مجلة جامعة حمص

سلسلة علوم الهندسة المدنية والمعمارية

مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 8

1448 هـ - 2026 م

الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص **المدير المسؤول عن المجلة**

أ. د. وليد حمادة	**رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الإنسانية**
د.نعيمة عجيب	**رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية**

د.محمد فراس رمضان	عضو هيئة التحرير
د. مضر سعود	عضو هيئة التحرير
د. ممدوح عبارة	عضو هيئة التحرير
د. موفق تلاوي	عضو هيئة التحرير
د. طلال رزوق	عضو هيئة التحرير
د. أحمد الجاعور	عضو هيئة التحرير
د. الياس خلف	عضو هيئة التحرير
د. روعة الفقس	عضو هيئة التحرير
د. محمد الجاسم	عضو هيئة التحرير
د. خليل الحسن	عضو هيئة التحرير
د. هيثم حسن	عضو هيئة التحرير
د. أحمد حاج موسى	عضو هيئة التحرير

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص

سورية . حمص . جامعة حمص . الإدارة المركزية . ص . ب (77)

. هاتف / فاكس : 2138071 31 963 ++

. موقع الإنترنت : www.homs-univ.edu.sy

. البريد الالكتروني : journal.homs-univ.edu.sy

ISSN: 1022-467X

شروط النشر في مجلة جامعة حمص

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
- طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
- **اذا كان الباحث طالب دراسات عليا:**

يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقته على النشر في المجلة.

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:**

يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.

- **اذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة البعث :**

يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.

- **اذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :**

يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.

- **يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):**

عنوان البحث . . ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1- مقدمة

2- هدف البحث

3- مواد وطرق البحث

4- النتائج ومناقشتها .

5- الاستنتاجات والتوصيات .

6- المراجع.

- **يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسـبة لكليات (الآداب – الاقتصـاد– التربية – الحقوق – السياحة – التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):**
- عنوان البحث . . ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).

1. مقدمة.
2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
3. أهداف البحث و أسئلته.
4. فرضيات البحث و حدوده.
5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
7. منهج البحث و إجراءاته.
8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
9. نتائج البحث.
10. مقترحات البحث إن وجدت.
11. قائمة المصادر والمراجع.

7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:

أ- قياس الورق 17.5×25 B5.

ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 – يمين 2.5- يسار 2.5 سم

ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8

ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20

ـ كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي ـ العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.

ج . يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.

8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.

9- تقديم أي بحث للنشـر في المجلة يدل ضـمناً على عدم نشـره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.

10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة

11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام وورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

تكتب جميع المراجع باللغة الانكليزية (الأحرف الرومانية) وفق التالي:

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة ـ الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة ـ سنة النشر ـ وتتبعها معترضة (–) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة ـ دار النشر وتتبعها فاصلة ـ الطبعة (ثانية . ثالثة) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة.

وفيما يلي مثال على ذلك:

–MAVRODEANUS, R1986– **Flame Spectroscopy**. Willy, New York, 373p.

ب . إذا كان المرجع بحثاً منشوراً في مجلة باللغة الأجنبية:

ـــ بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة ـــ المجلد والعدد (كتابة مختزلة) وبعدها فاصلة ـــ أرقام الصفحات الخاصة بالبحث ضمن المجلة.

مثال على ذلك:

BUSSE,E 1980 Organic Brain Diseases **Clinical Psychiatry News** , Vol. 4. 20 – 60

ج. إذا كان المرجع أو البحث منشوراً باللغة العربية فيجب تحويله إلى اللغة الإنكليزية و التقيد بالبنود (أ و ب) ويكتب في نهاية المراجع العربية: (المراجع In Arabic)

رسوم النشر في مجلة جامعة حمص

1. **دفع رسم نشر (600) ل.س ستمئة ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.**
2. **دفع رسم نشر (2000) ل.س الفا ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .**
3. **دفع رسم نشر (200) مئتا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .**
4. **دفع مبلغ (150) ل.س مئة وخمسون ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.**

المحتوى

اسم البحث	اسم الباحث	الصفحة
تكامل تقنيات الاستشعار عن بعد والنمذجة الإحصائية لتقدير الجهد الأكسدي الاختزالي (ORP): دراسة حالة في المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي	د.م. عاصم خطيب د. مهند حسن	40-11
دور التوائم الرقمية في تعزيز استدامة الأبنية التاريخية	د. علا خيطو	80-41
التنبؤ بمقاومة الفتل للجوائز البيتونية المسلحة باستخدام الذكاء الصناعي	د. دارين السلامة	112-81
تحديد السوية البيئية في المشاريع الهندسية	م. يمان البريجاوي	138-113
أثر علاقة الإدراك الإنساني مع الذكاء الصنعي في تحسين عملية التصميم المعماري	م. يوسف الخطيب د. مؤنس الجرايحي	186-139

تكامل تقنيات الاستشعار عن بعد والنمذجة الإحصائية لتقدير الجهد الأكسدي الاختزالي (ORP): دراسة حالة في المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي

د. م. عاصم احمد خطيب* د. مهند أمين حسن**

الملخص

يُعدّ الجهد الأكسدي الاختزالي (ORP) من المؤشرات الأساسية لتقييم جودة المياه في البيئات المصبية الساحلية، إلا أن القياسات الميدانية المنتظمة لهذا المتغير تبقى محدودة من حيث التغطية المكانية والزمنية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية توظيف بيانات القمر الصناعي Sentinel-2، بالتكامل مع النمذجة الإحصائية التجريبية، لتقدير التوزع المكاني لقيم ORP في المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي خلال موسم الجفاف. تم تنفيذ رحلة بحرية لجمع قياسات ORP، ومن ثم تم ربطها بالقيم والنسب الطيفية المستخرجة من صور Sentinel-2. بعد ذلك تم إجراء مجموعة من التحليلات الإحصائية لتحديد المتغيرات الطيفية الأكثر ارتباطاً بقيم ORP، ثم تم تطوير واختبار أداء مجموعة من النماذج الإحصائية الأحادية والمتعددة المتغيرات باستخدام صيغ خطية وغير خطية.

أظهرت النتائج أن النسب الطيفية، وبشكل خاص G/B وR/B، تمتلك قدرة تفسيرية أعلى لتغيرات ORP مقارنة بالنطاقات الطيفية الفردية. كما أظهر النموذج الخطي متعدد المتغيرات القائم على دمج النسب الطيفية G/B وNIR/B أفضل أداء، محققا معامل تحديد بلغ 0.57 مع أخطاء تقدير مقبولة (RMSE=6.7mV وMAE=6.0mV). وأتاح تطبيق هذا النموذج إنتاج خريطة للتوزع المكاني لقيم ORP، أظهرت تدرجاً واضحاً من ظروف مختزلة في المياه النهرية عند المصب إلى ظروف أكثر أكسدة باتجاه المياه البحرية المفتوحة.

أشارت نتائج هذه الدراسة إلى أن دمج بيانات الاستشعار عن بعد متعددة الأطياف مع النمذجة الإحصائية يُمثل أداة فعالة لدعم مراقبة ORP في البيئات المصبية الساحلية، خاصة في المناطق التي تعاني من محدودية القياسات الميدانية المنتظمة، كما يسهم في تحسين فهم الديناميكيات البيوجيوكيميائية للمياه الساحلية.

الكلمات المفتاحية: الاستشعار عن بعد، Sentinel-2، الجهد الأكسدي الاختزالي، جودة المياه، الإحصاء البيئي، النمذجة الإحصائية.

* مدرس في قسم الهندسة الطبوغرافية – كلية الهندسة المدنية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.
✉ assem.khatib@latakia-univ.edu.sy
** مدرس في قسم الفيزياء البحرية – المعهد العالي للبحوث البحرية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.
✉ mouhannad.amin.hassan@latakia-univ.edu.sy

Integrating Remote Sensing Techniques and Statistical Modeling to Estimate Oxidation–Reduction Potential (ORP): A Case Study of the Al-Kabir Al-Shamali Estuary

Dr. Eng Assem Khatib* Dr. Mouhannad Hassan**

Abstract

Oxidation–reduction potential (ORP) is a key indicator for assessing the water quality in coastal estuarine environments; however, intensive field-based measurements of ORP remain limited in both spatial and temporal coverage. This study aims to evaluate the potential of Sentinel-2 satellite data, integrated with empirical statistical modeling, to estimate the spatial distribution of ORP values in the estuarine zone of the Al-Kabir Al-Shamali River during the dry season. A field-based marine survey was conducted to collect in situ ORP measurements, which were subsequently linked to spectral reflectance values and spectral ratios derived from Sentinel-2 imagery. A series of statistical analyses was then performed to identify the spectral variables most strongly correlated with ORP, followed by the development and performance evaluation of a set of univariate and multivariate statistical models using both linear and non-linear formulations.

The results demonstrate that spectral ratios, particularly G/B and R/B, exhibit higher explanatory power for ORP variability compared to individual spectral bands. The multivariate linear model combining the G/B and NIR/B ratios achieved the best performance, yielding a coefficient of determination of 0.57 with acceptable estimation errors (RMSE=6.7mV and MAE=6.0mV). The application of this optimal model enabled the generation of a spatial distribution map of ORP values, revealing a clear gradient from reducing

conditions in riverine waters near the estuary to more oxidizing conditions in the open marine environment.
The findings of this study indicate that integrating multispectral remote sensing data with empirical statistical modeling represents an effective approach for supporting ORP monitoring in coastal estuarine environments, particularly in regions with limited regular field measurements, and contributes to a more comprehensive understanding of coastal water biogeochemical dynamics.

Keywords: Remote sensing, Sentinel-2, Oxidation-reduction potential, Water Quality, Environmental statistics, Statistical modeling.

* Assistant Professor, Department of Topographic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Latakia University, Latakia, Syria.
✉ assem.khatib@latakia-univ.edu.sy
** Assistant Professor, Department of Marin physics, High Institute of Marine Research, Latakia University, Latakia, Syria.
✉ mouhannad.amin.hassan@latakia-univ.edu.sy

1 مقدمة

تُعدّ مصبات الأنهار من أكثر البيئات المائية ديناميكية، إذ تتميز بتداخل قوي بين المياه العذبة النهرية والمياه البحرية المالحة، ما يؤدي إلى نشوء تدرجات حادة في الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، تنعكس بشكل مباشر على جودة المياه وبنية النظم البيئية الساحلية. ويجعل هذا التداخل المصبات نظماً بيئية شديدة الحساسية للتغيرات الطبيعية والضغوط البشرية، بما في ذلك التصريفات الصحية والزراعية والصناعية، والتقلبات الهيدرولوجية الموسمية، الأمر الذي يفرض تحديات كبيرة أمام عمليات الرصد والتقييم البيئي المستمر [1].

يُعدّ الجهد الأكسدي الاختزالي (Oxidation–Reduction Potential, ORP) أحد البارامترات الكيميائية الأساسية التي تعكس الحالة الديناميكية للتفاعلات الأكسدية والاختزالية في البيئات المصبّية. إذ يلعب ORP دوراً محورياً في التحكم بمصير العديد من العناصر

الكيميائية والملوثات، من خلال تأثيره المباشر على سلوك المعادن الثقيلة وترسيبها أو إعادة ذوبانها، وكذلك على تحرر المغذيات، مثل الفوسفور، من الرواسب في الظروف المختزلة [2].

أظهرت دراسة [3] أن ارتفاع قيم ORP يرتبط بزيادة تركيز الأكسجين المذاب، ما يجعله مؤشراً فعالاً لتوصيف عمليات التلبد (Flocculation) وانتقال المواد العالقة في مناطق التداخل بين المياه النهرية والمياه البحرية. في المقابل، ترتبط قيم ORP المنخفضة بظروف مختزلة قد تؤدي إلى زيادة السمية البيئية، ونقص الأكسجين، وتدهور النظم البيئية الساحلية، مما يعزز من أهمية هذا البارامتر في تقييم جودة المياه وقدرة المصبات على التنقية الذاتية [4].

تعتمد الطرائق التقليدية لرصد ORP على قياسات ميدانية مباشرة باستخدام أقطاب كهروكيميائية مرجعية، تتيح تقديراً فورياً ودقيقا للحالة الأكسدية الاختزالية للوسط المائي [6] ,[5]. وعلى الرغم من الدقة المرتفعة لهذه الطرائق، إلا أنها تعاني من محدودية التغطية المكانية والزمانية وارتفاع الكلفة التشغيلية، وبشكل خاص في البيئات الساحلية المعقدة مثل مصبات الأنهار [7]. وقد أدى ذلك إلى تنامي الاهتمام باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد كأداة داعمة لبرامج الرصد البيئي، نظراً لقدرتها على توفير بيانات متعددة الأطياف، واسعة النطاق، ومتكررة زمنيا، يمكن توظيفها لاستخلاص مؤشرات طيفية مرتبطة بخصائص المياه الفيزيائية والكيميائية.

تستند تطبيقات الاستشعار عن بعد في تقييم جودة المياه بشكل أساسي إلى أساليب النمذجة الإحصائية التجريبية، حيث يتم تطوير علاقات كمية بين الانعكاسية الطيفية للمياه في النطاقات متعددة الأطياف والقيم المقاسة ميدانياً لبارامترات جودة المياه. وتسمح هذه النماذج بربط التغيرات الطيفية للمياه بعمليات بيئية وبيوجيوكيميائية معقدة، مما يجعلها أداة فعالة لتقدير خصائص المياه في المناطق التي يصعب فيها إجراء قياسات ميدانية كثيفة أو مستمرة [9] ,[8].

نظراً لتوافرها المجاني من جهة، ولامتلاكها خصائص مكانية وطيفية متميزة من جهة أخرى، تُعدّ صور الأقمار الصناعية Sentinel-2 من أبرز بيانات الاستشعار عن بعد المستخدمة في طيف واسع من التطبيقات البيئية والمكانية. فقد تم استخدامها، على سبيل المثال، بالتكامل مع نظم المعلومات الجغرافية في رسم خرائط المناطق المبنية ومراقبة التوسع العمراني ,[10]

[11]، وكذلك في رسم خرائط البيوت المحمية البلاستيكية [12]. كما أثبتت العديد من الدراسات الحديثة فاعلية المؤشرات الطيفية المستخرجة من صور Sentinel-2 في تقدير البارامترات النشطة بصرياً مثل الكلوروفيل، المواد العالقة، والمواد الذائبة الملونة [13] ,[9]. ومع ذلك، لا يزال عدد الدراسات التي تناولت البارامترات الكيميائية غير المرئية بصرياً، مثل ORP، محدوداً نسبياً، ولا سيما في البيئات الساحلية الانتقالية التي تتسم بتباين مكاني وزمني مرتفع وتعقيد بيوجيوكيميائي واضح [14] ,[13].

