقليمية والبيانات المقدمة من أنواع مختلفة من أجهزة الاستشعار، مثل أجهزة الاستشعار التي تعمل باللمس، وأجهزة استشعار درجة الحرارة ، وأجهزة استشعار الضوء، وأنواع مختلفة من المحركات مثل المحركات الكهربائية والهيدروليكية والهوائية [40] – شكل (٢٤)، كما في تصميم واجهة مبنى أبراج البحر في أبوظبي والتي تتكون من ١٠٤٩ لوحة سداسية مع أربعة مشغلات هيدروليكية خطية متصلة بنظام إدارة المباني وأجهزة الاستشعار المنفذة في كل لوحة سداسية تتفاعل بشكل فردي مع نظام إدارة المبنى [41]- شكل (٢٥).

شكل (٢٥) أبراج البحر في أبو ظبي - ٢٠١٢م[42]

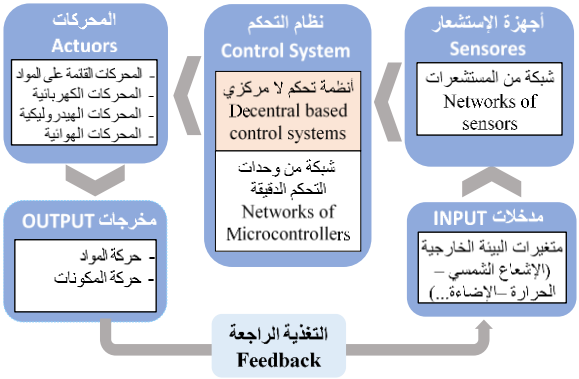


شكل (٢٤) مخطط نظام عمل الواجهات التكيفية ذات التقنيات الكهروميكانيكية - المصدر: الباحث

٢-٣-٥ التقنيات المعتمدة على تقنية المعلومات.

غيرت تقنية المعلومات من طريقة تطبيق نظم التحكم في الأنظمة الكهروميكانيكية ، حيث تم استخدام فكرة نظام التحكم الموزع في الواجهات التكيفية للتحكم في الألواح المترابطة بواسطة وحدات تحكم دقيقة microcontrollers [43]، حيث تنقل أجهزة الاستشعار البيانات إلى وحدات التحكم الدقيقة للمعالجة والتشفير لتتم عمليات التنفيذ بواسطة المحركات، وتتمثل مزايا التحكم اللامركزي في الاستجابات المنفصلة للظروف البيئية المحلية والاستبدال السهل بين اللوحات متعددة التوصيلات وحساب الوقت الفعال للبيانات البيئية في كل لوحة، كما أن مكونات الواجهة منخفضة التكلفة وتتميز بالحرية الوظيفية والتركيبية، ومع ذلك نظراً لأن هذه الأنظمة تعتمد على أجهزة الكمبيوتر، فإن عملياتها عرضة لأعطال الكمبيوتر ومخاطر الأمن السيبراني- شكل (٢٦) ، وقد تم تصميم مبنى ICT-Media في أسبانيا عام ٢٠١١ م – شكل (٢٧)، وهو الواجهة الأولى بنظام تحكم لامركزي، ويتكون نظام التحكم الخاص بها من وحدات التحكم الدقيقة والوسائد الهوائية المدمجة بأجهزة استشعارموزعة لاستشعار حرارة وضوء الشمس، واستجابات المستشعرات تكون بالتضخم والانكماش وزيادة كثافة النيتروجين المملوء في الوسائد، وتؤثر هذه العوامل على شكل ومظهر الواجهة [9].

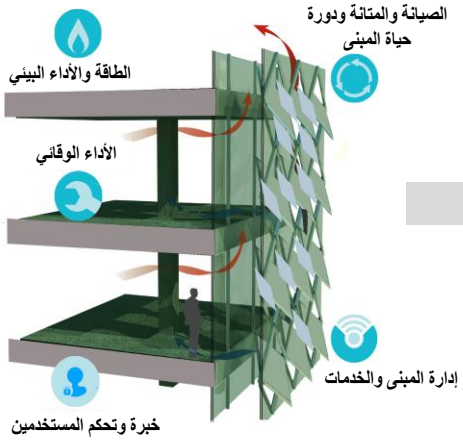
شكل (٢٧) واجهة مبنى ICT-Media في أسبانيا - ٢٠١١م [44]



شكل (٢٦) مخطط نظام عمل الواجهات التكيفية القائمة على تقنية المعلومات - المصدر: الباحث

٣. الأداء للواجهات التكيفية .

الهدف النهائي من استخدام الواجهات التكيفية هو تحسين الأداء للمبانى مع الحفاظ على الجوانب الجمالية إن لم يكن تعزيزها، ويعد أداء الواجهة التكيفية خطوة أساسية لتحديد معايير التكيف والأنظمة التقنية المطلوبة وفقاً لذلك، وعادة ما يتم ربط الأداء بالمعايير الهندسية وجوانب الاستدامة وأهداف الطاقة، وقد تم تصنيف معايير تقييم الأداء للواجهات التكيفية تحت خمس مجموعات رئيسة [45] - شكل (٢٨).



شكل (٢٨) معايير تقييم الأداء للواجهات التكيفية [45].

٣-١ الطاقة والأداء البيئي Energy and environmental performance

استهلاك الطاقة والإنبعاثات الناتجة خلال عمليات دورة حياة المبنى من أهم التأثيرات السلبية للمباني على البيئة بالإضافة إلى تأثيرات أخرى أكبر وأكثر ديمومة ، لذلك يتأثر أداء طاقة المبنى بشكل كبير بالتقنيات المختلفة للواجهة، فمن خلالها عن طريق دمج استراتيجيات تحكم أكثر تقدماً يمكن أن يتحسن الأداء العام للمبنى من حيث إدارة الطاقة، ومن خلال التحكم في العزل الحراري وإشعاع الطاقة الشمسية والإستفادة من ضوء النهار لتقليل استهلاك الكهرباء وأحمال التدفئة الناتجة عن الإضاءة الاصطناعية، كما تساهم تقنيات جمع الطاقة الشمسية في الواجهات التكيفية في توفير الطاقة المتجددة وتخزينها وإدارتها بكفاءة لاستخدامها لأداء مهام متعددة للتعويض عن الطاقة المستخدمة، كما تلعب أنظمة التهوية الطبيعية في الواجهة التكيفية دوراً مهما في بناء كفاءة الطاقة [46].

٣-٢ إدارة المبني والخدمات Building control and services

التفاعل بين أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء وأنظمة الواجهة التكيفية لتحقيق الراحة والصحة الإنتاجية للمستخدمين، حيث تسهم الواجهة التكيفية في تنظيم متطلبات الراحة الحرارية والراحة البصرية وجودة الهواء الداخلي والأداء الصوتي....ألخ، والتي على علاقة مباشرة بأنظمة إدارة المباني والتحكم في الواجهة، وتعتمد الإدارة والتفاعل من خلال التقنيات المؤتمتة والذكية على مجموعة من المتغيرات لتحقيق متطلبات الراحة الداخلية، وفيما يلي الأربعة مجالات رئيسية للراحة الداخلية:

- **الراحة الحرارية Thermal comfort**

الراحة الحرارية هي حالة عقلية يشعر معها الإنسان بالرضى عن ظروف البيئة المحيطة به، وتعتمد على مجموعة من العوامل البيئية والنفسية، لذلك يجب توفير المرونة الكافية في ضبط الظروف الداخلية وفقًا للتفضيلات الشخصية للمستخدمين، وتعد العوامل البيئية (الإشعاع الشمسي ، درجة حرارة الهواء ، الرطوبة النسبية ، الرياح) من العوامل ذات التأثير المباشر على إحساس الإنسان بالراحة الحرارية من عدمه [47].

- **الراحة البصرية The visual comfort**

تعتمد الراحة البصرية على عدة عوامل من أهمها الإضاءة وهي العامل الأكثر دراسة، وتنقسم إلى الإضاءة الطبيعية والإضاءة الصناعية ، وتعتمد الراحة البصرية في الفراغات الداخلية على مجوعة من العوامل تشمل (توحيد وكمية الضوء ، التوهج ، طبيعة مصدر الضوء ، لون الضوء...ألخ)، وللراحة البصرية تأثير كبير على صحة وإنتاجية المستخدمين كما أن لها تأثير كبير على توفير الطاقة .