أما على الصعيد المحلي، لا تزال الدراسات التي توظف تقنيات الاستشعار عن بعد في البحوث البحرية السورية محدودة، وقد تناولت هذه الدراسات بشكل رئيسي مجالات مراقبة درجة حرارة سطح البحر في المياه البحرية السورية [15] والكشف عن التلوث الحراري المرتبط بتشغيل محطة الطاقة الحرارية في بانياس [16]، مع غياب واضح للدراسات التي تعالج المؤشرات الكيميائية لجودة المياه في المناطق المصبّية.

2 هدف البحث وأهميته

يهدف البحث إلى:

- تحليل العلاقة بين ORP والخصائص الطيفية للمياه الساحلية في المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي، من خلال دمج القياسات الميدانية مع البيانات الطيفية لصور القمر الصناعي Sentinel-2.
- تحديد المتغيرات (القنوات والنسب الطيفية) الأكثر ارتباطاً بقيم ORP، بما يسمح بفهم أفضل للتفاعلات البيوجيوكيميائية التي تتحكم في الحالة الأكسدية الاختزالية للمياه في منطقة الانتقال من المياه النهرية إلى المياه البحرية خلال موسم الجفاف الذي تتسم بانخفاض التصريف النهري وزيادة تأثير المدخلات المحلية.
- تطوير نماذج إحصائية تجريبية لتقدير قيم ORP اعتماداً على المتغيرات الطيفية المختارة، وتقييم أدائها من خلال مقارنة عدة تقنيات نمذجة، تشمل الانحدار الخطي البسيط (Simple

Linear Regression)، وانحدار القوة (Power Regression)، والانحدار الأسي (Exponential Regression)، والانحدار الخطي متعدد المتغيرات (Polynomial Linear Regression). يتيح هذا النهج المقارن تحديد النموذج الأكثر ملاءمة من حيث الدقة الإحصائية وقابلية التفسير الفيزيائي، بما يعزز موثوقية استخدام بيانات الاستشعار عن بعد في تقدير ORP.

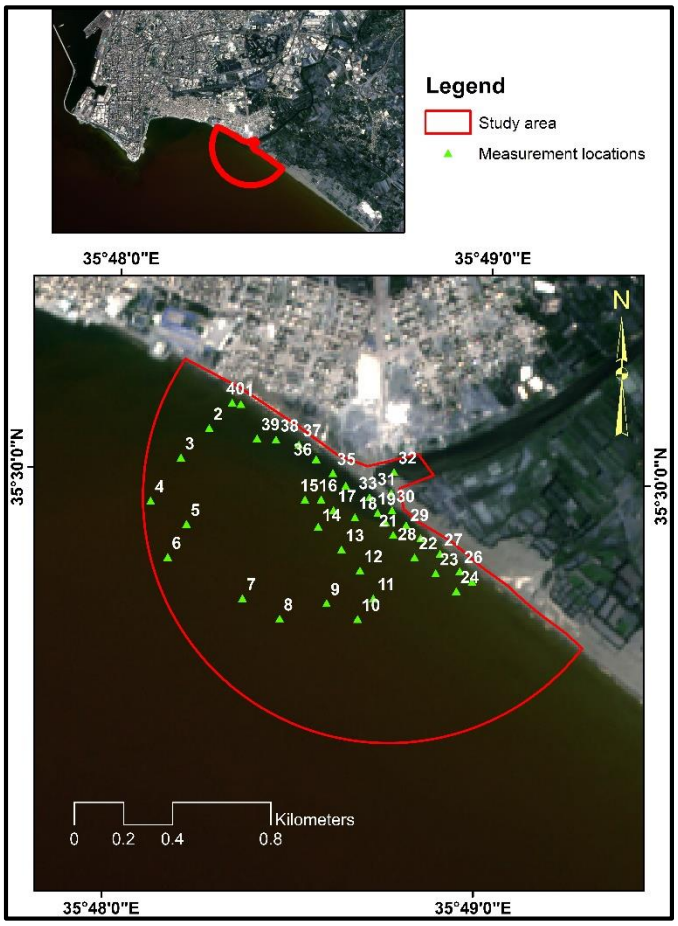
تكمن أهمية هذه الدراسة في كونها من أوائل الدراسات التي توظف تقنيات الاستشعار عن بعد والنمذجة الإحصائية التجريبية لتقدير ORP في المياه الساحلية السورية، وهي منطقة تعاني من نقص في البيانات البحرية المنتظمة. كما توفر الدراسة إطاراً منهجياً عملياً يمكن اعتماده في برامج المراقبة البيئية الساحلية، خاصة في المناطق التي يصعب فيها إجراء قياسات ميدانية مكثفة. ويسهم هذا الإطار في دعم جهود إدارة جودة المياه، وتقييم التأثيرات البيئية للتصريفات النهرية خلال مواسم الجفاف.

3 مواد وطرائق البحث

3.1 منطقة الدراسة

ينبع نهر الكبير الشمالي من جبل الأقرع والجبال الساحلية السورية، ويتجه غرباً ليصب في البحر الأبيض المتوسط جنوب مدينة اللاذقية. ويُعد هذا النهر من أغزر الأنهار الساحلية في سورية، كما يُعتبر مصبه من المناطق البيئية الساحلية ذات الأهمية الخاصة، إذ حظي باهتمام عدد من الدراسات في مجال البحوث البحرية والبيئية، نظراً لدوره في نقل المواد المغذية والملوثات من الحوض النهري إلى البيئة البحرية الساحلية [17].

يبلغ التدفق الوسطي السنوي للنهر، وفق الدراسات الهيدرولوجية المتاحة، حوالي $6.82\ m^3/s$ [18]. تم تحديد منطقة الدراسة ضمن نطاق يمتد حتى 1km من نقطة المصب باتجاه المياه المفتوحة (الشكل 1)، بما يوفّر تمثيلاً مكانياً كافياً لالتقاط التدرج في قيم ORP الناتج عن تداخل المياه النهرية والبحرية.



الشكل 1: منطقة الدراسة وتوزع محطات القياس

يتميز نهر الكبير الشمالي بتصريف مرتفع خلال موسم الأمطار، يقابله انخفاض ملحوظ في التصريف خلال موسم الجفاف، حيث تهيمن في هذه الفترة تصريفات ذات طابع زراعي وصناعي وصحي. وتُعد هذه الظروف الهيدرولوجية مناسبة لدراسة الحالة الأكسدية الاختزالية للمياه الساحلية القريبة من المصب، نظرا لانخفاض التصريف الهيدرولوجي وزيادة تأثير المدخلات المحلية على الخصائص الكيميائية للمياه.

3.2 البيانات المستخدمة

يعتمد قمر Sentinel-2 على مستشعر التصوير متعدد الأطياف (MultiSpectral Instrument, MSI) الذي يقوم بتسجيل الأشعة المنعكسة عن سطح الأرض عبر 13 نطاقاً طيفياً موزعة على أجزاء مختلفة من الطيف الكهرومغناطيسي، تمتد من النطاق الأزرق وصولاً إلى الأشعة تحت الحمراء قصيرة الموجة. تُقسَّم هذه النطاقات من حيث الدقة التمييزية المكانية إلى ثلاث فئات رئيسية تشمل نطاقات بدقة تمييزية مكانية 10m (وتضم الأزرق، الأخضر، الأحمر، وتحت الأحمر القريب)، ونطاقات بدقة تمييزية مكانية 20m (وتضم ثلاثة قنوات طيفية عند حافة النطاق الأحمر (Red Edge Bands)، بالإضافة إلى نطاقين في الأشعة تحت الحمراء القريبة الضيقة وقصيرة الموجة)، ونطاقات بدقة تمييزية مكانية 60m (وتشمل النطاق الساحلي، نطاق بخار الماء، ونطاق كشف السحب الرقيقة) [19]. يتيح هذا التوزيع المتدرّج للأطوال الموجية والدقة التمييزية المكانية تحقيق توازن بين التفاصيل المكانية العالية والتغطية الطيفية الواسعة، مما يمنح بيانات Sentinel-2 قدرة كبيرة على توصيف الخصائص الفيزيائية والبصرية لسطح الأرض والمسطحات المائية بدقة مكانية وطيفية متكاملة.

في هذا البحث، من أجل الحصول على بيانات طيفية تتوافق مع التباين المكاني المرتفع المتوقع لقيم ORP، استُخدمت النطاقات الطيفية ذات الدقة التمييزية المكانية (10m) من صور Sentinel-2، وهي: النطاق الأزرق ذو الطول الموجي المركزي (0.490µm)، والنطاق الأخضر (0.560µm)، والنطاق الأحمر (0.665µm)، ونطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة (0.842µm)، وذلك لمنطقة الدراسة وبتاريخ يتزامن مع إجراء القياسات الميدانية. تم تحميل الصور من المستوى الثاني (Level-2A) المعالجة راديومترياً وهندسياً عبر بوابة البيانات التابعة لوكالة الفضاء الأوروبية (https://dataspace.copernicus.eu/)، تم الوصول إليه في 1 تشرين الأول 2025).

3.3 البرامج والأدوات المستخدمة

- **برنامج ArcMap**

يُعد برنامج ArcMap أحد التطبيقات المكتبية المتقدمة ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (Geographic Information Systems, GIS)، والمطوّر من قبل شركة (ESRI https://www.esri.com). يوفر هذا البرنامج مجموعة متكاملة من الأدوات المخصصة لإدارة وتحليل البيانات المكانية بمختلف أشكالها، بما في ذلك البيانات النقطية (Raster) مثل صور الأقمار الصناعية، إضافة إلى إمكانات متقدمة في التحليل المكاني وإنتاج الخرائط الكارتوغرافية. استُخدم هذه الدراسة برنامج ArcMap لمعالجة البيانات الطيفية لصور القمر الصناعي Sentinel-2، بما في ذلك استيراد القنوات الطيفية، اقتطاع الصور ضمن حدود منطقة الدراسة، وحساب النسب والمؤشرات الطيفية. كما استُخدم البرنامج لربط البيانات الفضائية بمواقع القياسات الميدانية اعتماداً على الإحداثيات الجغرافية، واستخراج القيم الطيفية المقابلة لكل محطة قياس. إضافة إلى ذلك، جرى توظيف أدوات العرض والتحليل المكاني في ArcMap لإنتاج الخرائط الغرضية التي تُمثّل التوزع المكاني لقيم ORP، مما أتاح تفسير النتائج ضمن سياقها المكاني والبيئي.

- **برنامج SPSS**

يُعد برنامج SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) من أكثر البرمجيات الإحصائية استخداماً في التحليل الكمي للبيانات في الدراسات البيئية والعلمية. يوفّر البرنامج مجموعة واسعة من الاختبارات والأساليب الإحصائية التي تتيح تحليل البيانات الوصفية والاستنتاجية بكفاءة عالية. استُخدم في هذا البحث برنامج SPSS لتنفيذ جميع التحليلات الإحصائية، بما في ذلك اختبار القيم الشاذة، وفحص الافتراضات الإحصائية للتوزيع الطبيعي، وتحليل الارتباط باستخدام معامل بيرسون، إضافة إلى تطوير النماذج الإحصائية التجريبية وتقييم أدائها. كما استُخدم البرنامج في حساب مؤشرات الخطأ الإحصائي ومعاملات النمذجة.

- **جهاز NF-C600**

يُعد جهاز NF-C600 جهازا رقمياً محمولاً مخصصاً لقياس بارامترات جودة المياه. في هذه الدراسة، تم استخدام الجهاز لقياس قيم ORP ميدانياً. تبلغ دقة الجهاز في قياس ORP نحو ±5mV، وهي دقة مناسبة لرصد التغيرات الدقيقة في الحالة الأكسدية الاختزالية للمياه في البيئات المصبية.

- **تطبيق GPSData**

لتحديد المواقع الجغرافية لمحطات القياس بدقة، تم استخدام تطبيق GPSData المثبت على الهواتف الذكية، والذي يعتمد على نظام تحديد المواقع العالمي (Global Positioning System, GPS). تم التوقف عند كل محطة قياس لفترة زمنية كافية لزيادة عدد الأقمار الصناعية المرصودة وتحسين جودة القياسات، حيث سُجلت الإحداثيات بدقة مكانية أفضل من ±5m. يضمن هذا المستوى من الدقة مطابقة مكانية دقيقة بين مواقع القياسات الميدانية والبكسلات المقابلة لها في صور Sentinel-2. ويُعد هذا التوافق المكاني عنصراً أساسياً لضمان صحة عملية الربط بين البيانات الميدانية والبيانات الطيفية المستخرجة من صور الأقمار الصناعية.

4 منهجية البحث

شملت منهجية البحث المراحل الرئيسية التالية:

4.1 إجراء القياسات الميدانية

تم التخطيط لتنفيذ رحلة بحرية ميدانية بحيث تتزامن مع مرور قمر Sentinel-2 فوق منطقة الدراسة، مع السماح بفارق زمني لا يتجاوز ساعة واحدة وذلك لضمان التوافق الزمني بين القياسات الميدانية والبيانات الفضائية من حيث الظروف البيئية السائدة. جرى تحديد محطات القياس وفق مخطط مُعدّ مسبقاً، مع مسافات بينية تراوحت بين m(250–100)، مع تكثيف المحطات في المنطقة القريبة من فم النهر بهدف تمثيل التباين المكاني الحاد المتوقع في قيم ORP ضمن منطقة تداخل المياه النهرية والبحرية.

تم تنفيذ الرحلة الميدانية بتاريخ 28 سبتمبر 2025 الساعة 11:00 صباحا بالتوقيت المحلي، في يوم خال من الغيوم، بما يضمن الحصول على بيانات طيفية عالية الجودة من Sentinel-2 دون تأثيرات كبيرة للعوامل الجوية. في كل محطة قياس، تم تسجيل قيم ORP من المياه على عمق أقل من 0.5m كما تم تحديد الإحداثيات الجغرافية لكل محطة.

في المجموع، تم إجراء القياسات في 40 محطة ميدانية موزعة على امتداد المنطقة المصبية، كما هو موضح في (الشكل 1). ويتيح هذا التوزيع المكاني التقاط التغيرات المحلية في ORP بدقة، كما يوفر قاعدة بيانات موثوقة لدعم التحليل الإحصائي وتطوير النماذج التجريبية المعتمدة على بيانات Sentinel-2.

4.2 المعالجة الطيفية لصور Sentinel-2 وربطها بالقياسات الميدانية

بعد الحصول على صور Sentinel- 2، تم استيراد جميع القنوات الطيفية إلى GIS لمعالجتها. شملت هذه العملية حساب جميع النسب الممكنة بين القنوات الطيفية (Spectral Ratios). تم بعد ذلك إدراج مواقع القياسات الميدانية باستخدام الإحداثيات الجغرافية المسجلة عبر نظام تحديد المواقع العالمي (GPS) ضمن نفس الإسقاط الكارتوغرافي لصور Sentinel- 2.

تم استخراج قيم القنوات الطيفية والنسب الطيفية عند كل محطة قياس ميدانية لضمان تمثيل دقيق لكل موقع قياس. كما تم اقتطاع المشاهد الفضائية ضمن حدود منطقة الدراسة فقط، لتحسين كفاءة المعالجة والتحليل الإحصائي اللاحق.

ولضمان أن القيم الطيفية المستخرجة تمثل المسطحات المائية حصراً في منطقة المصب، تم تطبيق مؤشر الفرق المعياري للمياه (Normalized Difference Water Index, NDWI)، المحسوب وفق المعادلة التالية [20]:

$$NDWI = \frac{p(G) - p(NIR)}{p(G) + p(NIR)} \qquad (1)$$

حيث G تمثل القناة الخضراء، وNIR القناة تحت الحمراء القريبة. وبناء على قيم المؤشر، تم استبعاد البكسلات ذات القيم الصفرية والسالبة، إذ تشير القيم الموجبة لمؤشر NDWI إلى وجود مياه سطحية، ما يضمن أن القيم الطيفية المستخدمة في التحليل اللاحق ترتبط فعلياً بالبيئة المائية للمصب، ويقلل من تأثير بكسلات اليابسة أو البكسلات المختلطة على نتائج النمذجة الإحصائية.

4.3 تطوير واختبار أداء النماذج الإحصائية التجريبية

4.3.1 اختبار القيم الشاذة والتحقق من الافتراضات الإحصائية

قبل تطوير النماذج الإحصائية التجريبية، تم تطبيق طريقة المدى الربيعي (Interquartile Range, IQR) للكشف عن القيم الشاذة المحتملة في بيانات ORP، وذلك لضمان استقرار معاملات النمذجة وتحسين موثوقية النتائج [21]. جرى تنفيذ هذه التحليل باستخدام البرنامج الإحصائي SPSS. تعتمد طريقة IQR على توصيف تشتت البيانات دون افتراض شكل توزيعي مسبق، مما يجعلها مناسبة للبيانات البيئية التي قد تتأثر بتقلبات مكانية محلية أو أخطاء قياس عرضية.

يُعرّف IQR على أنه الفرق بين الربيع الثالث Q_3 والربيع الأول Q_1:

$$IQR = Q_3 - Q_1$$

وبناء على ذلك، يتم تحديد حدود القيم المقبولة إحصائياً، أي الحد الأدنى L والحد الأعلى U ، كالآتي:

$$L = Q_1 - 1.5 \times IQR;\ U = Q_3 + 1.5 \times IQR \qquad (2)$$

تُصنَّف أي قيمة تقع خارج هذا النطاق على أنها قيمة شاذة (Outlier). في هذه الدراسة، تم استبعاد القيم الشاذة التي تم تحديدها باستخدام هذه الطريقة من التحليلات اللاحقة، لتقليل تأثيرها المحتمل على تقدير معاملات الانحدار، وزيادة دقة العلاقات الارتباطية بين المتغيرات.

بعد استبعاد القيم الشاذة المحددة، تم فحص خصائص التوزيع الإحصائي لبيانات ORP باستخدام اختبار شابيرو–ويلك (Wilk–Shapiro) لتحديد مدى ملاءمة استخدام الأساليب الإحصائية المعتمدة على افتراض التوزيع الطبيعي، وهو افتراض أساسي لتحليل الارتباط وتطوير النماذج الإحصائية التجريبية. في هذا الاختبار، تنص الفرضية الصفرية H_0 على أن البيانات تتبع توزيعاً طبيعياً، بينما تشير الفرضية البديلة H_1 إلى عدم تحقق هذا الافتراض. يعتمد القرار على قيمة الاحتمالية p عند مستوى دلالة محدد α [22].

4.3.2 تحليل الارتباط واختيار المتغيرات الطيفية الأكثر ملاءمة

بعد التأكد من التوزيع الطبيعي لقيم ORP، ولتحديد المتغيرات الطيفية الأكثر ملاءمة لتقدير هذا البارامتر اعتماداً على البيانات الطيفية للقمر الصناعي Sentinel–2، تم إجراء تحليل ارتباط بيرسون (Pearson correlation analysis) بين قيم ORP المقاسة ميدانياً والقيم الطيفية للقنوات الطيفية الفردية، إضافة إلى جميع النسب الطيفية الممكنة المحسوبة بين هذه القنوات. يهدف هذا التحليل إلى تقييم قوة واتجاه العلاقة الخطية بين المتغيرات الطيفية وقيم ORP، وتحديد أكثرها تمثيلاً للتغيرات البيوجيوكيميائية في منطقة الدراسة.

يُحسب معامل بيرسون وفق الصيغة الرياضية الآتية [23]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \qquad (3)$$

حيث، r: معامل ارتباط بيرسون؛ x_i, y_i: القيم الفردية للمتغيرين (ORP والمتغير الطيفي)، $\overline{x}, \overline{y}$: المتوسطات الحسابية لكل من للمتغيرين؛ n: عدد القياسات.

تتراوح قيم معامل الارتباط بين -1 و $+1$، حيث تشير القيم الموجبة المرتفعة إلى علاقة خطية موجبة قوية، في حين تدل القيم السالبة المرتفعة (بالقيمة المطلقة) على علاقة خطية سالبة قوية، بينما تشير القيم القريبة من الصفر إلى ضعف أو غياب العلاقة الخطية بين المتغيرين. بناء على نتائج تحليل الارتباط، تم اختيار المتغيرات الطيفية التي أظهرت أعلى قيم ارتباط معنوية مع ORP.

4.3.3 تطوير النماذج الإحصائية التجريبية

تم تطوير واختبار مجموعة من النماذج الإحصائية التجريبية اعتماداً على المتغيرات الطيفية التي أظهرت أعلى مستويات الارتباط مع ORP، وذلك بهدف تقدير قيمة هذا البارامتر من بيانات القمر الصناعي Sentinel-2. شملت عملية النمذجة اختبار المتغيرات الأكثر ارتباطا بشكل فردي، إضافة إلى دمجها في نماذج متعدد المتغيرات، وفق الأشكال الرياضية التالية [23]:

1. نموذج الانحدار الخطي البسيط. ويُعطى بالعلاقة:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x \qquad (4)$$

حيث، β_0: الحد الثابت (Intercept)؛ β_1: معامل الانحدار (Slope)؛ x: المتغير الطيفية المستقل.

2. نموذج الانحدار الأسي، ويُعطى بالعلاقة:

$$\hat{y} = ae^{bx} \qquad (5)$$

a: ثابت المقياس (Scaling factor)؛ b: معامل التغير الأُسّي (Exponential rate coefficient)؛ e: قاعدة اللوغاريتم الطبيعي.

3. نموذج الانحدار بالقوة، ويُعطى العلاقة:

$$\hat{y} = ax^b \qquad (6)$$

a: ثابت النموذج؛ b: معامل القوة (Power coefficient)؛

4. نموذج الانحدار متعدد المتغيرات، ويُعطى بالعلاقة:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_n x_n \qquad (7)$$

β_0 : الحد الثابت؛ $\beta_i, i = 1,2,...,n$: معاملات الانحدار؛ و n : عدد المتغيرات. تم تقدير معاملات النماذج الإحصائية باستخدام طريقة المربعات الصغرى.

في هذه الدراسة، تم تحديد النموذج الأمثل للانحدار متعدد المتغيرات بالاعتماد على المتغيرات الطيفية التي أظهرت أعلى درجات الارتباط مع قيم ORP. ومن بين مجموعة نماذج الانحدار متعددة المتغيرات المختبرة، تم اختيار النموذج الذي يحقق أعلى قيمة لمعامل التحديد R^2، مع التأكد في الوقت نفسه من تحقق شرط الاستقلالية الخطية بين المتغيرات المستقلة. ولغرض الكشف عن مشكلة التعدد الخطي (Multicollinearity) وتقييم مدى استقلالية المتغيرات المستقلة، تم استخدام معامل تضخم التباين (Variance Inflation Factor, VIF)، والذي يُحسب وفق العلاقة التالية [24]:

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \qquad (8)$$

حيث، VIF_i: عامل تضخم البيانات للمتغير المستقل x_i؛ R_i^2: معامل التحديد الناتج عن انحدار المتغير المستقل x_i على باقي المتغيرات المستقلة الأخرى في النموذج.

تشير القيم المرتفعة لمعامل VIF إلى وجود تعدد خطي قوي بين المتغيرات المستقلة. وبناء على هذا المعيار، تم اعتبار أي متغير طيفي يحقق $VIF \prec 5$ مناسبا للاستخدام كمدخل مستقل في النماذج الإحصائية التجريبية للانحدار الخطي متعدد المتغيرات، بما يضمن استقرار معاملات النموذج وتحسين قابليته التنبؤية والتفسيرية.

4.3.4 تقييم واختبار أداء النماذج المطورة

لتقييم قدرة النماذج الإحصائية التجريبية على تقدير قيم ORP، تم تقسيم بيانات القياس الميداني إلى مجموعة تطوير (Training Set) تمثل 75% من القياسات، ومجموعة اختبار (Testing

Set) تمثل 25% منها. استُخدمت مجموعة التطوير لتقدير معاملات النماذج، بينما استُخدمت مجموعة الاختبار لتقييم الأداء على بيانات لم تُستخدم في مرحلة التدريب.

تم حساب مؤشرات الأداء الرئيسية للنماذج باستخدام مجموعة الاختبار، وتشمل 1) معامل التحديد (Coefficient of Determination) R^2 ، 2) جذر متوسط الخطأ التربيعي (Root Mean Squared Error) $RMSE$، و3) متوسط الخطأ المطلق (Mean Absolute Error) MAE وفق المعادلات التالية:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2} \qquad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \qquad (10)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^{n}\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{n} \qquad (11)$$

y_i: القيمة الفعلية للمتغير التابع؛ $\hat{y}_i$: القيمة التنبؤية المقدرة وفق النموذج؛ $\bar{y}_i$: المتوسط الحسابي وفق القيم الفعلية؛ n: عدد القياسات في مجموعة الاختبار.

تم اختيار النموذج الأمثل على أساس تحقيق أفضل أداء تفسيري مع قيم مقبولة لأخطاء $RMSE$ و MAE. ولضمان استقرار معاملات النموذج نظراً لصغر حجم العينة نسبياً (n=40)، تم استخدام طريقة إعادة المعاينة (Bootstrap) مع 1000 تكرار لتقدير التوزيع الاحتمالي لمعاملات النماذج وتقييم استقرارها الإحصائي.

أخيرا، تم تطبيق النموذج الأمثل على صور Sentinel-2 لإنتاج خريطة التوزع المكاني لقيم ORP بهدف الفحص البصري للتوزع المكاني، وتحليل الاختلافات المحلية في المنطقة المصبية، وبالتالي تقييم موثوقية النموذج في التقاط التباين المكاني لقيم ORP.

5 النتائج والمناقشة

5.1 التدرج الأكسدي الاختزالي في المنطقة القريبة من مصب النهر

أظهرت القياسات الميدانية لقيم ORP (الجدول 1) تبايناً ملحوظاً ضمن مسافة 1km من مصب النهر. تشير القيم السالبة المرتفعة (بالقيمة المطلقة) إلى وجود ظروف مختزلة قوية في المياه القريبة من المصب. يعزى هذا إلى تراكم المواد العضوية المتحللة، نقص الأكسجين المذاب، وقلة تجديد المياه نتيجة انخفاض التصريف للنهر في هذه الفترة. هذه الظروف تسهم في تعزيز التفاعلات الكهروكيميائية الاختزالية، بما في ذلك عمليات التحلل الهوائي واللاهوائي للمواد العضوية، مما يؤدي إلى انخفاض قيم ORP.