- **جودة الهواء الداخلي Indoor Air Quality (IAQ)**

جودة الهواء الداخلي لها تأثير كبير على صحة المستخدمين وراحتهم وإنتاجيتهم ، وتعتبرإمكانية تنظيم تبادل الهواء وفقًا لنسبة ثاني أكسيد الكربون إحدى الإمكانيات المميزة والهامة للواجهات التكيفية، ويمكن تحقيق ذلك من خلال إستجابة الواجهة للتحفيز الداخلي، علاوة على ذلك يمكن أن تكون الرياح عنصراً للتكيف يمكن استخدامه لتنظيم جودة الهواء الداخلي عن طريق السماح للهواء الخارجي بالدخول إلى داخل الفراغ من خلال تباين نفاذية الواجهة.

- **الراحة الصوتية Acoustic comfort**

تشمل الراحة الصوتية الحماية من الضوضاء وضمان بيئة سليمة تتوافق مع استخدامات المبنى، وترتبط الصوتيات بالراحة والقدرة على التركيز داخل المبنى، قد تكون مصادر التلوث الضوضائي خارج المبنى أو قد تنجم عن الأنشطة داخل الفراغات ، ويمكن للواجهات التكيفية لعب دور أساسي في الحصول على الراحة الصوتية الكافية داخل المبنى والتحكم في الضوضاء [4].

٣-٣ الأداء الوقائي Protective performance.

للواجهات التكيفية دور هام في الحماية من الطقس الخارجي والمخاطر الطبيعية والإصطناعية مثال على ذلك (التلوث ، والتعرض للمواد الخطرة ، والسقوط ، الحرائق ....الخ)، مما يستدعي تصميمها بما يضمن سلامة وصحة المستخدمين، وتوقع أداء الواجهة إستجابة للمخاطر والتهديدات المحتملة، كما تعتبر المتانة جانباً أساسياً للأداء وتحقيق الإستدامة لجميع أنظمة المباني، مع أهمية خاصة للواجهة في دورها الوقائي المتمثل في الفصل بين الداخل والخارج، ويشمل ذلك كل الجوانب المتعلقة بالاستقرار الهيكلي والسلامة للمبنى [48].

٣-٤ الصيانة والمتانة ودورة حياة المبنى Maintenance, Durability and life cycle

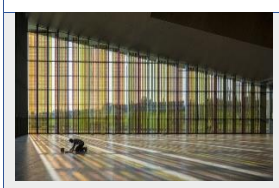
تشمل الاعتبارات التشغيلية للواجهة التكيفية حيث يستند التفاعل من خلال التقنيات الآلية والذكية على مجموعة من المتغيرات، التي تتعلق بالسيطرة الفعالة على خدمات المبنى فيما يتعلق بالصيانة والاستبدال والتنظيف والمتانة والتكلفة وجميع المتغيرات التي تحافظ على أداء الواجهة والمكونات والعناصر أثناء التشغيل، وتكاملها مع الأنظمة الأخرى ومتطلبات الصيانة والتجديد خلال المرحلة التشغيلية لدورة حياة المبنى [45].

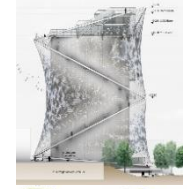
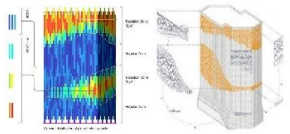
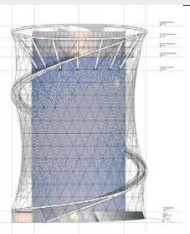
٣-٥ خبرة وتحكم المستخدم User Control And Experience

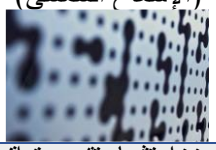
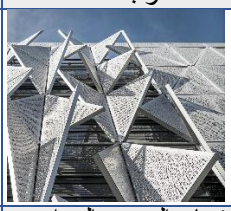
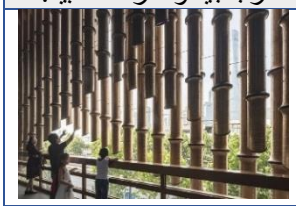
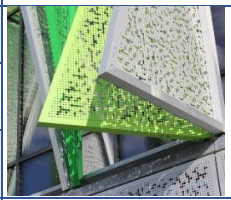
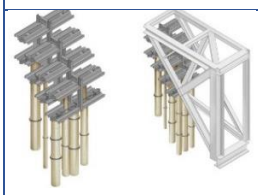
يشمل هذا المعيار التفاعل بين المستخدم وواجهة المبنى التكيفية لتحقيق مستويات الراحة المطلوبة يضم المتغيرات المتعلقة بتحكم المستخدمين في البيئة الداخلية ، حيث يمكن تكييف مستوى الراحة وتغييره بمرور الوقت بتحكم من المستخدم، هذا النوع من العلاقات يؤثر على التصميم التكيفي للواجهة لذلك من المهم النظر في سلوك المستخدم وسيناريوهات المواقف لتوقع أداء للواجهة التكيفية، والذي يتوقف على قدرة المستخدمين على التصرف والتفاعل مع الواجهة لتنظيم بيئة معيشتهم أو عملهم [45].

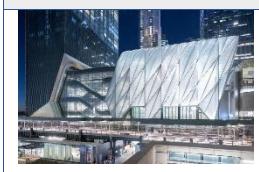
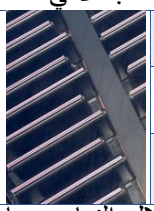
٤. دراسة تحليلية لنماذج واجهات تكيفية.

تحقيقا لهدف الدراسة المتمثل في التحقق من الإتجاهات الحالية وتصور الإتجاهات المستقبلية للواجهات التكيفية، تم تحليل ومقارنة مجموعة من حالات الدراسة لواجهات تكيفية لمباني حديثة نفذت في الخمس سنوات الأخيرة من عام ٢٠١٤-٢٠١٩م، وتحقق التنوع في أنظمتها (سلبية – ديناميكية) وسلوكها وطريقة تكيفها، والتحليل يتم في صورة جداول مقارنة صممت إعتمادا على المحاورالرئيسة التي تم وصفها وتحليلها في البحث وتشمل (خصائصها-سلوكها- المواد - المكونات -الأنظمة – تقنيات التشغيل – الأداء).

جدول (١)	٤-١ تحليل أنظمة التكيف الذاتي	
المبنى	مبنى **NY Aquarium** – **نيويورك** [49]	**مركز المؤتمرات swisstech - سويسرا** [19]
العام	٢٠١٨ م	٢٠١٤ م
المصمم	Ned Kahn	michael grätzel Richter Dahl Rocha & Associés
الواجهة	واجهة مستجيبة Responsive Façade	واجهة نشطة Active façade
الفكرة التصميمية	تصميم واجهة مستوحى تشكيلها من قشورالأسماك والحركة المرنة المنسقة لمجموعات الأسماك في الماء	أول مبنى تستخدم في واجهته الخلايا الشمسية الحساسة للصبغة EPFL حيث تم دمجها في شرائح رأسية تشكل غلاف للمبنى
السلوك	سلوك ديناميكي ذاتي	سلوك إستاتيكي
نوع الإستجابة	(إستجابة ذاتية)Intrinsic حيث تتحرك الوحدات مع حركة الرياح بشكل ديناميكي مميز	(إستجابة ذاتية)Intrinsic حيث يعطي ترتيب الألوان بشكل مبدع ديناميكية فريدة للواجهة
زمن الإستجابة	إستجابة سريعة حيث تتغير وتستجيب الواجهة من لحظة لاخرى بفعل الرياح والغيوم والضوء	إستجابة سريعة حيث تسمح الخلايا الشمسية الشفافة بمرور الضوء وفي نفس الوقت تقوم بتخزين الطاقة
عامل التكيف (المدخلات)	- ميكانيكي (حمل الرياح) - بصري (الإضاءة الطبيعية) 	- كهرومغناطيسي (الإشعاع الشمسي)
أنظمة الإدخال	لاتوجد أجهزة إستشعار	الإستشعار المدمج داخل المواد
المواد المستخدمة	الألمونيوم والفولاذ المقاوم للصدأ	مواد كهروضوئية Photovoltaic (الخلايا الشمسية الحساسة للصبغةEPFL)
المكونات	تتكون الواجهة من عشرات الآلاف من الألواح التي تتأرجح في الريح وتعكس الضوء واللون من السماء والمناطق المحيطة مباشرة	شرائح ستائرية مع إمكانية التحكم في زاوية كل شريحة ووجود محول دقيق بها يتكيف باستمرارمع ظروف الإضاءة المتغيرة مما يزيد من إنتاج الطاقة.
أنظمة التحكم	التحكم ذاتي - لا يوجد نظام تحكم	التحكم القائم على المواد
التحكم فى التكيف	حلقة مفتوحة Open loop 	حلقة مفتوحة Open loop 
التقنية المستخدمة	تقنيات سلبية	تقنية قائمة على المواد
أنظمة الإخراج	لا توجد محركات	المحركات مدمجة داخل المواد (الخلايا EPFL)
المخرجات	تعابير جمالية ذاتية الحركة توفرها المتغيرات البيئية (حركة الرياح-الإضاءة الطبيعية)	تغير كهرومغناطيسي وتغير في الألوان حيث يعطي ترتيب الألوان بشكل مبدع ديناميكية فريدة للواجهة
الاداء المطلوب	- الراحة الحرارية والبصرية حيث تتأرجح اللوحات وتحجب ضوء الشمس والحرارة - المظهر الجمالي للواجهة.	الراحة الحرارية والبصرية من خلال التزجيج الشفاف الملون من الخلايا المصبوغة والذي يؤدي وظيفة مزدوجة (الحماية للواجهة من الشمس ومنتج للطاقة)
المميزات التقنية	- وحدات تظليل متحركة ذاتياً للتحكم بالإشعاع الشمسي	- مواد وأنظمة مبتكرة عالية الأداء لامتصاص وتخزين الطاقة الشمسية