الجدول 1: بيانات ORP المقاسة ميدانياً

№	ORP (mV)	№	ORP (mV)	№	ORP (mV)	№	ORP (mV)
1	17	**11**	15.5	**21**	2	**31**	−14
2	16	**12**	21	**22**	1	**32**	−45
3	16.5	**13**	19.5	**23**	1.5	**33**	−10
4	8	**14**	18	**24**	1.5	**34**	−7.5
5	12.5	**15**	17.5	**25**	3	**35**	−5.5
6	13	**16**	13	**26**	1	**36**	−6
7	27.5	**17**	11.5	**27**	3.5	**37**	−5
8	25	**18**	7	**28**	−1	**38**	−3
9	15	**19**	0	**29**	−1	**39**	−7.5
10	7	**20**	27.5	**30**	−13	**40**	−6.5

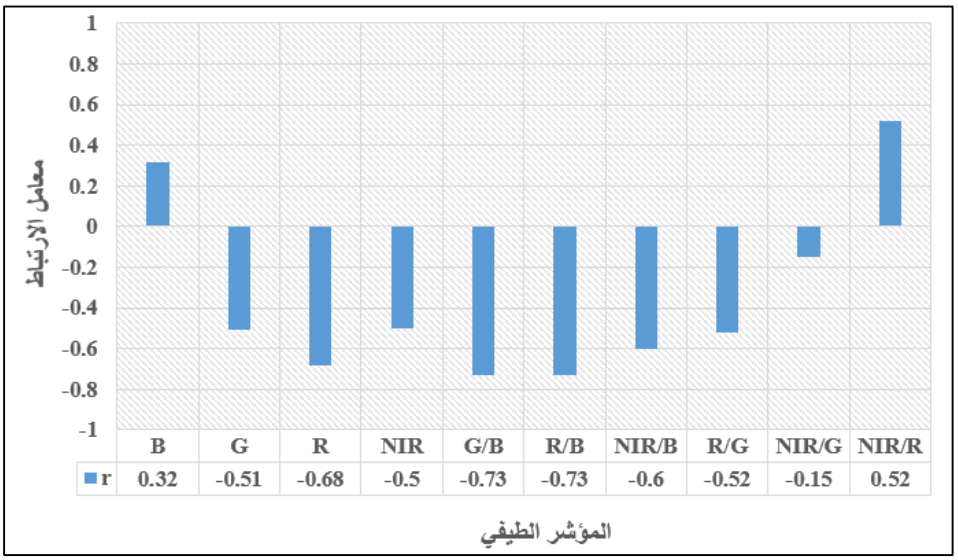
في المقابل، تم تسجيل القيم الموجبة في النقاط الأكثر اختلاطا مع المياه البحرية، ما يعكس حالة أكسدية جزئية نتيجة التهوية السطحية والتأثيرات البحرية. يشير هذا التباين إلى وجود منطقة انتقالية ديناميكية حيث تتداخل المياه النهرية المختزلة مع المياه البحرية المؤكسدة، مما ينتج عنه تدرج مكاني شديد الوضوح في حالة ORP ضمن المنطقة المصبية. وسيتم مناقشة التوزع المكاني لقيم ORP بمزيد من التفصيل في فقرة لاحقة.

5.2 تحديد المتغيرات الطيفية الأكثر ارتباطا بقيم ORP باستخدام تحليل القيم الشاذة وتحليل الارتباط

أظهر تحليل IQR أن إحدى القياسات الميدانية المسجلة في المحطة رقم 32 تُعد قيمة شاذة إحصائياً، وتم استبعادها من التحليلات الإحصائية اللاحقة لتجنب تأثيرها السلبي المحتمل على دقة تقديرات معاملات النماذج الإحصائية واستقراراها في ظل العدد المحدود نسبياً للقياسات الميدانية.

بعد استبعاد القيمة الشاذة، تم فحص الخصائص الإحصائية لتوزيع متغير ORP للتحقق من طبيعة ملاءمته للتحليلات اللاحقة. أظهرت نتائج اختبار Shapiro–Wilk عدم إمكانية رفض فرضية التوزيع الطبيعي عند مستوى دلالة $\alpha = 0.05$، حيث بلغت قيمة الاحتمالية الإحصائية $p-value = 0.26$. يشير ذلك إلى أن بيانات ORP تتبع توزيعاً طبيعياً، مما يبرر استخدام الأساليب الإحصائية البارامترية.

بعد ذلك، فُحصت العلاقة بين قيم ORP المقاسة ميدانياً والقيم في كل من القنوات الطيفية الفردية والنسب الطيفية من صور Sentinel-2 بهدف تحديد المتغيرات المستقلة الأكثر ملاءمة لتطوير نماذج تقدير موثوقة لقيم ORP. أظهرت نتائج تحليل معامل ارتباط بيرسون (الشكل 2) وجود تباين واضح في قوة واتجاه العلاقات الارتباطية بين المتغيرات الطيفية وقيم ORP ضمن منطقة الدراسة.



الشكل 2: معامل الارتباط بين الجهد الأكسدي الاختزالي والمؤشرات الطيفية

على مستوى النطاقات الطيفية الفردية، أظهر النطاق الأزرق (B) ارتباطاً موجباً ضعيفاً مع ORP (r=0.32)، في حين أظهرت النطاقات الخضراء (G) والحمراء (R) وتحت الحمراء القريبة (NIR) ارتباطات سالبة تراوحت بين متوسطة وقوية مع ORP (r=−0.51, −0.68, −0.50) على التوالي.

تعكس هذه الأنماط الارتباطية الطبيعة البيوجيوكيميائية المعقدة للبيئات المصبية، التي تتميز بارتفاع تركيز المواد العضوية الذائبة والمعلقة والكلوروفيل-أ، والتي ترتبط عادة بانخفاض قيم ORP نتيجة زيادة الاستهلاك الحيوي والكيميائي للأكسجين. وترتبط خصائص الانعكاسية الطيفية للمياه في المناطق المصبية بجميع المواد النشطة بصرياً، حيث تسهم وفرة المواد المعلقة القادمة مع المياه النهرية في زيادة الانعكاسية الطيفية في النطاقين الأحمر وتحت الأحمر القريب مقارنة بالمياه البحرية المفتوحة [25]. في المقابل، تؤدي وفرة المواد العضوية الذائبة، التي تتميز بامتصاص الأشعة في النطاق الأزرق، إلى خفض الانعكاسية الطيفية في هذا

النطاق مقارنة بالمياه البحرية [26]. كما تؤدي زيادة تراكيز الكلوروفيل-أ إلى رفع الانعكاسية الطيفية في النطاق الأخضر مقارنة بالمياه البحرية [1].

عند تحليل النسب الطيفية، لوحظ تحسن واضح في قوة العلاقات الارتباطية مع قيم ORP مقارنة باستخدام النطاقات الفردية. فقد أظهرت نسبتا G/B وR/B ارتباطاً سالباً قوياً جداً مع ORP (r=−0.73) لكل منهما، بينما أظهرت نسبة NIR/B ارتباطا سالباً قوياً نسبياً (r=−0.60). كما أظهرت نسبة NIR/R ارتباطاً موجباً متوسطاً (r=0.52)، وأظهرت نسبة R/G ارتباطاً متوسطاً سالباً (r=0.52)، في حين سجلت نسبة NIR/G ارتباطاً ضعيفاً جداً (r=−0.15)، مما يشير إلى محدودية قدرتها على تفسير التغيرات في قيم ORP.

تشير هذه النتائج إلى أنه على الرغم من أن النطاق الأزرق منفرداً يمتلك قدرة تفسيرية محدودة لقيم ORP، فإن دمجه ضمن النسب الطيفية يؤدي إلى تعزيز ملحوظ في قوة الارتباط. ويُعزى ذلك إلى أن النسب الطيفية تقلل من تأثير العوامل الخارجية المشتركة، مثل الإضاءة وهندسة الرصد، وتُبرز التباينات النسبية في الخصائص البصرية للمياه [27] ,[9]. يكتسب هذا الأمر أهمية خاصة في مناطق تداخل المياه النهرية والبحرية التي تتميز بوفرة مختلف أشكال المواد النشطة بصرياً. وبذلك، تُعد النسب الطيفية أكثر حساسية للتغيرات الفيزيائية والكيميائية للمياه المصبية، مما يجعلها متغيرات مستقلة مناسبة لتطوير نماذج تقدير ORP اعتماداً على بيانات Sentinel-2.

5.3 اختبار النماذج الإحصائية التجريبية واختيار النموذج الأمثل

استناداً إلى المتغيرات الطيفية التي أظهرت أعلى درجات الارتباط مع قيم ORP، تم تطوير مجموع من النماذج الإحصائية التجريبية لتقدير قيم ORP بالاعتماد على بيانات Sentinel-2. شملت هذه النماذج صيغ الانحدار الخطي والأسي ونموذج القوة باستخدام متغير مستقل منفرد، إضافة إلى نموذج انحدار خطي متعدد المتغيرات باستخدام متغيرين مستقلين (الجدول 2).

الجدول 2: أداء النماذج الإحصائية التجريبية المختبرة

المتغير المستقل	نموذج الانحدار	النموذج المطوّر	R^2	RMSE (mV)	MAE (mV)
R/B	الخطي	$ORP = 75.794 - 83.354 \times \rho(R/B)$	0.53	7.0	6.3
	الأسي	$ORP = 1000 - 208.15 \times e^{-0.813 \times \rho(R/B)}$	0.54	6.3	5.8
	القوة	$ORP = 1000 - 92.35 \times \rho(R/B)^{-0.718}$	0.55	5.8	5.3
G/B	الخطي	$ORP = 126.198 - 113.944 \times \rho(G/B)$	0.53	5.1	4.3
	الأسي	$ORP = 1000 - 332.637 \times e^{-1.089 \times \rho(G/B)}$	0.52	5.0	4.0
	القوة	$ORP = 1000 - 111.621 \times \rho(G/B)^{-1.122}$	0.52	5.1	4.0
NIR/B	الخطي	$ORP = 69.044 - 81.618 \times \rho(NIR/B)$	0.36	12.8	9.9
	الأسي	$ORP = 1000 - 169.790 \times e^{-0.808 \times \rho(NIR/B)}$	0.38	10.6	8.9
	القوة	$ORP = 1000 - 87.310 \times (NIR/B)^{-0.714}$	0.39	9.5	8.3
G/B, NIR/B	متعدد المتغيرات	$ORP = 126.48 - 90.70 \times \rho(G/B) - -32.15 \times \rho(NIR/B)$	0.57	6.7	6.0

أظهرت نتائج تقييم أداء النماذج الإحصائية أن المؤشرات الطيفية المشتقة من صور Sentinel-2 تمتلك قدرة تفسيرية جيدة لتقدير ORP، مع وجود تباين واضح في مستوى الأداء تبعا لنوع المؤشر الطيفي والصيغة الإحصائية المعتمدة. فقد حققت النماذج الأحادية المعتمدة على نسبة R/B أفضل ضمن هذه الفئة، حيث تراوحت قيم معامل التحديد بين 0.53 و0.55، مع تسجيل أدق النتائج عند استخدام نموذج القوة، والذي ترافق مع قيم أخطاء (RMSE=5.8–7.0)mV و(MAE=5.3–6.3)mV على التوالي. تشير هذه النتائج إلى وجود علاقة غير خطية بين هذه النسبة الطيفية R/B وقيم ORP، ما يعكس حساسية جيدة لهذه النسبة عند استخدامها بمفردها كمؤشر طيفي للتغيرات المشتركة في المواد العالقة والمواد العضوية الذائبة التي تؤثر في الحالة الأكسدية الاختزالية للمياه المصبية.

في المقابل، أظهرت النماذج الأحادية المعتمدة على G/B أداء أكثر استقرار من حيث مؤشرات الأخطاء (RMSE=5.0–5.1)mV و(MAE=4.0–4.3)mV على التوالي، إلا أن

قدرتها التفسيرية بقيت محدودة، حيث لم تتجاوز قيم معامل التحديد نطاق 0.53–0.52. يشير ذلك إلى أن هذا المؤشر، على الرغم من استقراره الإحصائي، غير كاف بمفرده لتمثيل التعقيد البيوكيميائي الذي يتحكم في تباين قيم ORP. أما المؤشر NIR/B فقد أظهر أضعف أداء من حيث القدرة التفسيرية ودقة التقدير، ما يعكس محدودية قدرته على تمثيله للعمليات الكيميائية والبيولوجية المؤثرة على ORP.

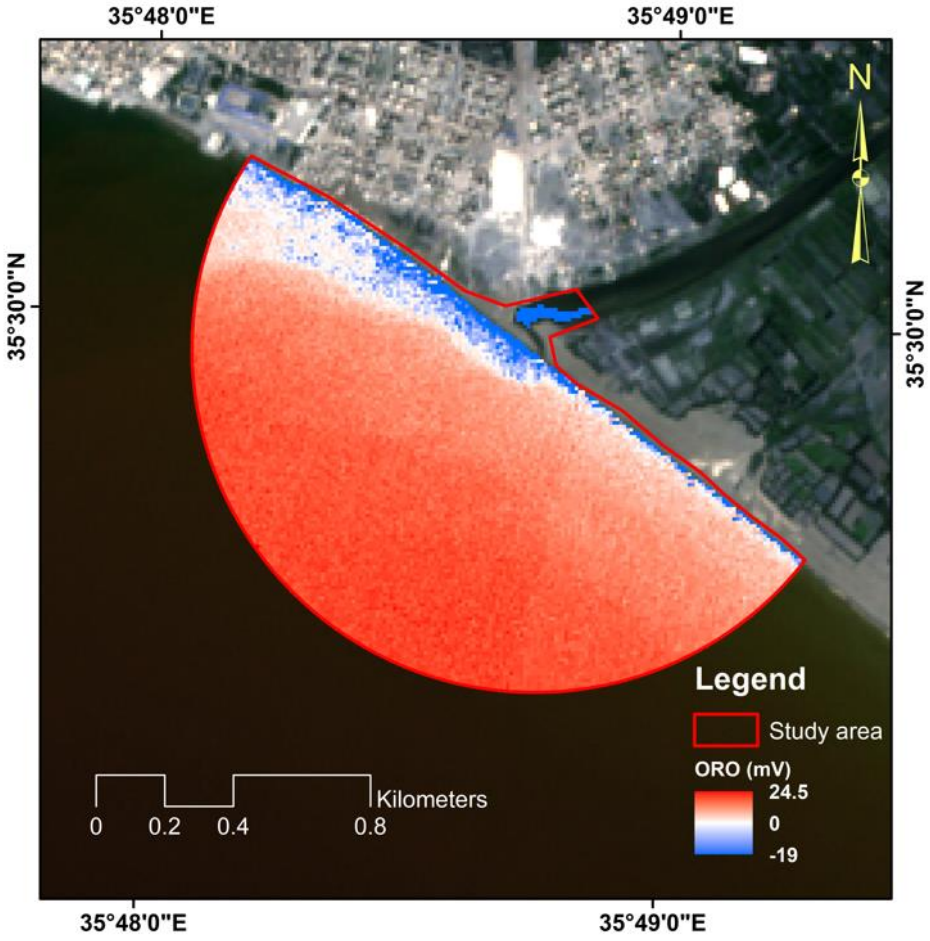
من بين جميع النماذج المختبرة، برز النموذج الخطي متعدد المتغيرات المعتمد على نسبتي G/B و NIR/B بوصفه النموذج الأمثل من حيث القدرة التفسيرية الكلية، إذ حقق أعلى قيمة لمعامل التحديد بلغت 0.57، مع قيم أخطاء مقبولة (RMSE=6.7mV و MAE=6.0mV). تشير هذه النتيجة إلى أن النموذج المطوّر قادر على تفسير نحو 57% من التباين الكلي في قيم ORP، وهو تحسن ملحوظ مقارنة بالنماذج الأحادية. ويُحتمل أن يعود هذا التحسن إلى أن دمج مؤشرات طيفية تعكس العمليات الحيوية، مثل الإنتاجية الأولية المرتبطة بالكلوروفيل، مع مؤشرات أخرى تمثل الخصائص الفيزيائية للمياه مثل العكارة والمواد العالقة، يتيح توصيفاً أكثر واقعية للتوازن بين العمليات المؤكسدة والمختزلة التي تتحكم في قيم ORP داخل المنطقة المصبية.

تتوافق هذه النتائج مع ما أشارت إليه دراسات سابقة أكدت أن ORP لا يرتبط بخاصية بصرية واحدة، بل يتأثر بتفاعل معقّد بين المادة العضوية الذائبة، والمواد العالقة، والنشاط الحيوي [9]. كما أظهرت دراسة [28] إمكانية تطوير نموذج إحصائي تجريبي لتقدير ORP في خزان كهرومائي باستخدام صور Sentinel–2 وبيانات 13 محطة قياس، حيث حقق النموذج معامل تحديد بلغ 0.65، وهي قيمة قريبة من النتائج المتحصل عليها في هذه الدراسة، مما يعزز موثوقية النهج المتبع ويؤكد قابلية تطبيقه في البيئات المائية الانتقالية.

5.4 تقييم التوزع المكاني لقيم ORP

تم تطبيق النموذج الإحصائي الأمثل، الذي تم اختياره بناء على مؤشرات الأداء الإحصائية، على صور Sentinel–2 لإنتاج خريطة التوزع المكاني لقيم ORP ضمن منطقة الدراسة (الشكل 3). يُظهر الفحص البصري للخريطة وجود تدرج مكاني واضح في قيم ORP داخل

المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي، حيث تراوحت القيم بين 19mV− و24.5mV. سُجّلت القيم السالبة والمنخفضة بشكل رئيسي في المياه النهرية القريبة من فم المصب، في حين ظهرت قيم قريبة من الصفر في المناطق الساحلية المجاورة تلاها ارتفاع تدريجي في قيم ORP باتجاه المياه البحرية المفتوحة.



الشكل 3: التوزع المكاني لقيم ORP في المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي

كما يُبيّن التوزع المكاني اتجاهاً عاماً لارتفاع قيم ORP نحو الشمال، وهو نمط يتوافق مع اتجاه التيارات البحرية السائدة على طول الساحل السوري للبحر الأبيض المتوسط، والتي تسهم في تعزيز عمليات الخلط والتهوية وزيادة التأثير البحري المؤكسد على الكتلة المائية المصبية [29], [30]. ويعكس هذا التدرج المكاني الانتقال التدريجي من بيئة نهرية ذات ظروف مختزلة نسبياً إلى بيئة بحرية أكثر أكسدة، وهو نمط شائع في الأنظمة المصبية ذات التصريف النهري المنخفض خلال موسم الجفاف.

بشكل عام، لوحظ ازدياد واضح قيم ORP مع الابتعاد عن المياه النهرية باتجاه المياه البحرية المفتوحة، وهو ما يتوافق مع السلوك المعروف لمؤشر ORP في المناطق المصبية، حيث ترتبط القيمة المنخفضة عند مصبات الأنهار بعمليات كيميائية وبيئية مهمة، إذ تسهم الظروف المختزِلة في تعزيز تحرّر الفوسفور المرتبط بالرواسب وانتقاله إلى الوسط المائي عند مناطق المصب، مما يزيد من توافره الحيوي [2].

تتوافق نتائج هذه الدراسة أيضا مع ما توصلت إليه دراسة [31] التي أظهرت وجود تدرّج واضح في انخفاض تراكيز الفوسفور بالانتقال من المياه النهرية إلى المياه البحرية عند مصب نهر الكبير الشمالي. كما يتوافق نمط التوزع المكاني لقيم ORP مع نتائج [32]، التي رصدت أعلى تراكيز للشوارد المغذية، بما في ذلك النترات والنتريت والأمونيوم والفوسفات والسيليكات، عند نقطة مصب نهر الكبير الشمالي، مع تناقصها التدريجي باتجاه المياه البحرية.

ويُعدّ هذا التدرج الكيميائي عاملاً مؤثراً في توزّع العوالق النباتية، التي تمثل القاعدة الأساسية للشبكة الغذائية المائية في المياه البحرية. كما أن سيادة الظروف المختزلة نسبياً، والمتمثلة بقيم ORP السالبة أو القريبة من الصفر عند مصب نهر الكبير الشمالي، قد تسهم في تعزيز عمليات الإثراء الغذائي (Eutrophication)، خاصة خلال فترة الجفاف، وهو ما يتوافق مع نتائج دراسة [33] التي تناولت ديناميكية المغذيات المؤثرة في نمو العوالق النباتية في منطقة المصبية نفسها. وتؤكد هذه النتائج أهمية استخدام خرائط ORP المشتقة من بيانات الاستشعار عن بعد كأداة داعمة لفهم العمليات البيوجيوكيميائية والتفاعلات البيئية في المناطق المصبية الساحلية.

6 الاستنتاجات والتوصيات

أظهرت نتائج هذه الدراسة إمكانية توظيف بيانات القمر الصناعي Sentinel-2، بالاشتراك مع النمذجة الإحصائية التجريبية، لتقدير التوزع المكاني لقيم ORP في البيئات المصبية الساحلية ذات الديناميكية العالية. أظهر تحليل الارتباط أن بعض النسب الطيفية المشتقة من نطاقات Sentinel-2، ولا سيما G/B و R/B، تمتلك قدرة تفسيرية جيدة لتغيرات ORP مقارنة بالقنوات الطيفية الفردية، إذ تراوحت قيم معامل التحديد بين 0.52 و0.55، مما يؤكد حساسية النسب الطيفية للتغيرات الفيزيائية والبيوجيوكيميائية للمياه المصبية. كما بيّنت نتائج النمذجة الإحصائية أن النموذج الخطي متعدد المتغيرات القائم على دمج النسب الطيفية G/B و NIR/B هو الأكثر كفاءة في تمثيل التباين المكاني لقيم ORP، حيث بلغت قيمة معامل التحديد 0.57، متفوقا على النماذج الأحادية من حيث القدرة التفسيرية.

كما أظهر تقييم التوزع المكاني لقيم ORP وجود تدرج واضح ضمن المنطقة المصبية لنهر الكبير الشمالي، يعكس الانتقال التدريجي من ظروف مختزلة في المياه النهرية إلى ظروف أكثر أكسدة باتجاه المياه البحرية المفتوحة خلال موسم الجفاف. وتوصي الدراسة بتوظيف هذا النهج المتكامل بين تقنيات الاستشعار عن بعد والإحصاء البيئي في برامج المراقبة البيئية الساحلية طويلة الأمد، ولا سيما في المناطق التي تعاني من محدودية القياسات الميدانية المنتظمة. كما يُوصى بتوسيع نطاق الدراسات المستقبلية لتشمل مواسم هيدرولوجية مختلفة ومناطق مصبية أخرى، ودمج بارامترات إضافية لجودة المياه، وزيادة عدد محطات القياس، واختبار نماذج انحدار متقدمة قائمة على تقنيات التعلم الآلي، بما يعزز دقة تقدير ORP ويسهم في فهم أعمق للعمليات البيوجيوكيميائية في مصبات الأنهار الساحلية.

المراجع

[1] S. D. V Giakoumatos, N. T. Skoulikidis, S. Karavoltsos, A. Sakellari, and E. Dimitriou, "Spatiotemporal Variations in Water Physicochemical Status in Pinios River Catchment, at Eastern

Mediterranean Region," *Land*, vol. 13, no. 11, p. 1959, Nov. 2024, doi: 10.3390/land13111959.

[2] Z. Li, Y. Sheng, J. Yang, and E. D. Burton, "Phosphorus Release from Coastal Sediments: Impacts of the Oxidation-Reduction Potential and Sulfide," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 113, no. 1–2, pp. 176–181, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.007.

[3] A. Karbassi and A. Marefat, "The Impact of Increased Oxygen Conditions on Heavy Metal Flocculation in the Sefidrud Estuary," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 121, no. 1–2, pp. 168–175, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.06.011.

[4] A. Marefat, S. Asgari, R. Badpa, M. Jahanirad, M. Sagheb Molaei, and A. Karbassi, "Geospatial Investigation on Self-Purification Capacity of River Estuaries in the Caspian Region: Reducing Heavy Metals Pollution," *npj Clean Water*, vol. 7, no. 1, p. 32, Apr. 2024, doi: 10.1038/s41545-024-00327-4.

[5] W.-C. Lin, K. Brondum, C. Monroe, and M. Burns, "Multifunctional Water Sensors for pH, ORP, and Conductivity Using Only Microfabricated Platinum Electrodes," *Sensors*, vol. 17, no. 7, p. 1655, Jul. 2017, doi: 10.3390/s17071655.

[6] J. Lee *et al.*, "Fabrication of Microelectrode Arrays for In Situ Sensing of Oxidation Reduction Potentials," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 115, no. 1, pp. 220–226, May 2006, doi: 10.1016/j.snb.2005.09.003.

[7] S. Ngamile, S. Madonsela, and M. Kganyago, "Trends in Remote Sensing of Water Quality Parameters in Inland Water Bodies: A Systematic Review," *Front. Environ. Sci.*, vol. 13, pp. 1–22, Mar. 2025, doi: 10.3389/fenvs.2025.1549301.

[8] M. He, Q. Qian, X. Liu, J. Zhang, and J. Curry, "Recent Progress on Surface Water Quality Models Utilizing Machine Learning Techniques," *Water*, vol. 16, no. 24, p. 3616, Dec. 2024, doi: 10.3390/w16243616.

[9] Z. Wu *et al.*, "A Review of Remote Sensing-Based Water Quality Monitoring in Turbid Coastal Waters," *Intell. Mar. Technol. Syst.*, vol. 3, no. 1, p. 24, Aug. 2025, doi: 10.1007/s44295-025-00075-2.

[10] F. Chaaban, "Evaluation of Object-Based Classification Performance for Built-Up Areas in Sentinel-2B Satellite Imagery Compared to Pixel-Based Classification," *Al-Baath Univ. J.*, vol. 47, no. 7 (Published in Arabic), pp. 41–64, 2025.

[11] H. Darwishe, A. Mohammad, and F. Chaaban, "Developing a Model of Deep Learning by ANNs for Urban Areas Extraction from Remote Sensing Images- Study Area: Homs-Tartous," *Al-Baath Univ. J.*, vol. 43, no. 7 (Published in Arabic), pp. 11–42, 2021.

[12] A. Khatib and A. P. Sizov, "Mapping the Spatial Distribution and Potential Expansion of Agricultural Plastic Greenhouses in Tartus, Syria Using GIS and Remote Sensing Techniques," *Geocarto Int.*, vol. 38, no. 1, pp. 1–24, Dec. 2023, doi: 10.1080/10106049.2022.2134465.

[13] H. Chen, X. Gao, and R. Yuan, "Trends in Remote Sensing of Water Quality Parameters in Inland Water Bodies: A Systematic Review," *Water*, vol. 17, no. 20, p. 3000, Oct. 2025, doi: 10.3390/w17203000.

[14] M. R. Nikoo, M. G. Zamani, M. M. Zadeh, G. Al-Rawas, M. Al-Wardy, and A. H. Gandomi, "Mapping Reservoir Water Quality from Sentinel-2 Satellite Data Based on a New Approach of Weighted Averaging: Application of Bayesian Maximum Entropy," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 16438, Jul. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-66699-2.

[15] A. Khatib and F. Chaaban, "Spatio-temporal Monitoring of Sea Surface Temperature in the Syrian Territorial Waters (Eastern Mediterranean) using Landsat Time Series and Google Earth Engine Platform," *Adv. Sp. Res.*, vol. 76, no. 11, pp. 6741–6760, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.asr.2025.09.034.

[16] A. Khatib, B. Al-Araj, and Z. Salhab, "Long-Term Monitoring of Thermal Pollution from Baniyas Power Plant in the Syrian Coastal Water using Landsat Data," *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.*, vol. 36, p. 101287, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.rsase.2024.101287.

[17] A. Ibrahim, H. Saleh, S. Ghadeer, M. Hussein, E. Arabic, and M. Joony, *A Geobio-Morphological Survey of Specific Areas of the Syrian Continental Shelf and Determining the Nature of the Bottom*. Higher Commission for Scientific Research (Syria), 2015.

[18] G. Ammar, A. Alasaad, A. Abdalrahman, and S. Hayek, "Impact of Climate Changes on the Discharges Of AL-KABEER AL-SHEMALE River," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 35, no. 3 (Published in Arabic), pp. 9–22, 2013.

[19] ESA, "SENTINEL-2 User Handbook (Technical Guide)," European Space Agency, 2015. [Online]. Available: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-

2_User_Handbook.

[20] B. Gao, "NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space," *Remote Sens. Environ.*, vol. 58, no. 3, pp. 257–266, Dec. 1996, doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

[21] J. W. Tukey, *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, 1977.

[22] S. S. Shapiro and M. B. Wilk., "An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)," *Biometrika*, vol. 52, no. 3, pp. 591–611, 1965.

[23] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*, 5th ed. John Wiley & Sons, 2012.

[24] J. Ferre, "Regression Diagnostics," in *Comprehensive Chemometrics*, 2009, pp. 33–89.

[25] L. Santos, A. Pinto, O. Filipe, Â. Cunha, E. B. H. Santos, and A. Almeida, "Insights on the Optical Properties of Estuarine DOM – Hydrological and Biological Influences," *PLoS One*, vol. 11, no. 5, p. e0154519, May 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0154519.

[26] A. Bricaud, A. Morel, and L. Prieur, "Absorption by Dissolved Organic Matter of the Sea (Yellow Substance) in the UV and Visible Domains," *Limnol. Oceanogr.*, vol. 26, no. 1, pp. 43–53, Jan. 1981, doi: 10.4319/lo.1981.26.1.0043.