جدول (٢)	٤-١ تحليل أنظمة التكيف الذاتي	
المبنى	**مركز تخزين الطاقة -المانيا**[50]	**برج مكتب Hanwha – كوريا الجنوبية** [51]
العام	٢٠١٩م	٢٠١٩ م
المصمم	LAVA's design	UNStudio
الواجهة	واجهة مستجيبة Responsive Façade	واجهة نشطة Active façade
الفكرة التصميمية	واجهة متعدد الطبقات مستوحى تصميمها من الطبيعة تتكون من غلاف داخلي ملون بظلال مختلفة باللون الأزرق ثم حلقات بيضاوية مائلة تلتف حول الأسطوانة مع "حلقات الطاقة" التي تدور حول الهيكل وتشكل شبكة الكابلات بين الحلقات الفولاذية الطبقة الخارجية.	تصميم مرن وواجهة جديدة تماماً متجاوبة ومولدة للطاقة تعمل على تحسين المناخ الداخلي وتتفاعل مع كلاً من البيئة الداخلية والخارجية وتحقق التنوع البصري وعدم الانتظام من خلال الجمع بطريقة بسيطة بين العناصر متعددة المقياس.
السلوك	سلوك ديناميكي ذاتي	سلوك إستاتيكي
نوع الإستجابة	(إستجابة ذاتية)Intrinsic	(إستجابة ذاتية)Intrinsic
زمن الإستجابة	يتغير المظهر بإستمرار اعتماداً على موجات الضوء والرياح	إستجابة سريعة في الخلايا الكهروضوئية لتوليد الطاقة
عامل التكيف (المدخلات)	 الرياح والإضاءة.	بصري (الإضاءة الطبيعية) 
أنظمة الإدخال	لا توجد أجهزة إستشعار	الإستشعار المدمج داخل المواد - التحفيز من فوتونات الضوء
المواد المستخدمة	حلقات فولاذية وكابلات وألواح الفولاذ المقاوم للصدأ وطبقة عازلة داخلية من ألواح الصوف المعدني بلون أزرق.	إطارات من الألمونيوم وضعت عليها الخلايا الكهروضوئية بزاوية ليتم حصاد الطاقة من الشمس بشكل أفضل.
المكونات	تشكل شبكة الكابلات بين الحلقات الفولاذية طبقة الواجهة الخارجية، حيث يتم ربط حوالي ٢٠٠٠٠ لوح على شكل ماسي من الفولاذ المقاوم للصدأ الرفيع مع اتصال مرن بسيط في شبكات هذه الكابلات الفولاذية مما يسمح لها بالالتفاف حتى ٩٠ درجة مع حركة الرياح.	نظام تظليل كهروضوئي متكامل مكون من إطارات تم تحديد الشكل الهندسي لها (النمط والحجم والوصف) من خلال عوامل الشمس والتوجيه لضمان راحة المستخدم وتقليل استهلاك الطاقة، وقد تم ابتكار نموذج تصميم بارمتري يسمح بتعديل تخطيط الواجهة بناءاً على المتغيرات الرئيسية التي تؤثر عليها.
أنظمة التحكم	تحكم ذاتي-لا يوجد نظام تحكم	التحكم القائم على المواد
التحكم في التكيف	حلقة مفتوحة Open loop	حلقة مفتوحة Open loop
التقنية المستخدمة	تقنيات سلبية	تقنية قائمة على المواد
أنظمة الإخراج	لا توجد محركات	المحركات مدمجة داخل المواد (الخلايا الكهروضوئية)
		
المخرجات	تعابير جمالية ذاتية الحركة توفرها المتغيرات البيئية	تغير في خواص المواد الكهروضوئية لتوليد الطاقة.
الاداء المطلوب	- التفاعل المعقد للحركة والضوء والظل ناتج عن الشمس والرياح ، دون الحاجة إلى طاقة إضافية أو تقنية معقدة. - توليد وإدارة الطاقة المتجددة .	- الراحة الحرارية والبصرية حيث تم تقليل التأثير الشمسي المباشر على المبنى من خلال التظليل. - توليد وإدارة الطاقة بإستخدام الخلايا الكهروضوئية
المميزات التقنية	- تحويل خزان مياه على شكل أسطوانة إلى تصميم ديناميكي ليكون بمثابة معلم جديد لمدينة هايدلبرج. - استخدام الطاقة الشمسية وطاقة الرياح المولدة في الموقع لتسخين المياه داخل البرج. - يضاء الغلاف الداخلي ليلاً بمصابيح LED زرقاء وخضراء وبيضاء مثبتة تحت الدرج.	- أنظمة شاملة تؤثر بشكل كبير على المناخ الداخلي للمبنى وتحسن راحة المستخدم وتضمن مستويات عالية من الاستدامة والقدرة على تحمل التكاليف. - التوحيد القياسي standardization لمكونات الواجهة مما يساعد على تقليل التكلفة. - الدمج بين الثقافة الكورية وأدوات التصميم البارامتري.

جدول (٣)	٤-٢ تحليل أنظمة التكيف الديناميكي	
المبنى	مبنى **Kolding Campus**- **الدنمارك** [19]	مركز **Bund Finance Centre**- **الصين** [52]
العام	Henning Larsen Architects	Foster + Partners + Heatherwick Studio
المصمم	٢٠١٤م	٢٠١٧م
الواجهة	واجهة مستجيبة Responsive Façade	واجهة حركية Kinetic façade
الفكرة التصميمية	السمة الرئيسية للمبنى هي الواجهة التي تتكون من ١٦٠٠ لوحة تظليل شمسية مثقبة من الصلب ذات الشكل الثلاثي والتي تعدل نفسها عن طريق الفتح أو الإغلاق تلقائياً.	يشكل المبنى ارتباطاً بين البلدة القديمة والمنطقة المالية الجديدة حيث يعكس المبنى التصميم الديناميكي الحديث مع شخصية الأحياء التاريخية الصينية من خلال واجهات حركية تتكيف مع الضوء والاستخدام المتغير للمبنى.
السلوك	سلوك ديناميكي للوحات التظليل	سلوك ديناميكي حيث يبدو التظليل كأنه يدور حول المبنى.
نوع الإستجابة	إستجابة خارجية extrinsic لأجهزة الإستشعار.	إستجابة خارجية extrinsic لأجهزة الإستشعار.
زمن الإستجابة	إستجابة سريعة لتحقيق التكيف مع شدة ضوء النهار المتغير وتدفق الضوء المطلوب	يستجيب التظليل في خلال بضع دقائق وتتحرك طبقاته ببطء لتكشف عن لمحات من النوافذ الزجاجية والشرفة الذهبية.
عامل التكيف (المدخلات)	كهرومغناطيسي (الإشعاع الشمسي)  	بصري (مستوى ضوء النهار) 
أنظمة الإدخال	أجهزة استشعار تقيس وتراقب مستويات الضوء والحرارة.	أجهزة استشعار تقيس مستويات الضوء.
المواد المستخدمة	الفولاذ المثقب بنمط عضوي بشكل مستدير وترتبط ببعضها لتكون فتحات تشبه الأميبا، مما يوفر لعباً مميزاً في الواجهة من الخارج بالإضافة إلى لعب ديناميكي للضوء من الداخل.	٦٧٥ أنبوباً من سبائك المغنيسيوم ، تتراوح أطوالها بين ٢ إلى ١٦ متر وتتميز بأنماط بارزة، يشبه الهيكل الناتج قصب الخيزران ولكن مصنوع من المعدن مع قطع أحمر في الأسفل .
المكونات	تتكون الواجهة من ١٦٠٠ لوحة تظليل شمسية من الفولاذ المثقب ذات مسار مزدوج المحور.	تتكون الواجهة من ثلاث طبقات من الأنابيب التي تعمل كنظام تظليل لجميع المبنى على ٣ مسارات حول المبنى.
أنظمة التحكم	نظام تحكم مركزي	نظام تحكم لا مركزي – البرمجة بالحاسب الألي
التحكم في التكيف	حلقة مغلقة close loop 	حلقة مغلقة close loop 
التقنية المستخدمة	تقنية كهروميكانيكية	تقنية المعلومات تقنية كهروميكانيكية
أنظمة الإخراج	الغلق ميكانيكياًعن طريق محرك صغيرلكل منها	محركات كهربائية تترتبط بثلاث أنظمة تحكم مختلفة.
المخرجات	تراقب المستشعرات الحرارة ومستويات الإضاءة مما يسمح لألواح الواجهة بالتحول من المغلق إلى النصف مفتوح إلى الفتح بالكامل تلقائياً.	تتحرك كل طبقة على مسارها وتدور بشكل مستقل وفقاً لاتجاه ومقدار ضوء النهار، ومع تداخل الأنابيب ينتج تأثيرات بصرية ومستويات شفافية مختلفة.
الاداء المطلوب	- الراحة الحرارية والراحة البصرية . - المظهر الجمالي. - تحكم وتفضيلات المستخدم .	- الراحة الحرارية والبصرية - المظهر الجمالي . - المحاكاة والإستلهام من التراث الصيني.
المميزات التقنية	- يتميز المبنى بعدد من الميزات المستدامة، مثل التبريد عن طريق المياه من النهر، والتهوية الميكانيكية منخفضة الطاقة والخلايا الشمسية . - نظام تشغيل ألي لادارة مكونات وعناصر الواجهة.	مزيج مثالي بين الحرف والتراث والتكنولوجيا تصميمه مستوحى من النسيج الصيني التقليدي مع دمج أحدث التقنيات المتطورة التي تساعد على تحمل الزلازل والأعاصير والطقس القاسي.

جدول (٤)	٤ـ٢ تحليل أنظمة التكيف الديناميكي	
المبنى	مبنى **Marxer Haus - فادوز**[10]	مبنى **The Shed Hudson- نيويورك**[12]
العام	٢٠١٧ م	٢٠١٩م
المصمم	Falkeis.architects	Diller Scofidio + Renfro
الواجهة	واجهة ذكية Intelligent façade	 واجهة قابلة للتحول Transformable Façades
الفكرة التصميمية	مبنى سكني مستدام مستوحى تصميمه من الطبيعة يعتمد قدر الإمكان على الطاقة المتجددة وينتج طاقة أكثر مما يستهلك عن طريق عناصر الواجهة مع وحدات لتخزين الحرارة .	المرونة في تمكين المبنى من التكيف مع التغييرات الوظيفية من خلال غلاف خارجي متحرك حيث يمكن توسيع مساحة المبنى بشكل فعال ليتكيف مع الإحتياجات الوظيفية .
السلوك	- سلوك ديناميكي للأجنحة المتحركة والخلايا الشمسية	سلوك ديناميكي لهيكل وغلاف المبنى الخارجي
نوع الإستجابة	- الاستجابة ذاتياً intrinsic من خلال المواد - إستجابة خارجية extrinsic للمستشعرات	إستجابة خارجية extrinsic تبعا لإحتياجات المستخدمين
زمن الإستجابة	إستجابة سريعة حيث تتبع الخلايا الشمسية مسار الشمس مما يعمل على تحسين جمع الطاقة الشمسية	خلال خمس دقائق يمكن نقل الهيكل والغلاف حيث تم تصميم المبنى كآلة ديناميكية تكيفية وتفاعلية
عامل التكيف (المدخلات)	كهرومغناطيسي (الإشعاع الشمسي)	ميكانيكي لتحقيق الوظيفية
أنظمة الإدخال	شبكة من المستشعرات	البرمجة اليدوية اعتماداً على ظروف تشغيل المبنى
المواد المستخدمة	أستخدمت مادة RUBITHERM PCM داخل أنابيب من الألمونيوم وهي مواد مبتكرة لتغيير الطور تعتمد على البارافين والشمع من أجل التخزين الفعال.	الهيكل الرئيسي للغلاف المتحرك من الصلب ومغطى بألواح من ETFE (ethylene tetrafluoroethylene) بوليمر قائم على التفلون
المكونات	سبعة "أجنحة مناخية" تطوى خارج واجهة المبنى وتمتص وتخزن وتحرر الطاقة الحرارية حسب الحاجة للحفاظ على الراحة الداخلية، ويحتوي كل جناح مناخي على صفوف من أنابيب الألمنيوم المليئة بمادة PCM	تم استخدم غشاء متعدد الطبقات من ETFE مثبت داخل الهيكل الفولاذي والذي يتحرك ذهاباً وإياباً على طول القضبان على أربع عجلات أحادية المحور واثنين مزدوجة المحور بقطر ستة أقدام.
أنظمة التحكم	نظام تحكم لامركزي ويتم التحكم في حركة الأجنحة والخلايا الشمسية ببرمجة من الحاسب الألي	التحكم المركزي- تحكم المستخدمين - البرمجة
التحكم في التكيف	حلقة مغلقة close loop	حلقة مغلقة close loop
التقنية المستخدمة	- تقنية المعلومات - تقنية المواد المتطورة	- تقنية المعلومات - تقنية كهروميكانيكية
أنظمة الإخراج	المحركات الكهربائية 	تقنية الروافع المتحركة والمحركات الكهربائية
المخرجات	تفتح الأجنحة في الواجهة الغربية خلال النهار، مما يعرض مادة PCM للإشعاع الشمسي الذي يذيب المادة لتقوم بتخزين الطاقة ويتم طي كل جناح في الليل والعكس تفتح الأجنحة بالواجهة الشرقية ليلا، مما يسمح للهواء البارد بتصلد PCM وتقفل الأجنحة بالنهار.	هيكل الغلاف يتحرك ذهاباً وإياباً بإستخدام العجلات كما يتحرك الغشاء المصنوع من ETFE كواجهة بلاستيكية معه، حيث يجب أن تنحني رقائق ETFE المثلثية فوق الهيكل بزاوية ٩٠ درجة استخدم فريق الهندسة كلا من النماذج الحسابية والواقعية لتحقيق هذه التحولات.
الاداء المطلوب	- الراحة الحرارية والبصرية - الهياكل الحاملة التي تحاكي الطبيعة في المظهر والوظيفة - توليد الطاقة من خلال الخلايا الشمسية والأجنحة السبعة .	- المرونة التصميمية لتحقيق الوظائف المتعددة للفراغات. - تقدم مادة ETFE الخصائص الحرارية للزجاج العازل مع خفة في الوزن وتسمح للضوء بالمرور مع تقليل نقل الصوت.
المميزات التقنية	- وحدات تظليل متحركة للتحكم بالإشعاع الشمسي - إدارة التهوية الطبيعية - نظام تشغيل ألي لادارة مكونات وعناصر الواجهة	- توجد أربع وحدات لتزويد الهواء لوسائد رقائق ETFE، فقد تم وضع قنوات الإمداد بالهواء بطريقة مخفية في مستوى سطح الهيكل الفولاذي

حققت حالات الدراسة مفاهيم وخصائص تكيفية متنوعة من خلال إستخدام المواد والمكونات التكيفية المبتكرة وكلا من الأنظمة السلبية والديناميكية للواجهات التكيفية وتقنيات التحكم المختلفة (الذاتية – التقنيات القائمة على المواد - الكهروميكانيكية – تقنية المعلومات) وجمع بعضها بين تقنيتين مختلفتين لتحقيق الأداء المطلوب- جدول(٤)، وبشكل عام تميزت أنظمة الواجهات المتكيفة التي تم تحليلها بواحدة أو أكثر من المميزات التقنية التالية:

- مواد وأنظمة مبتكرة عالية الأداء لاستيعاب وتخزين الطاقة الشمسية .
- أجهزة لإدارة التهوية الطبيعية بالاقتران مع أنظمة التهوية الميكانيكية
- وحدات تظليل متحركة للسيطرة على الإشعاع الشمسي
- الحلول التقنية المصممة لزيادة ضوء النهار داخل المبنى
- نظم التشغيل الآلي لإدارة عناصر غلاف المبنى.
- أنظمة تحكم ذكية والتي ستمثل مفتاح التمكين للواجهات التكيفية المستقبلية.

٥. صياغة الإطار المستقبلي للواجهات التكيفية.