[27] C. Song, C. E. Woodcock, K. C. Seto, M. P. Lenney, and S. A. Macomber, "Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects?," *Remote Sens. Environ.*, vol. 75, no. 2, pp. 230–244, Feb. 2001, doi: 10.1016/S0034-4257(00)00169-3.

[28] F. M. C. Pizani, P. Maillard, A. F. F. Ferreira, and C. C. de Amorim, "Estimation of Water Quality in a Reservoir from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI Sensors," *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. V-3–2020, pp. 401–408, Aug. 2020, doi: 10.5194/isprs-annals-V-3-2020-401-2020.

[29] M. Menna *et al.*, "On the Circulation and Thermohaline Properties of the Eastern Mediterranean Sea," *Front. Mar. Sci.*, vol. 8, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3389/fmars.2021.671469.

[30] G. Baaklini *et al.*, "Surface Circulation Properties in the Eastern Mediterranean Emphasized Using Machine Learning Methods," *Ocean Sci.*, vol. 18, no. 5, pp. 1491–1505, Oct. 2022, doi: 10.5194/os-18-1491-

2022.

[31] H. E. Laika, H. Krawi, and R. Al-Hayek, "Determining Organic and Inorganic Phosphorus Concentration in Sediment Columns, in Al-Kabir Al-Shimali and Al-Hussain Estuaries," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Basic Sci. Ser.*, vol. 37, no. 4 (Published in Arabic), pp. 115–130, 2015.

[32] H. Krawi, F. Darwich, H. E. Laika, and S. Joulak, "Dissolved Nutrients Behavior Along The Salinity Gradient At The AL-Kabir Alshemali River Mouth (Mediterranean - Syria)," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Basic Sci. Ser.*, vol. 40, no. 5 (Published in Arabic), pp. 85–103, 2018.

[33] F. Darwich and L. Sabbagh, "A Study of Biodiversity Spatial and Nutrient Changes of Phytoplankton in Al-Kabir Al-Shamali River Lattakia – Syria)," *Latakia Univ. J. Res. Sci. Stud. - Biol. Sci. Ser.*, vol. 47, no. 3 (Published in Arabic), pp. 103–119, 2025.

دور التوائم الرقمية في تعزيز استدامة الأبنية التاريخية

الدكتورة: علا خيطو *

ملخص البحث

تتبوأ تقنية التوائم الرقمية (Digital Twins) مكانة محورية متسارعة الأهمية في قطاع الهندسة المعمارية، والمدنية، والإنشاءات، وإدارة المرافق .إذ تعمل كنسخ افتراضية ديناميكية تحاكي الأصول والأنظمة المادية في بيئة لحظية مدعومة بالبيانات الاستشعارية. وينسجم هذا التطور التكنولوجي مع التوجهات العالمية نحو إرساء قواعد المدن الذكية الشاملة وتحقيق أهداف التنمية المستدامة. حيث تتسع تطبيقات هذه التقنية لتشمل ترشيد استهلاك الطاقة، وإدارة الحركة المرورية، وتحسين كفاءة تشغيل المباني وصيانتها، مع التركيز على المنشآت التاريخية لما تحمله من قيمة مضافة.

تُعرّف المباني التاريخية بأنَّها ثروة عمرانية وحضارية تعكس تطوراً إنسانياً بارزاً أو ترتبط بأحداث مفصلية في الماضي. وتتفرد هذه المنشآت غالباً بخصائص بيئية ومناخية محلية مميزة، نظراً لاعتماد تصميمها الأصلي على آليات طبيعية كفؤة للتدفئة، والإضاءة، والتهوية، فضلاً عن كونها تتميز بمواقع جغرافية استراتيجية.

تكمن الأهمية الجوهرية للتقنيات الرقمية في قدرتها على ترشيد استهلاك الطاقة والموارد، وابتكار نظم مستدامة، ومراقبة أهداف التنمية المستدامة بفاعلية، لا سيما في قطاع البناء عبر توفير أدوات متقدمة لنمذجة المنشآت ودعم اتخاذ القرار. وفي هذا الإطار، استقصى البحث إمكانات التحوُّل الرقمي في تعزيز الاستدامة الحضرية، مع التركيز على الأبنية التاريخية؛ إذ تشير الدراسة إلى وجود فجوات معرفية في فهم الإسهامات بعيدة المدى لهذه التقنيات في رفع كفاءة إدارة موارد تلك الأبنية وتعزيز قدرتها على الصمود أمام التحديات البيئية. وقد خلص البحث إلى أنَّ الاستدامة هي التطبيق الراهن والأبرز لتقنية لتوائم الرقمية (Digital Twins) في قطاع التشييد، وتتركز جلّ الممارسات المستدامة في المباني التاريخية والتي يمكن تعزيزها من خلال هذه التقنية على تقليص استهلاك الطاقة، وصون طاقتها الكامنة، وتبني نهج دورة الحياة الشامل.

الكلمات المفتاحية: التوأمة الرقمية، الاستدامة، الظلّ الرقمي، نمذجة معلومات البناء التاريخي **HBIM**، الأبنية التاريخية، مدينة دمشق.

* مدرس –كلية الهندسة المعمارية– قسم التصميم المعماري، جامعة دمشق،
ola.khito@damascusuniversity.edu.sy

The role of digital twins in promoting the sustainability of historic buildings

Dr. Ola Khito *

Abstract

Digital twin technology is rapidly becoming a pivotal force in the architecture, civil engineering, construction, and facilities management sectors. It functions as dynamic virtual replicas that simulate physical assets and systems in a real-time environment, supported by sensor data. This technological advancement aligns with global trends toward establishing comprehensive smart cities and achieving sustainable development goals. Applications of this technology extend to energy conservation, traffic management, and improving the operational and maintenance efficiency of buildings, with a particular focus on historical structures due to their added value.

Historical buildings are defined as architectural and cultural treasures that reflect significant human development or are associated with pivotal events in the past. These structures often possess unique local environmental and climatic characteristics, given that their original design relied on efficient natural mechanisms for heating, lighting, and ventilation, in addition to their strategic geographical locations.

The fundamental importance of digital technologies lies in their ability to optimize energy and resource consumption, create sustainable systems, and effectively monitor sustainable development goals, particularly in the construction sector, by providing advanced tools for building modeling and decision support. Within this framework, the research explored the potential of digital transformation in enhancing urban sustainability, with a focus on historic buildings. The study indicates knowledge gaps in understanding the long-term contributions of these technologies to improving resource management efficiency in these buildings and enhancing their resilience to environmental challenges. The research concluded that sustainability is the current and most prominent application of digital twins in the construction sector, and most sustainable practices in historic buildings that can be enhanced through this technology focus

on reducing energy consumption, preserving their latent energy, and adopting a comprehensive lifecycle approach.

Keywords: Digital twins – sustainability – digital shadow –Historic Building Information Modeling (**HBIM**), historic buildings, Damascus city
*Doctor, Faculty of Architecture, Department of Architectural Design, Damascus University, ola.khito@damascusuniversity.edu.sy

- **مقدمة:**

تُعدّ المباني التاريخية ركناً أساسياً من أركان التراث الثقافي لكل أمة، إذ تُجسّد الذاكرة الجماعية من خلال الأشكال والقصص المعمارية، ويُعدّ الحفاظ على هذه المعالم واستعادتها أمراً ضرورياً للحفاظ على هذه الذاكرة. تمثل عمليات التوثيق والنمذجة الرقمية للتراث المعماري حدوداً تلتقي فيها التكنولوجيا والثقافة لضمان معرفة الماضي والحفاظ عليه. بالنسبة للمباني التاريخية، يتطلب جمع الأرشيفات والمعلومات التاريخية، واحترام التفاصيل المعمارية الأصيلة، نهجاً مُصمماً خصيصاً لتطوير نمذجة حاسوبية، قادرة على تقديم صورة واضحة عن الأهمية التاريخية، ومراعاة الجوانب الأثرية.

يُجسّد إدخال التقنيات الرقمية، مثل نمذجة معلومات البناء H–BIMونماذج البيانات الرقمية DTs، تقدماً متطوراً، إذ يُقدّم منهجيات مُحسّنة لاستعادة التراث الثقافي وصيانته، ويُمثّل أفقاً جديداً للعمليات التي تتم على البناء التاريخي وخاصةً العمليات التي تعزِّز خصائص الاستدامة المتأصلة فيه باستخدام التوائم الرقمية التي يتوسع دورها ليصل إلى التوثيق المستقبلي وإدارة عمليات الصيانة والتشغيل.

- **<u>إشكالية البحث</u>:** ندرة الالتزام بإطار عمل شامل للاستدامة قائم على التوائم الرقمية للمباني التاريخية ذات القيمة في مدينة دمشق في ظلّ الاهتمام العالمي بهذه الأداة ودورها في إدارة وتشغيل وصيانة هذا النوع من الأبنية.
- **<u>أهمية البحث</u>** تلزم أهمية الأبنية التاريخية بيئياً وجود أدوات تعزز استدامتها المتأصلة وتطيل عمرها الافتراضـــي لذلك تكمن أهمية هذا البحث في نهجه، الذي يُحدد الاتجاهات الناشـــئة، ويُقدم رؤى عملية لتوجيه تبني التوائم الرقمية ودورها المحوري في تعزيز مبادئ الاستدامة في البناء التاريخي.
- **هدف البحث:** يهدف البحث إلى إظهار قدرة التوأمة الرقمية في تعزيز اســـتدامة البناء التاريخي واستنباط مبادئ الاستدامة التي يتم تثقيلها أثناء استخدام هذه التقنية وتزيد من تقييم البناء التاريخي بيئياً.
- **<u>منهجية البحث</u>**، أتت المنهجية على الشكل التالي:

يعتمد البحث على منهجين للوصـــول إلى هدف البحث: **منهج نظري اســـتقرائي** ويتم من خلاله رصـــد مفهوم التوائم الرقمية ومجالات اســـتخدامها ومنها القطاع المعماري وامكانياتها في تعزيز اســـتدامة البناء التاريخي. **ثم منهج تحليلي:** يتم فيه اختبار قدرة هذه الإمكانيات على حالتين دراســـيتين عالميتين ولحظ أهمية تطبيق ذلك على حالة محلية لبناء العابد في

دمشق نظراً لاستدامة تصميمه.

1- التقنية الرقمية:

تُعرَّف بأنَّها محاكاة احتمالية متعددَّة المستويات ومتكاملة فيزيائياً لنظام ما، تستخدم أحدث النماذج الفيزيائية وأجهزة الاستشعار للحصول على بيانات آنية وسجل تاريخي لمحاكاة دورة حياة نظيرها. (Karatzas, S., Lazari, V., Fouseki, K., Natalia Pracchi, V. & Balaskas, E. (2024),p155)يُحدث مفهوم التوأم الرقمي ثورة في البيئة المبنية من خلال دمج البيانات في الوقت الفعلي، على عكس النماذج الرقمية الثابتة يمثل النموذج الرقمي A digital model أصلًا دون تبادل بيانات آلي بين البيئتين المادية والافتراضية، يشير الظل الرقمي a digital shadow إلى نموذج رقمي ذي تدفق بيانات أحادي الاتجاه من البيئة المادية إلى البيئة الافتراضية، بينما يتضمن التحكم الرقمي digital control تدفقًا أحادي الاتجاه من البيئة الافتراضية إلى البيئة المادية **يتميز التوأم الرقمي Digital Twin بتدفق بياناته ثنائي الاتجاه، مما يتيح تبادلًا شاملًا بين البيئتين المادية والافتراضية.** Hosamo, H. (2023), p16,

2- التوائم الرقمية:

2-1- تعريفها:

هي تمثيلات افتراضية للأصول أو العمليات المادية، ويمكن تحديثها بشكل دوري، مما يوفر بيئة واقعية قوية لدعم عملية اتخاذ القرارات في مختلف مراحل دورة حياة المنتج المادي Pr´edhumeau, M, p1 ، ويمكن لدمج البيانات الحقيقية وتحليلات النموذج الافتراضي أن يمنع حدوث المشكلات قبل وقوعها، ويقلل من التكاليف، ويضع خططًا للأنشطة المستقبلية من خلال المحاكاة Karatzas, S., Lazari, V., Fouseki, K., Natalia Pracchi, V. & Balaskas, E. (2024), p155, p156

في البداية، استُخدم هذا المصطلح في الهندسة والمنتجات المصنعة، ولكنه يشير الآن بشكل عام إلى أي نموذج لأي نظام مزود بتصور ثلاثي الأبعاد وبيانات آنية Batziou, E. & others, (2025),p.96

2-2- مكوناتها:

يتكون مفهوم التوأم الرقمي من ثلاثة أجزاء رئيسية: كيان مادي في الفضاء الحقيقي، وهو "التوأم المادي (PT) وكيان افتراضي في الفضاء الافتراضي، وهو "التوأم الرقمي (DT) "وتدفق ثنائي

الاتجاه للمعلومات والبيانات بين الفضاء المادي والفضاء الافتراضي. Standardization Council Industrie 4.0), (2024),p10

2-3- تاريخ نشوء المصطلح وتطوره:

نشأ مفهوم التوائم الرقمية في صناعة الطيران والفضاء، حيث استخدم برنامج أبولو التابع لوكالة ناسا مركبة فضائية "توأم" على الأرض لمحاكاة الظروف التي يواجهها رواد الفضاء وتشخيص أعطالها ثم تطورت التوائم الرقمية إلى نماذج افتراضية معقدة قادرة على محاكاة الظروف الآنية في قطاعات متنوعة، بما في ذلك التصنيع والرعاية الصحية، مما يدعم التحليل التنبؤي والصيانة وجهود التحسين. وقد مكّنت التطورات الحديثة، ولا سيما دمج إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي، التوائم الرقمية من تمثيل البيئات المادية، وتوسيع تطبيقاتها من النسخ الثابتة إلى الأنظمة التكيفية في الوقت الحقيقي، مما يعزز الدقة واتخاذ القرارات في مختلف المجالات. Akyol, G.& Berkay Avci, A. (2025),p81,p82

2-4- التوائم الرقمية للأبنية:

يتكون التوأم الرقمي للمبنى من ثلاثة أجزاء أساسية :**نموذج للمبنى، ومجموعة بيانات متطورة تتعلق به، وطريقة لتحديث النموذج ديناميكياً بالبيانات** .يمكن تصنيف النماذج المستخدمة في الدراسات السابقة إلى ثلاث فئات: النماذج الهندسية ثلاثية الأبعاد، ونماذج المعلومات، والنماذج البارامترية .يعيد النموذج الهندسي ثلاثي الأبعاد بناء بنية المبنى باستخدام تقنيات مثل الرسومات الحاسوبية ثلاثية الأبعاد، والتصوير المساحي، والمسح الليزري .ينشئ نموذج المعلومات قاعدة بيانات تحتوي على خصائص مكونات المبنى، مثل المواد، والوصلات، والهندسة ثلاثية الأبعاد . يركز النموذج البارامتري على تحديد ووصف الخصائص والسلوكيات الرئيسية للمبنى. بينما توثق النماذج الهندسية والمعلوماتية ثلاثية الأبعاد في المقام الأول الجوانب الثابتة للمباني، **وتُعد مفيدة في إدارة وترميم المباني التاريخية، تستفيد النماذج البارامترية من تحديثات البيانات المستمرة لتحليل البيانات والصيانة الوقائية** (NI, Z. & others, (2025),p3373, Yang, p.& others, (2020)البيانات المتعلقة بالمباني التاريخية غير متجانسة ومتعددة التخصصات، مما يستلزم خبرة في مجالات متنوعة مثل تكنولوجيا المعلومات والتاريخ والهندسة المعمارية. لذلك، من الضروري وصف هذه البيانات بشكل متسق لضمان قابلية التشغيل البيني بين الأدوات والتطبيقات. Wright, L. & Davidson, S., (2020),p12

في سياق الحفاظ على المباني التاريخية، يمكن إنشاء توأماً رقمياً من خلال دمج بيانات مثل الهندسة، والملاحظة البصرية، وعملية البناء، وخصائص المواد. بعدها تتم معايرة النموذج باستخدام قياسات ديناميكية لتقييم السلامة الهيكلية ودعم الصيانة الوقائية للبناء التاريخي. يمكن هذا النموذج تحسين الرطوبة النسبية في المواقع التراثية وتصور البيانات البيئية، والتحكم في المراوح، وتمثيل BIM وغيرها. NI, Z. & others, (2025),p3374 مع انخفاض تكلفة التوائم الرقمية، يسعى مالكو المباني و(البلديات والوزارات) إلى تبنيها لتمثيل مبانيهم من خلال الوصول إلى البيانات في الوقت الفعلي، ومحاكاة النتائج والحلول، وتنفيذ العديد من المهام التشغيلية بكفاءة وإثراء ودعم المبادرات المتعلقة بالحفظ والصيانة والترميم. Karatzas, S., Lazari, V., Fouseki, K., Natalia Pracchi, V. & Balaskas, E. (2024),p157 ويُضاف إلى ذلك تعدد وظائف هذه التقنيات في الحفاظ على الموروث الثقافي بشكل عام من خلال الرقمنة وتحليل الصور وإدارة البيانات ونمذجة العمليات والمحاكاة وصياغة الفرضيات. سليمان (2026) ص23/21.

2-5- تصنيف التوائم الرقمية:

يمكن تصنيف التوائم الرقمية بناءً على مدى تعقيدها وحجم المعلومات التي تتعامل معها إلى خمس تصنيفات، يساعد ذلك في فهم إمكانيات وقيود تطبيقات التوائم الرقمية المختلفة في قطاع البناء:

-**التوأم الرقمي الوصفي Descriptive** ويوفر تمثيلاً ثابتاً للمبنى، حيث يلتقط معلومات تفصيلية عن التصميم والهيكل .يُستخدم هذا النوع من التوائم الرقمية بشكل أساسي لأغراض التوثيق والتصور ويتضمن نماذج ثلاثية الأبعاد مفصلة تم إنشاؤها باستخدام نمذجة معلومات المباني (BIM)أو أية تطبيقات أخرى .لا تتضمن التوائم الرقمية الوصفية بيانات في الوقت الفعلي أو تغييرات ديناميكية، مما يحد من استخدامها في التحليل الثابت والتحقق من التصميم.

-**التوأم الرقمي المعلوماتيInformative** يدمج التوأم الرقمي المعلوماتي البيانات الآنية لتوفير رؤى حول حالة المبنى وأدائه. يتجاوز هذا النوع من التوائم الرقمية التمثيلات الثابتة من خلال دمج بيانات المستشعرات التي تعكس الظروف الآنية داخل المبنى. مثل توفير بيانات حول درجة الحرارة والرطوبة والإشغال واستهلاك الطاقة وتحسين أنظمة التدفئة والتهوية والتكييف، وضمان بيئة مريحة لشاغلي المبنى. Lemian, D. & Bode, F. (2025),p.6,7,8

-**التوأم الرقمي التنبؤي: Predictive** يستخدم التوأم الرقمي التنبؤي البيانات التاريخية والمحاكاة للتنبؤ بالأداء المستقبلي من خلال تحليل بيانات الأداء السابقة وتشغيل سيناريوهات محاكاة متنوعة، والتنبؤ بالمشاكل المحتملة وتحسين عمليات المبنى استباقياً Lemian, D. & Bode, F. (2025),p.6,7,8

-**التوأم الرقمي الشامل: Comprehensive**يجمع التوأم الرقمي الشامل بين مصادر بيانات متنوعة وتحليلات متقدمة لتقديم رؤية شاملة لدورة حياة المبنى، بما في ذلك الأثر البيئي والكفاءة التشغيلية .يوفر رؤية تفصيلية ومترابطة لأداء المبنى حول كفاءة الطاقة، ومؤشرات الاستدامة.

-**التوأم الرقمي المستقل: Autonomous**يستخدم التوأم الرقمي المستقل الذكاء الاصطناعي وخوارزميات التعلم الآلي لإدارة عمليات المباني وتحسينها ذاتياً .يتميز هذا النوع المتقدم بقدرته على اتخاذ القرارات وإجراء التعديلات دون تدخل بشري، ويضبط إعدادات التدفئة والتهوية وتكييف الهواء لتحسين استهلاك الطاقة والحفاظ على الراحة. Lemian, D. & Bode, F. (2025),p.6,7,8

2-6- تطبيقات التوائم الرقمية في الأبنية:

أدت التطورات الحديثة في تقنية التوأم الرقمي إلى تطبيقها في العديد من المجالات ضمن قطاع البناء، وتعزيز إمكانيات التوأم الرقمي لتحسين جوانب مختلفة من إدارة وتشغيل المباني، مما يعزز الكفاءة والاستدامة.

1. **إدارة الطاقة** تُستخدم النماذج الرقمية بشكل متزايد لتحسين استهلاك الطاقة في المباني، فمن خلال محاكاة سيناريوهات مختلفة، تُمكّن هذه النماذج من تطبيق استراتيجيات الطاقة الأكثر كفاءة وضبط أنظمة التكييف والتهوية، والإضاءة، للحفاظ على مستويات الراحة .
2. **الصيانة التنبؤية:** تُعدّ الصيانة التنبؤية أو الاستشرافية تطبيقاً بالغ الأهمية لتقنية التصميم الرقمي في قطاع البناء، إذ تستطيع هذه التقنية التنبؤ بأعطال المعدات المحتملة مما يقلل من وقت التوقف عن العمل والتكاليف التشغيلية.
3. **الاستدامة:** تُسهم تقنيات التصميم الرقمي إسهاماً كبيراً في جهود الاستدامة في قطاع البناء من خلال نمذجة الأثر البيئي للمواد وممارسات البناء، بدءاً من مرحلة تصميم المبنى وحتى مرحلة هدمه وإعادة تأهيله، ويمكن لهذه التقنيات محاكاة دورة حياة مواد البناء، من استخراجها وتصنيعها إلى استخدامها والتخلص منها، مما يوفر رؤى ثاقبة حول بصمتها البيئية، من خلال تقييم انبعاثات الكربون المرتبطة بمواد وتقنيات البناء المختلفة، مما يساعد المعماريين والبنائين

في خيارات أكثر استدامة، ويمكن لتقنيات التصميم الرقمي محاكاة الأثر البيئي طويل الأجل لخيارات التصميم المختلفة، مثل أنواع العزل، ومواقع النوافذ، الطاقة المتجددة، وتساعد هذه المعلومات في تصميم مبانٍ تتسم بكفاءة الطاقة ومراعاتها للبيئة.

4. **السلامة والصحة:** يُعدّ ضمان سلامة وصحة شاغلي المباني أولوية قصوى، وتلعب أنظمة التحليل الرقمي دوراً محورياً في مراقبة السلامة الإنشائية للمباني والامتثال لمعايير السلامة. Lemian, D. & Bode, F. (2025),p.9,10

3- الأبنية التاريخية:

تشكّل المباني التاريخية جزءاً من المباني القائمة، وتتميز بحسب تعريفها، بثلاث سمات: القدم، والأصالة، والأهمية. L. Webb, A. (2017), p.1 وتشير إلى المباني والمنشآت القيّمة، والتي شهدت تطوراً حضارياً أو أحداثًا تاريخية معينة. تتميز المباني التاريخية بمناخ محلي خاص نظراً لارتفاع قدرتها على الاحتفاظ بالحرارة، مما قد يستدعي استخدام أنظمة ميكانيكية للتحكم في البيئة. W.H. Fung, I., Tsang, Y., W.Y. Tam, V., Xu,Y. & C.K. Mok, E. (2017),p.1,2

تُعدّ المباني التاريخية ثروة ثقافية بسبب خصائصها المادية، ودورها في تشكيل الذاكرة الجماعية والاستمرارية المكانية لذا ينبغي صيانتها كاستراتيجية لضمان استدامة التراث الثقافي. يتطلب ذلك الحفاظ على المباني التاريخية جمعاً دقيقاً لكميات هائلة من البيانات، معالجتها وتحليلها، وتوثيقها ونهج متعددة التخصصات، وخبراء في مجالات عديدة منها الهندسة المعمارية والمدنية وعلوم المواد والتكنولوجيا المتقدمة كأساس لاستراتيجية صيانة فعّالة. KAKDAŞ ATEŞ, D. & AKALP, (S.), (2025),p212

3-1- الاستدامة في الأبنية التاريخية:

تتمتع هذه المباني بمزايا الطاقة الكامنة، بُنيت بحرفية عالية ومواد تدعم عمراً مادياً طويلاً، كما أنَّها ما صُممت بشكل جيد من حيث التدفئة والإضاءة والتهوية الطبيعية، وغالباً ما تقع في مواقع مميزة. تم بنائها على مبدأ الإدارة الرشيدة لإطالة العمر الافتراضي، بما في ذلك إعادة تدويرها لاستخدامات بديلة M. Okba, E. &E. Embaby, M. (2013),1686 تظهر الاستدامة في سياق المباني التاريخية في:

- **الحفظ:** أي حماية المبنى التاريخية والمعمارية، ويسعى الحفاظ المستدام إلى تقليل استخدام المواد والطاقة مع ضمان الاستقرار الهيكلي .
- **كفاءة الطاقة:** يمكن لتحديث المباني التاريخية بأنظمة حديثة موفرة للطاقة أن يقلل من انبعاثاتها الكربونية، وتحديث أنظمة التدفئة والتبريد والإضاءة.
- **اختيار المواد:** يتضمن الحفاظ المستدام استخدام مواد صديقة للبيئة ومحلية، ويمكن دمج المواد المستصلحة والمعاد تدويرها مع جهود الترميم.
- **التكيُّف وإعادة الاستخدام:** يمكن لإعادة توظيف المباني التاريخية لأغراض حديثة أن تطيل عمرها وتقلل الحاجة إلى إنشاءات جديدة .
- **اعتبارات الموقع والمناظر الطبيعية:** يشمل زراعة النباتات المحلية، وترشيد استهلاك المياه ecclesiastical.ca, (2023),p.2

3-2- الاستدامة ودرجة التدخل في الأبنية التاريخية:

يخضع المبنى التاريخي لضوابط تهدف إلى حمايته من التطوير غير المناسب، وتسهيل صيانته، الذي يُعرّفه المجلس الدولي للمعالم والمواقع (ICOMOS) بأنَّه "عمليات العناية بمكان ما لحماية قيمته التاريخية يوضح الشكل 1 ارتباط أنواع التدخلات على الأبنية التاريخية بمفهوم الاستدامة حيث يكون بالنسبة الأعلى في مستوى الحفاظ والنسبة الأقل في مستوى إعادة البناء. M. Okba, E. &E. Embaby, M. (2013),p.1684, 1685



الشكل (1): العلاقة بين الاستدامة ودرجات التدخل على البناء التاريخي M. Okba, E. &E. Embaby, M. (2013),p.1684, 1685 (تعديل الباحثة)

3-3- تدابير تعزيز الاستدامة في الأبنية التاريخية:

فيما يلي تدابير الاستدامة التي ينبغي مراعاتها لوضع استراتيجيات تصميم مناسبة لتحسين كفاءة الطاقة وتكامل الاستدامة في المباني التاريخية.

- ترشيد الطاقة الكامنة**EEC**[1] [2]، يُعرف مخزون المباني القائمة عالمياً بأنَّه مصدر هام لاستهلاك الطاقة، يسهم الحفاظ على المباني التراثية القائمة في ترشيد الطاقة الكامنة، ويُحقق وفورات كبيرة في استهلاك الطاقة، مثل مواد البناء التقليدية، الخشب والطوب.
- تحسين أداء المباني التاريخية[3]OHBP يُسهم تحسين أداء هذه المباني في تحقيق كفاءة الطاقة وأهداف الاستدامة، كما أنَّ صيانة وترميم المباني التاريخية يُساعد في ضمان استمرار المكان وتعزيز استدامته.
- خفض استهلاك الطاقة في المباني [4]REEB تساهم تدابير استدامة جديدة، مثل أنظمة التدفئة والمياه الساخنة الموفرة للطاقة، وخزانات المياه، أو غيرها من الأنظمة في تخفيض الاستهلاك.
- تعظيم كفاءة الطاقة والمياه في أعمال التجديد للمباني التاريخية[5] MEWE.عند اقتراح أعمال تجديد لمبنى تاريخي قائم، ينبغي أن تشكل تدابير كفاءة الطاقة واستدامة المياه جزءاً أساسياً من عملية التصميم، ويمكن مراعاة ما يلي:

1. التوجيه: (O) توجيه النوافذ والفتحات الأخرى، لتحقيق أقصى استفادة من التصميم السلبي.
2. مواد البناء:(M) يمكن لهذه المواد أن تعزز كفاءة الطاقة والقيمة التراثية للمكان.
3. وسائل التظليل: المظلات، وأغطية النوافذ، والشرفات، أو المداخل.
4. كفاءة الطاقة المقترحة لأنظمة التدفئة والتبريد .