توضح الواجهات التكيفية التي تم دراستها وتحليلها انها ستتجه مستقبلا نحو حلول أكثر إبتكاراً ، فمن خلال استغلال إمكانية دمج أنظمة تكنولوجيا المعلومات والمحركات الميكانيكية والمواد المبتكرة، يتوقع تحويلها إلى عنصر ديناميكي متحرك قادر على تغيير شكله بسرعة وكفاءة عالية مع تحقيق المتطلبات الوظيفية والبيئية والجمالية، من خلال معطيات عصر الديناميكية والوسائط المتعددة والتقنيات الذكية القادرة على تغير وتكيف واجهات المباني بناءاً على المحفزات البيئية الخارجية ومتطلبات المستخدم في البيئة الداخلية لتحقيق الأداء المطلوب.

وتقترح الدراسة إطار مستقبلي متكامل للواجهات التكيفية يمكن صياغته إعتمادا على مجموعة من الرؤى والتصورات المستقبلية لثلاثة محاور رئيسية هي: (**المفاهيم الرئيسة – التقنيات المستقبلية – معايير ومؤشرات الأداء).**

٥-١ مفاهيم رئيسية للواجهات التكيفية في المستقبل.

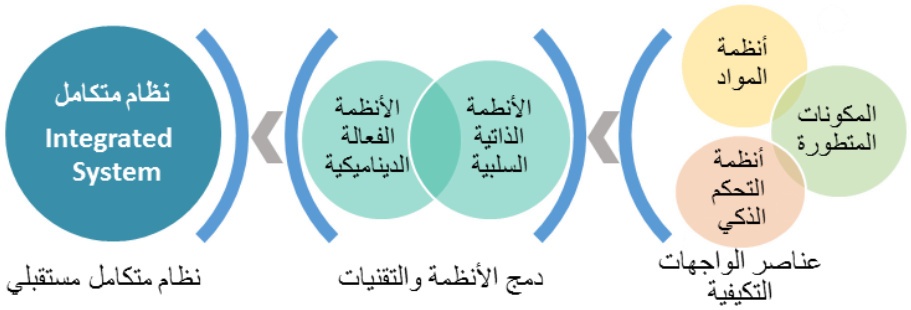
استنادًا إلى حالات الدراسة التي تم تحليلها، سيرتبط مفهوم الواجهات للمباني مستقبلا ارتباطاً وثيقاً بمفهوم التكيف، حيث أن الواجهات هي العنصر الرئيسي للمباني القادر على تغيير هيكلها لضمان الأداء المطلوب، ويمكن صياغة الإطار المستقبلي المقترح إعتمادا على المفاهيم المستقبلية التالية للواجهات التكيفية:

- **التصميم المتمحور حول الإنسان Human-centered design :** التصميم الذي يركز على الإنسان هو محرك مهم ذو قيمة مضافة لتطوير صناعة الواجهات التكيفية، لتحقيق حلول للواجهة تستند على الأدلة التي توازن بين مزايا الراحة المختلفة لصحة البشر ورفاهيتهم، من خلال التفاعل والتحكم في الواجهات لتحقيق احتياجات المستخدمين ، وإضفاء الطابع الشخصي على الراحة في بيئات المعيشة أو التعلم أو العمل[53] .
- **المحاكاة الحيوية Biomimetic:** يعد التحليل المنهجي للمبادئ البيولوجية في الطبيعة أحد المصادر المحتملة للإستلهام من أجل تطويرواجهات تكيفية مستدامة موجهة نحو الأداء، من خلال تحليل الظواهر الوظيفية في الطبيعة سواء للنباتات أو الحيوانات، مثل محاكاة البشرة للكائنات الحية والتي تلعب دوراً رئيسياً في التغلب على المشكلات الجسدية والفسيولوجية المتعلقة بالبيئة المحيطة (الإشعاع - درجة الحرارة - الرطوبة - الرياح...ألخ)، وكذلك محاكاة بعض الهياكل والعمليات للكائنات الحية التي لاتزال مصدر إلهام للابتكارات التقنية.
- **الرقمنة The digitalization :** إمكانات رقمنة التصميم والتخطيط والإنتاج والتشغيل ومميزاتها في الدمج بين الأنظمة المعقدة ذات التصاميم المرنة، حيث تتيح بيئة التصميم الافتراضية ونموذج معلومات البناء (BIM) التفكير الشامل في دورة حياة الواجهة ومكوناتها من خلال عملية تصميم مرنة ومادية وموفرة للوقت للأشكال المعقدة والمكونات الوظيفية، ودمج الوظائف التي تمكن العنصر من أن يصبح ذكياً وسريع الاستجابة [19].
- **التحكم الذكي Smart controlled :** يعد تطوير أنظمة ذكية مناسبة لمراقبة المباني وقادرة على التعامل مع أشكال البناء التكيفية تحدياً رئيسياً في تطوير حلول تشغيل مكونات الواجهات التكيفية، والإستفادة من إمكانياتها الكاملة مستقبلاً وقدرتها على التفاعل الذكي مع إدارة طاقة المبنى وقدرتها على التحسين الاقتصادي والمساهمة في توفير الحياة الذكية للمستخدمين .

٥-٢ التقنيات المستقبلية للواجهات التكيفية.

استناداً إلى حالات الدراسة التي تم تحليلها ، فقد وفر استخدام المواد ذكية والمكونات وأنظمة التحكم الآلي الجديدة والتقنيات الميكانيكية والكهروميكانيكية للواجهات التكيفية مزيداً من الكفاءة والمرونة في التصميم وقابلية التحكم

والاستجابة والتنوع ، ليصبح المبنى نظاماً ديناميكياً نشطاً مستداماً، ومع ذلك في بعض دراسات الحالات تم استبدال هذا التوجه النشط الديناميكي بتوجه استاتيكي جمالي بسبب عيوب النظم الميكانيكية أو الكهروميكانيكية ، وتقترح الدراسة نظام متكامل جديد عن طريق دمج مزايا كلا النظامين (الأنظمة الذاتية السلبية والأنظمة الديناميكية الفعالة) لتحقيق الجوانب الوظيفية والجمالية، والعناصر الرئيسية لهذا النظام المتكامل هي (أنظمة المواد - المكونات المتطورة - أنظمة التحكم الذكي) – شكل(٢٩).



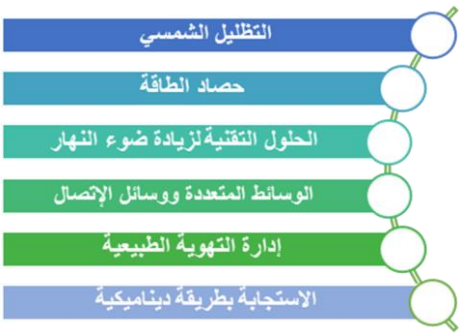
شكل (٢٩) مخطط التقنيات المستقبلية للواجهات التكيفية - المصدر: الباحث

٥-٢-١ أنظمة المواد Material-systems:

أنظمة المواد هي مواد تم تصميمها على أساس المعايير التصميمية والإنشائية الموجهة نحو الأداء، بهدف ان تتفاعل ديناميكيًا وأتوماتيكيا مع الظروف المتغيرة وفي نفس الوقت تكون قادرة على تولي وظائفها الأخرى مثل العمل كعنصر إنشائي [19] ، أي انه يتم استخدام مادة واحدة أو عدد قليل من المواد لهذا الغرض ويتم تضمين الوظائف المتعددة فيها بإستخدام هندسة نظم المواد بدلاً من تجميع عدد من الأنظمة الفرعية أحادية الوظيفة إلى النظام الكامل لنقوم ببناء واجهات متعددة الوظائف، تعمل أنظمة المواد على تقليل تطبيق المواد والمكونات المختلفة والمشاكل المرتبطة بحيث تحقق مايلي- شكل (٣٠) :

- القدرة على الاستجابة بطريقة ديناميكية للتغيرات المناخية والإحتباس الحراري وتطوير حلول مواد شبه شفافة جديدة ومبتكرة للاستجابة للتغيير لتحيق راحة المستخدمين ورفهيتهم.
- تحليل الظواهر الوظيفية في الطبيعة والإستلهام منها من أجل تطوير مواد موجهة نحو الأداء .
- الإستخدام المستدام للمواد الخام والحد من المواد المركبة (الغير قابلة لإعادة التدوير).
- الإستفادة من الخصائص الفيزيائية المضمنة في خصائص المواد من خلال تقنيات النانو.
- إستخدام طرق التصميم الحسابي البارامتري ويمكن بالتالي استخدام الإمكانات المورفولوجية للمواد بطريقة تُمكن من توفير مواد مطورة، على سبيل المثال (متغيرة الشكل ، متكيفة حرارياً ، ينبعث منها الضوء ، تولد الطاقة أو تخزن .....ألخ).
- التطور المستقبلي لأنظمة المواد المصممة بذكاء يوفر الفرصة للجمع بشكل مبتكر بين التقنية الفائقة والاستدامة.

شكل (٣٠) خصائص أنظمة المواد للواجهات التكيفية في المستقبل- المصدر: الباحث



شكل (٣١) وظائف المكونات المتطورة للواجهات التكيفية فى المستقبل - المصدر: الباحث

٥-٢-٢ المكونات المتطورة متعددة الوظائف The advanced multi-functional components

استناداً إلى حالات الدراسة التي تم تحليلها، تحتاج معظم المكونات للواجهات التكيفية الحالية إلى المزيد من التحسين والتطوير وتقديم حلول جديدة متقدمة يمكن دمجها في أنظمة الواجهات التكيفية، وتقترح الدراسة

التطوير للمكونات بالواجهات التكيفية من خلال الدمج بين المكونات الثابتة والمكونات الديناميكية بطريقة تكاملية لتصبح متعددة الوظائف تقوم بعدة أدوار متكاملة معاً من أهمها- شكل (٣١) :

- التظليل الشمسي والمساهمة الفعالة في توازن الطاقة في المبنى وتخفيض استهلاك الطاقة.
- حصاد الطاقة وتجميعها وتخزينها وإدارتها بكفاءة وتوفيرها بشكل يمكن استخدامه لأداء مهام متعددة.
- الحلول التقنية المصممة لزيادة ضوء النهار داخل المبنى.
- إدارة التهوية الطبيعية في المبنى بالاقتران مع أنظمة التهوية الميكانيكية .
- الوسائط المتعددة ووسائل الإتصال بحيث تصبح واجهات المباني وسيلة ربط المدينة وسكانها.
- الاستجابة بطريقة ديناميكية للتغيرات المناخية في الوقت الحقيقي باستخدام مواد مبتكرة قادرة على ذلك.

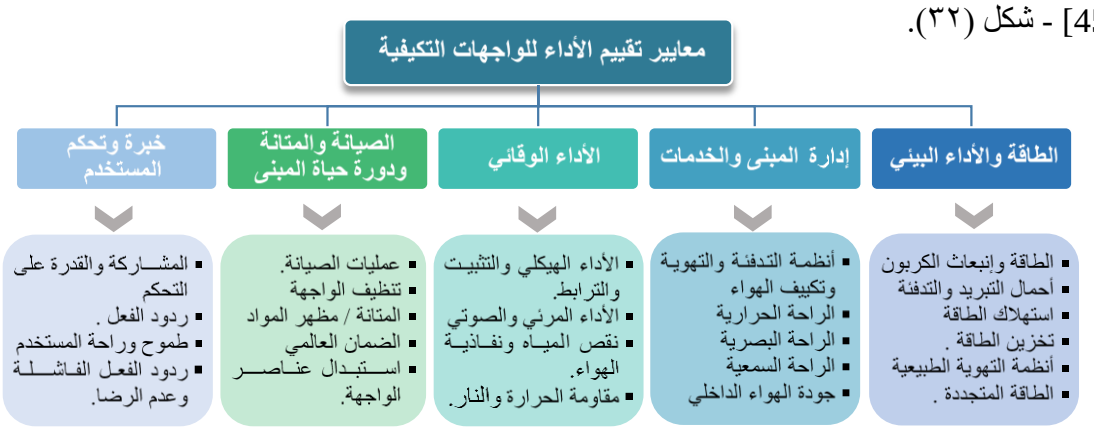
٥-٢-٣ أنظمة التحكم الذكي Smart building operating systems:

تطوير أنظمة التحكم الذكية للواجهات التكيفية والاستخدام الأمثل لعناصر الواجهات التكيفية في نظام التحكم في المبنى يمثل تحدياً تقنياً مستقبلاً ، لا ينطبق هذا فقط على العناصر التي تستجيب للمنبهات الخارجية (وبالتالي يمكن التحكم فيها بشكل فعال) ولكن أيضاً بالنسبة للعناصر التي تستجيب للمنبهات الداخلية التي لا يمكن التحكم فيها ولكن يجب مع ذلك النظر فيها، من خلال توقع تأثير التكيف مع التحكم الأمثل لمكونات المبنى الأخرى من خلال نظام التحكم الذكي في المبنى، وبذلك تعتبر أنظمة التحكم الذكية هي الأساس في تشغيل الواجهات التكيفية مستقبلا ويجب أن تحقق مايلي:

- ان تكون مدعومة من معالجات رقمية وذكاء اصطناعي وأن تكون أنظمة التحكم الذكية هي النظام الأساسي لقاعدة برمجة الواجهات الذكية لأنها تسهل وتنظم نشر واستخدام تطبيقات إنترنت الأشياء Internet of the things والتطبيقات الرقمية في المباني [53].
- يحول نظام التحكم الذكي الواجهة التكيفية إلى منصة خدمات رقمية تتيح الاتصال والتفاعل بين مجموعة متنوعة من خدمات المباني (الأنظمة ، واجهات التحكم ، وأجهزة الاستشعار ، والأجهزة الشخصية).
- يتضمن أستراتيجيات التحكم والتشغيل الذكي للواجهات التكيفية إدارة قائمة على المعلومات والبيانات بحيث تتيح التخزين والدمج والتحليل والاستجابة والتنبؤ ثم التعلم من بيانات المستخدمين.
- الإستفادة من تطور أجهزة الاستشعار الذكي وتقنيات الأتمتة المتقدمة والتي ستساعد الواجهات التكيفية على التحكم الذكي والتعلم الذاتي لجعل الواجهات التكيفية أكثر تركيزاً على المستخدمين.
- تسهيل الصيانة والتشغيل الفعال مما سيؤدي إلى الاستخدام الأمثل للطاقة وتقليل إنبعاث الكربون.

٥-٣ معايير تقييم الأداء Performance Evaluation Criteria.

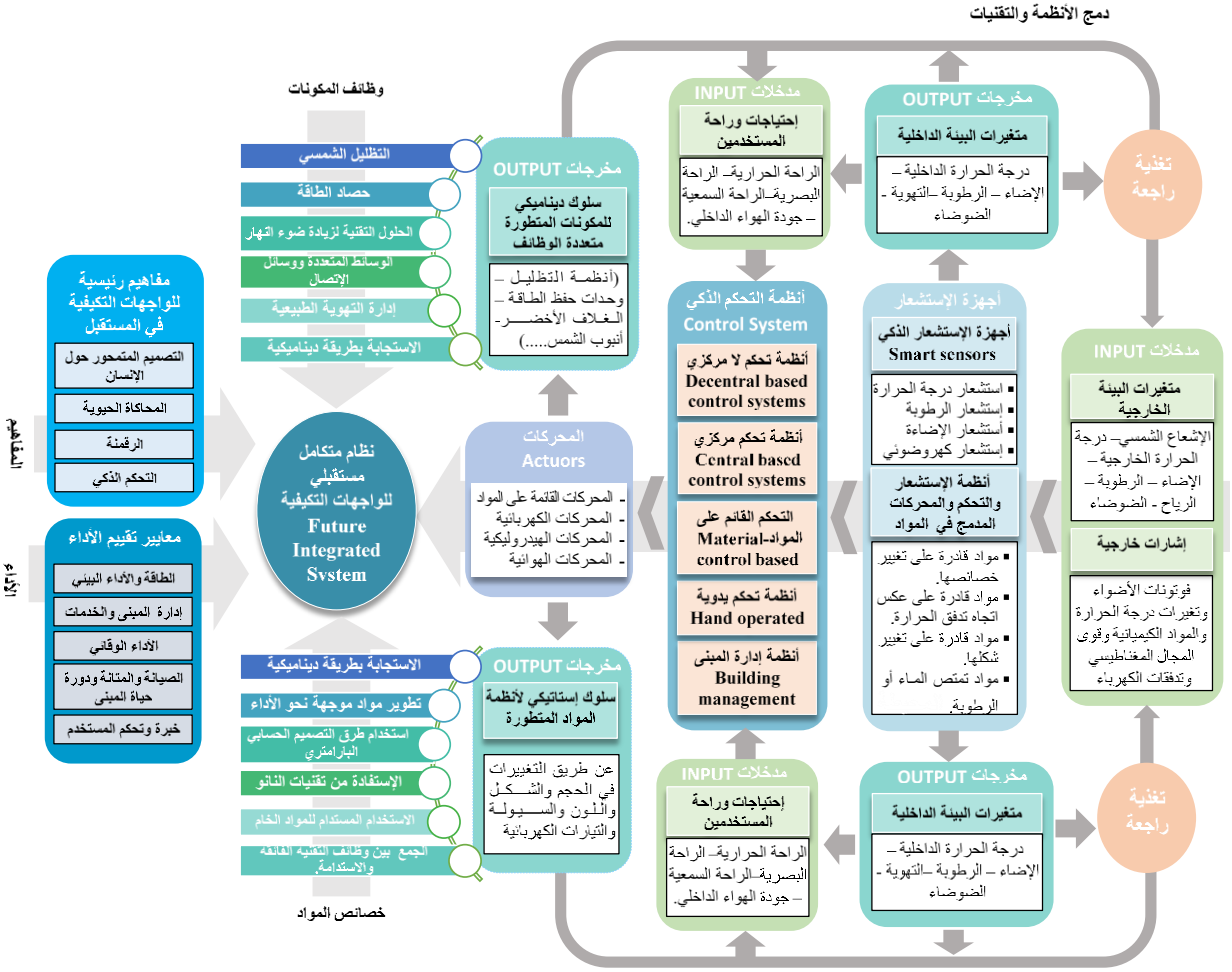
تقييم المكونات التكيفية في الواجهات يشكل تحديا تحدياً رئيسياً أخر في المستقبل، حيث تتطلب الواجهات التكيفية التي تتفاعل مع التأثيرات الخارجية والاحتياجات الداخلية ، إطار تقييم لاستخدامه بشكل موثوق في المباني الجديدة أو في تجديد المباني القائمة اعتماداً على نوع الإنشاء ونوع المبنى، ويعتبر تقييم أداء المكونات التكيفية معياراً يجب مراعاته وإرساءه عملياً من أجل التنبؤ بقدرة الأداء الكاملة للواجهات التكيفية، وكيفية جعل السلوك الديناميكي للواجهات التكيفية قابلاً للتنبؤ والقياس الكمي، هناك حاجة إلى معايير محسنة واختبارات دقيقة للمكونات والسلوك الديناميكي للواجهات، مما يتطلب مزيجاً من أساليب التقييم مع مناهج جديدة لاستكشاف الواجهات التكيفية في سياق التشغيل الفعلي، ويمكن الإعتماد على المعايير التالية ومؤشرات الأداء المقترحة لها [45] - شكل (٣٢).



شكل (٣٢) معايير تقييم الأداء للواجهات التكيفية - المصدر : الباحث من [45]

٥-٤ الإطار المستقبلي للواجهات التكيفية.

إعتمادا على الثلاث محاور رئيسية (المفاهيم– التقنيات - الأداء) التي تم دراستها وتحليلها ووضع التصورات المستقبلية عنها يمكن صياغة الإطار المستقبلي المقترح والذي يقوم على دمج التقنيات والأنظمة السلبية والديناميكية للوصول لنظام متكامل للواجهات التكيفية – شكل (٣٣).



شكل (٣٣) إطار مستقبلي متكامل للواجهات التكيفية يقترح دمج التقنيات والأنظمة الذاتية والديناميكية - المصدر: الباحث

النتائج:

- توصل الباحث إلى صياغة الإطار المستقبلي المقترح للواجهات التكيفية إعتمادا على الرؤى والتصورات المستقبلية لثلاث محاور رئيسية هي : (المفاهيم الرئيسة – التقنيات المستقبلية – معايير ومؤشرات الأداء) الذي يحقق دمج مزايا كلا النظامين (الأنظمة الذاتية السلبية والأنظمة الديناميكية الفعالة) والعناصر الرئيسية لتقنيات هذا النظام المتكامل هي (أنظمة المواد - المكونات التكيفية المتطورة - أنظمة التحكم الذكي) .
- أمكن التبوء ببعض الرؤى والتصورات المستقبلية لمفاهيم وتقنيات وأداء الواجهات التكيفية والتي لم تتبلور حتى الآن بالمعنى الحقيقي لها وما زالت تحتاج المزيد من التطوير في المستقبل والإستفادة منها في صياغة الإطار.
- واجهات المباني مستقبلاً ستصبح كائناً ديناميكياً متحرك قادر على تغيير شكله وسلوكه بسرعة وكفاءة عالية ومرتبطاً بأنظمة تحكم مركزية ولامركزية في المبنى ويتكيف بفاعلية مع المؤثرات الخارجية والداخلية لتحقيق المتطلبات الوظيفية والبيئية والجمالية وراحة المستخدمين ورفاهيتهم .

- ترتبط التطورات التقنية المستقبلية للواجهات التكيفية مع عمليات الإنتاج والتصميم الرقمي والمواد الذكية والمكونات التفاعلية، لذلك يبدو أن تطوير المواد والتقنيات والنظم القادرة على التحكم والتعامل مع الواجهات التكيفية بمثابة التحدي الرئيسي في البحوث المستقبلية وسيفتح مجالات بحثية جديدة متميزة .

التوصيات:

- تحقيق الإطار المستقبلي المتكامل للواجهات التكيفية الذي يقترح دمج التقنيات والأنظمة الذاتية والديناميكية يعد من أهم التوصيات الرئيسية للبحث.
- تحقيق التكامل الجيد مع حلول تقنية نمذجة المعلومات BIM لتسهيل تطوير مكونات واجهات جديدة قابلة للتكيف ويعتبر هذا الموضوع ذو أولوية عالية للبحوث في المستقبل في مجال الواجهات التكيفية.
- زيادة فعالية أنظمة التحكم في الواجهات التكيفية والسماح بمرونة أكبر للتحكم الشخصي للمستخدم من خلال الجمع بين التحكم اليدوي والآلي.
- تطوير أدوات أفضل للتنبؤ بأداء الواجهات التكيفية مع مراعاة راحة ورفاهية المستخدمين وتغير سلوكهم والطبيعة الديناميكية للواجهات التكيفية وفاعلية التصميم المتمحور حول المستخدم.
- تطوير ضمانات شاملة لصيانة التشغيل التلقائي والتكيف المتواصل لتحقيق أداء فعال للواجهات التكيفية.
- يجب تفعيل معايير دقيقة لتقييم أداء المواد والمكونات والسلوك الديناميكي للواجهات من أجل التنبؤ بقدرة الأداء الكاملة للواجهات التكيفية بعد التشغيل الفعلي.
- رفع الوعي في صناعة العمارة والهندسة والإنشاء AEC في مصر حول تصميم الواجهات التكيفية وأفضل الممارسات وتوفير المهارات والموارد اللازمة لتطبيق هذه الأنظمة فى المبانى.

المراجع :

[1] Nakib, F.(2010). Toward an adaptable architecture guidelines to integrate adaptability in building. In Building a Better World: CIB World Congress,Pp276-286.

[2] Loonen, R. C., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. Renewable and sustainable energy reviews, 25, 483-493.

[3] Masoudi, S. (2018). Adaptive Façade Design for the Regulation of Visual Comfort. Delft University of Technology ,MSc. Architecture, Urbanism & Building Sciences.

[4] Aelenei, D., Aelenei, L., & Vieira, C. P. (2016). Adaptive Façade: concept, applications, research questions. Energy Procedia, 91, Pp 269-275.

[5] Romano, R., Aelenei, L., Aelenei, D., & Mazzucchelli, E. S. (2018). What is an adaptive façade? Analysis of Recent Terms and definitions from an international perspective. Journal of Facade Design and Engineering, 6(3), Pp 65-76.

[6] Fortmeyer, R., & Linn, C. D. (2014). Kinetic Architecture: design for Active Envelope. Australia: The Images Publishing Group Pty Ltd.

[7] Masri, Y. (2015). Intelligent Building Envelopes: Design and Applications. Proceedings of the International Conference on Building Envelope Design and Technology, Graz Advanced Building Skins 2015, Pp.37-46.

[8] Velikov, K., & Thün, G. (2013). Responsive Building Envelopes: Characteristics and evolving paradigms. In: Trubiano, F., Design and Construction of High Performance Homes. pp. 75-92. London and New York: Routledge.

[9] Matin, N. H., Eydgahi, A., & Shyu, S. (2017, June). Comparative analysis of technologies used in responsive building facades. In Proceedings of the 2017 ASEE Annual Conference Exposition, Washington, DC, USA Pp. 1-28.

[10] [Online]. Available: http://www.puretemp.com/pcmatters/tag/solar/page/11/. [Accessed 26 6 2020].

[11] [Online]. Available: https://www.e-architect.co.uk/denmark/kolding-campus-university-southern-denmark. [Accessed 23 6 2020].

[12] [Online]. Available: https://archello.com/project/the-shed-3. [Accessed 27 6 2020].

[13] Loonen, R. C., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. Renewable and sustainable energy reviews, 25, Pp 483-493.

[14] [Online]. Available: https://architizer.com/projects/closed-cavity-facade/. [Accessed 16 6 2020].

[15] [Online]. Available: https://www.archdaily.com/881511/bund-finance-centre-foster-plus-partners-plus-heatherwick-studio. [Accessed 16 6 2020].

[16] Loonen, R. C. G. M. (2010). Climate Adaptive Building Shells - What can we simulate? Architecture, Building & Planning Faculty. Eindhoven, The Netherlands, TU Eindhoven. MSc: 230., [Online].

[17] Elkhayat, Y. O. (2014). Interactive movement in kinetic architecture. Journal of Engineering Sciences, 42(3),Pp 816-845.

[18] Fiorito, F., Sauchelli, M., Arroyo, D., Pesenti, M., Imperadori, M., Masera, G., & Ranzi, G. (2016). Shape morphing solar shadings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, Pp 863-884.

[19] Aelenei, L., Aelenei, D., Romano, R., Mazzucchelli, E. S., Brzezicki, M., & Rico-Martinez, J. M. (2018). Case studies: adaptive facade network. Case studies: adaptive facade network.

[20] Castellón, E., & Levy, D. (2018). Smart Windows Based on Liquid Crystal Dispersions. Transparent Conductive Materials: Materials, Synthesis, Characterization, Applications, Pp337-365.

[21] Fokaides, P. A., Kylili, A., & Kalogirou, S. A. (2015). Phase change materials (PCMs) integrated into transparent building elements: a review. Materials for renewable and sustainable energy, 4(2), 6.

[22] Nazir, H., Batool, M., Osorio, F. J. B., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., ... & Kannan, A. M. (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. International Journal of Heat and Mass Transfer, 129, Pp 491-523.

[23] Decker, M., & Zarzycki, A. (2014). Designing Resilient Buildings with Emergent Materials. Fusion - 32nd ECAADe Conference. Conference Proceedings 2014, Northumbria University, Newcastle upon Tyne, England, 10-12 September 2014, 2, Pp 179–184.

[24] Lopez, M., Rubio, R., Martín, S., Croxford, B., & Jackson, R. (2015). Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles. Journal of Facade Design and Engineering, 3(1), Pp27-38.

[25] [Online]. Available: https://www.archdaily.com/tag/shape-memory-alloys. [Accessed 8 6 2020].

[26] [Online]. Available: http://studiokimiis.com/envira/shape-memory-polymer-responsive-architecture. [Accessed 8 6 2020].

[27] [Online]. Available: https://www.archdaily.com/590348/iaac-students-develop-a-passive-cooling-system-from-hydrogel-and-ceramic . [Accessed 18 6 2020].

[28] Al Dakheel, J., & Tabet Aoul, K. (2017). Building Applications, opportunities and challenges of active shading systems: A state-of-the-art review. Energies, 10(10), Pp 1-32.

[29] Svetozarevic, B., Begle, M., Jayathissa, P., Caranovic, S., Shepherd, R. F., Nagy, Z., ... & Schlueter, A. (2019). Dynamic photovoltaic building envelopes for adaptive energy and comfort management. Nature Energy, 4(8), Pp 671-682.

[30] Santi, G., Bertolazzi, A., Croatto, G., & Turrini, U. (2019). Vertical Turf For Green Façades: A Vertical Greenery Modular System Integrated To The Building Envelope. Journal Of Green Building, 14(4), Pp 111-132.

[31] [Online]. Available: https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2019/08/kraftwerk-vor-dem-fenster.html. [Accessed 20 6 2020].

[32] [Online]. Available: https://stateofbuildings.sg/places/tree-house. [Accessed 21 6 2020].

[33] [Online]. Available: http://skisoo.com/blog/en/2012/wind-arbor-on-the-facade-of-the-marina-bay-sands-hotel/. [Accessed 21 6 2020].

[34] Elkhayat, Y. O. (2014). Interactive movement in kinetic architecture. Journal of Engineering Sciences, 42(3),Pp 816-45.

[35] Mazzucchelli, E. S., Aelenei, L., Gomes, M. D. G., Karlessi, T., Alston, M., & Aelenei, D. (2018). Passive adaptive façades: examples from COST TU1403 working group 1. In Facade 2018-Adaptive: Adaptive Facades Network Final Conference Pp 63-72.

[36] Kolarevic, B., & Parlac, V. (2015). Building Dynamics: Exploring Architecture of Change. New York: Routledge Press.

[37] Perino, M., & Serra, V. (2015). Switching from static to adaptable and dynamic building envelopes: a paradigm shifts for the energy efficiency in buildings. Journal of Facade Design and Engineering, (3), Pp 143–163.

[38] [Online]. Available: https://www.dezeen.com/2014/03/20/tom-kundig-242-state-street-gallery-california/. [Accessed 21 6 2020].

[39] Sharaidin, K. (2014). Kinetic facades: towards design for environmental performance, Doctor of Philosophy (PhD), Architecture and Design, RMIT University.

[40] Harry, S. (2016). Dynamic Adaptive Building Envelopes–an Innovative and State-of-The-Art Technology. CS Volume 3 Number 2 (January - 2016).

[41] Attia, S. (2018). Evaluation of adaptive facades: The case study of Al Bahr Towers in the UAE. QScience Connect, 2017(2, Special Issue on Shaping Qatar's Sustainable Built Environment-Part I).

[42] [Online]. Available: https://www.designboom.com/architecture/aedas-al-bahar-towers/. [Accessed 21 6 2020].

[43] Grobman, Y. J., & Yekutiel, T. P. (2013). Autonomous Movement of Kinetic Cladding Components in Building Facades. In ICoRD'13, Springer, India, Pp 1051-1061.

[44] [Online]. Available: https://solarfacades4architects.wordpress.com/. [Accessed 22 6 2020].

[45] Attia, S., Bilir, S., Safy, T., Struck, C., Loonen, R., & Goia, F. (2018). Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems. Energy and Buildings, 179, Pp165-182.

[46] Taveres-Cachat, E., Grynning, S., Thomsen, J., & Selkowitz, S. (2019). Responsive building envelope concepts in zero emission neighborhoods and smart cities-A roadmap to implementation. Building and Environment, 149, Pp 446-457.

[47] Lechner, N. (2015). Heating, cooling, lighting : sustainable design methods for architects. Hoboken, New Jersey :, John Wiley & Sons, Inc.

[48] Bedon, C., Honfi, D., Machalická, K. V., Eliášová, M., Vokáč, M., Kozłowski, M., ... & Portal, N. W. (2019). Structural characterisation of adaptive facades in Europe–Part I: Insight on classification rules, performance metrics and design methods. Journal.

[49] [Online]. Available: http://nedkahn.com/portfolio/ny-aquarium. [Accessed 24 6 2020].

[50] [Online]. Available: https://www.archdaily.com/877158/lava-breaks-ground-on-sculptural-energy-tower-in-germany. [Accessed 30 6 2020].

[51] [Online]. Available: https://www.unstudio.com/en/page/11994. [Accessed 30 6 2020].

[52] [Online]. Available: https://www.archdaily.com/881511/bund-finance-centre-foster-plus-partners-plus-heatherwick-studio?ad_medium=gallery. [Accessed 16 6 2020].

[53] Attia, S., Lioure, R., & Declaude, Q. (2020). Future trends and main concepts of adaptive facade systems. Energy Science & Engineering ,Energy Sci Eng.,Pp1–18.

The Future Of Adaptive Façades: Concepts, Technologies And Performance.

Abstract:

Over the past decades, innovations and technological developments have contributed to improving the efficiency of many building elements such as envelopes, ceilings, windows, walls, etc. by translating dynamic term into functions, behaviour and response to building components, changing over time to adapt to dynamic internal user requirements on the one hand And with the effects and changing external climatic conditions on the other hand and The terms such as adaptive, responsive and dynamic buildings have emerged. Adaptive building facades provide significant improvements in energy efficiency and user's comfort through their ability to respond and change their behaviour according to internal and external influences through materials, components, and systems, which have evolved significantly at the present time and there is an increased interest in studying and developing its components and technologies, to achieve its multiple functions , adapt to its surrounding environment and the requirements of comfort and well-being of users, and it is expected to increase their innovative solutions in the near future, However With this development, there is a knowledge gap and a lack of research studies on the perception of its future trends, which requires a more comprehensive study on the future of adaptive facades.

The study investigates the current main concepts and trends of adaptive facades and studying the materials, components, systems and technologies for them, with a special focus on understanding how they perform through analyzing a set of study cases, to achieve the formulation of an integrated framework of concepts , systems and future technologies of adaptive facades that contribute to improving their performance and to achieve their full potential in adapting to the effects of the surrounding environment, energy conservation and improving user's satisfaction.

Keywords:

Adaptation, Adaptive Facades, Components, Performance, Control Systems.