[1] Embodied Energy Conservation

[2] ويشمل ذلك استخراج وتصنيع المواد والمعدات، . هي الطاقة المستهلكة في جميع العمليات المرتبطة بإنتاج مبنى ونقل المواد، والوظائف الإدارية

[3] Optimizing of Heritage building Performance

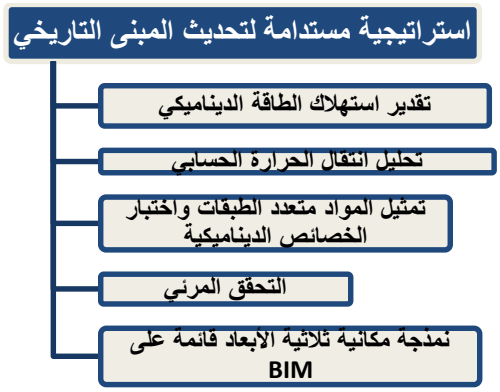
[4] Reducing Energy in Existed buildings

[5] Maximizing Energy and Water Efficiencies

5. تدابير ترشيد استهلاك المياه. مراقبة استهلاك الطاقة والمياه[6] MEWC إنَّ وضع خطة إدارة لمراقبة استهلاك الطاقة والمياه مستقبلا في المبنى القائم، يُسهم في تحقيق نتائج إيجابية M. Okba, E. &E. Embaby, M. (2013),p.1686

3-4- التوأمة الرقمية كأداة إيكوتكنولوجية لتحقيق الاستدامة في الأبنية التاريخية:

يُعتبر التوأم الرقمي أداة فعّالة لمحاكاة وتحسين أداء الطاقة في المباني، فمن خلال دمج مصادر البيانات، مثل نمذجة معلومات المبان (BIM) ، والمراقبة البيئية الآنية، ومحاكاة انتقال الحرارة الحاسوبية، يمكن للتوائم الرقمية توفير تمثيل افتراضي ديناميكي لسلوك الطاقة في المبنى، يتيح هذا النهج تقييماً أكثر دقة قائماً على الفيزياء لانتقال الحرارة واستهلاك الطاقة وأداء أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء، ما يساعد في وضع استراتيجيات مستدامة لتحديث المباني التاريخية، ضمن إطار متعدّد المستويات: Batziou, E. & others, (2025),p.99



الشكل (2): استراتيجية تحديث البناء التاريخي رقمياً. Batziou, E. & others, (2025),p.97 – تعديل الباحثة

4- التوأمة الرقمية والاستدامة: يتم ذلك من خلال أربع نقاط أساسية:

1. نهج دورة الحياة للاستدامة تُمكّن التوائم الرقمية من رؤية شاملة للبنية التحتية، تربط بين التخطيط والتصميم والإنشاء والتشغيل والصيانة، ومن خلال توفير نموذج واحد متطور، تُساعد فرق المشاريع على اختبار استراتيجيات الاستدامة مبكراً والتَّحقق من صحتها بمرور الوقت . كما تكشف عن أوجه القصور في المواد والطاقة والعمليات، مما يسمح للمالكين بتقليل الهدر، وتحسين استخدام الموارد، وإطالة عمر الأصول.

[6] Monitoring of Energy and Water Consumption

2. الكربون الكامن وكفاءَة الطاقة يُعدّ حساب الكربون وتحسين استهلاك الطاقة من أبرز التطبيقات الناشئة حيث يمكن للتوائم الرقمية محاكاة خيارات المواد وأساليب البناء، واختبار السيناريوهات لاختيار بدائل أقل تأثيرًا. Envision & institute for Sustainable infrastructure, (2025), p.5

يرتبط بند كفاءة الطاقة بـ:

- **تحسين التصميم:** يساهم التعديل على الخصائص الحرارية للمواد إلى زيادة كفاءَة المبنى القائم، مما يسفر عن انخفاض في استهلاك الطاقة وتحليل إضافي محاكاة لإنتاج الطاقة الذي يمكن الحصول عليه من استخدام تقنية الخلايا الكهروضوئية الشمسية التي تغطي 60% من مساحة السطح.
- **راحة شاغلي البناء:** توفير الطاقة وتحسين مستوى الراحة، ورضا المستخدمين. مثل معايرة التوأم الرقمي لعنصر واجهة تدفئة إشعاعية متعددة الوظائف مسبقة الصنع، تُعتبر درجة حرارة الغرفة معياراً مهماً لتوصيف الراحة الحرارية، ورضا المستخدمين.
- **تشغيل وصيانة المبنى:** استخدام تصميم التوأم الرقمي لتحسين كفاءَة الطاقة في المباني، وتحقيق كفاءَة عالية للمعدات.
- **محاكاة استهلاك الطاقة:** اقتراح إطار عمل رقمي للمباني التاريخية باستخدام تقنيات مثل إنترنت الأشياء (IoT) والحوسبة والذكاء الاصطناعي لإنشاء نماذج رقمية للمباني التاريخية. Bortolini, r. & others, (2022),p.2
- **المراقبة والتحكم في الوقت الفعلي:** من خلال الاستفادة من مستشعرات إنترنت الأشياء، تُمكّن من الإدارة الاستباقية لأنظمة الطاقة، بما في ذلك أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء والإضاءة.
- **النمذجة والمحاكاة التنبؤية:** تستخدم التوائم الرقمية خوارزميات متقدمة للتنبؤ باحتياجات الطاقة ومُحاكاة السيناريوهات المستقبلية.
- **دمج الطاقة المتجددة:** تُسهّل التوائم الرقمية اعتماد الطاقة المتجددة من خلال استخدام موارد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. وتختبر النماذج الافتراضية المقترنة بمحاكاة BIM سيناريوهات طاقة متنوعة.

- **الصيانة التنبؤية:** تفيد البيانات الآنية والتاريخية، في كشف الأعطال المحتملة، ويجعل الصيانة أكثر موثوقية واستدامة.
- **الحفاظ على المباني التاريخية:** تجمع التوائم الرقمية بين التحديث واحترام القيود المعمارية، فهي تُتيح تحسين كفاءة الطاقة والسلامة الإنشائية، ما يضمن الإدارة المستدامة للبناء التاريخي Sghiri, A. & others, (2025)p.3,4

3. **المرونة المائية وإدارة الموارد:** تلعب التوائم الرقمية دوراً حاسماً في إدارة المخاطر وموارد المياه.
4. **إشراك أصحاب المصلحة والشفافية،** توفر التوائم الرقمية منصة لصنع قرارات شفافة وعرض بدائل للمشاريع، وبناء الثقة، وتعزيز التعاون Envision & institute for Sustainable infrastructure, (2025),p.5 .

4-1- التوأمة الرقمية والاقتصاد الدائري:

يتركّز تطبيق التوأم الرقمي في قطاع البناء في مرحلتي التصميم والصيانة، بينما يُستخدم نادراً في مرحلة الهدم، يمكن تقسيم تطبيق التوأم الرقمي في قطّاع البناء إلى تطبيقات في مراحل التصميم والصيانة والتحويل والهدم، وذلك وفقاً لمراحل دورة حياة المبنى، تناولت عدّة دراسات التوأم الرقمي في مرحلة التصميم، وهو ما يمثل أكثر من 50% من الأبحاث المتعلقة بالتوأم الرقمي في البناء . تشمل هذه الدراسات محاكاة التوأم الرقمي وتحسين الألواح الكهروضوئية للمباني تشمل الدراسات المتعلقة بالصيانة معالجة الجسور وأطر الكشف عنها، وأنظمة اتخاذ قرارات صيانة الجسور في مرحلة الهدم. Chen, Z. & Huang, L. (2020),p.3,4

5- الحفاظ المعماري في ظل الحقبة الرقمية:

تتيح تقنية التوائم الرقمية في التراث المعماري إنشاء نموذج رقمي من خلال دمج المعلومات الثابتة والبيانات الآنية، ويُمكّن من التفاعل ثنائي الاتجاه بين الأنظمة الافتراضية والحقيقية، ما يسمح بإدارة النظام وتحليله والتنبؤ بأدائه، طُبقت تقنية التوائم الرقمية في المباني التاريخية والتراثية.

يُعدّ تقييم الأداء الهيكلي للتراث والتنبؤ به أمراً بالغ الأهمية للحفاظ على سلامته، من خلال نماذج رقمية، أو تطوير إطاراً لتقييم المخاطر الهيكلية في نماذج إعادة البناء ثلاثية الأبعاد في نقاط زمنية مختلفة. تبيّن أنَّ معايير البيئة الفيزيائية داخل المباني، مثل درجة الحرارة والرطوبة، تؤثر على

الحفاظ على التراث، وبالتالي، فإنَّ تحسين أداء الطاقة في المباني يعزِّز كفاءة الطاقة بالهيكل الداخلي للمباني Liu, N.F.; Liang, X.X.; Zhang, Y. (2024),p.4 .

5-1- مثال على نموذج توأم رقمي:

5-1-1- **نمذجة معلومات البناء (BIM):** هي تمثيل رقمي للخصائص المادية والوظيفية للمنشأة، وتُعدّ مورداً معرفياً مشتركاً للمعلومات حول المنشأة، مما يُشكل أساساً موثوقاً لاتخاذ القرارات خلال دورة حياتها؛ بمرحلة التصميم وحتى الهدم. تشمل فوائده خفض التكاليف وتقليل الأخطاء، وزيادة الكفاءة في التخطيط والبناء، والتعاون، وإدارة مرافق أكثر كفاءة، إذا كان تطبيق BIMعلى المباني الجاهزة أمراً صعباً، **فإن طبقة إضافية من التعقيد تصبح واضحة عندما يتم تطبيق نفس الأنظمة على المباني القائمة.**

5-1-2- **نمذجة معلومات البناء التاريخي (HBIM):**

ذُكر مصطلح " التاريخية لأول مرة عام ٢٠٠٩، وعُرِّف بأنه "حلٌّ مبتكرٌ تُبنى من خلاله عناصر معمارية تفاعلية، من بيانات تاريخية. تُرسم هذه العناصر بدقة على سحابة نقاط أو مسح قائم على الصور، توسّع نطاق المصطلح ليشمل البيئة التراثية بمجموعةً معقدة من القيم التاريخية والجمالية، ومُشاركة تخصصات مُتعددة. نظراً لأهمية الأبنية التاريخية، يُجسّد إدخال التقنيات الرقمية، مثل نمذجة معلومات البناء H-BIMونماذج التوائم الرقمية DTs، تقدماً متطوراً، إذ يُقدّم منهجيات مُحسّنة لاستعادة التراث الثقافي وصيانته، ويُمثّل أفقاً جديداً لعمليات البناء. Ewart, L. & Zuecco, V. (2019), p.2,3,4,

الجدول (1): الفرق بين BIMو HBIM. إعداد الباحثة بالاعتماد على المرجع: . Ewart, L. & Zuecco, V. (2019), p.2,3,4,

وجه الاختلاف	BIMالتقليدي	HBIMتاريخي
العناصر	مكتبة عناصر قياسية (أبواب، نوافذ جاهزة)	عناصر فريدة وغير منتظمة (نحت يدوي، جدران مائلة)
المعلومات	مواصفات المواد الجديدة	"سيرة ذاتية" للمادة (العمر، نسبة الرطوبة، المصدر)
الهدف	سرعة الإنشاء وتقليل التكلفة	الحفاظ على الأصالة والاستدامة الزمنية

6- <u>نتائج الدراسة النظرية: توصلت الباحثة من تحليل الجزء النظري إلى مجموعة من النتائج يمكن التعبير عنها وفق الأشكال التالية والتي ستكون محددات أساسية في البحث:</u>

1. أنَّ الاستدامة أهم تطبيق من تطبيقات التوائم الرقمية كما في الشكل 3 ص14
2. يوضح الشكل 4 مبادئ الاستدامة التي يمكن تحقيقها في الأبنية (ومنها التاريخية). ص14

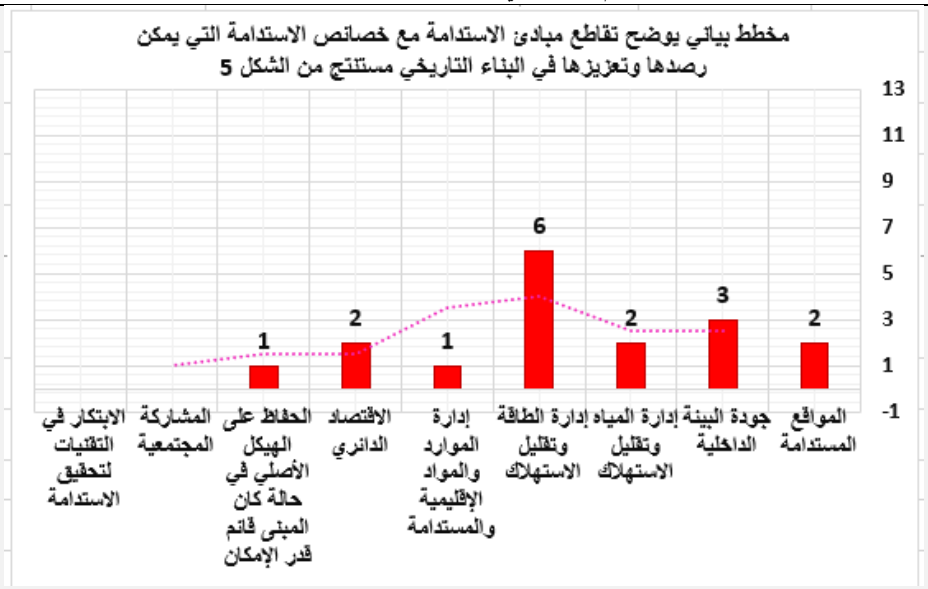


الشكل(3) يمين: تطبيقات التوائم الرقمية في الأبنية. إعداد الباحثة بالاعتماد على Lemian, D. & Bode, F. (2025),p.9,10– **الشكل (4) يسار:** مبادئ الاستدامة. إعداد الباحثة

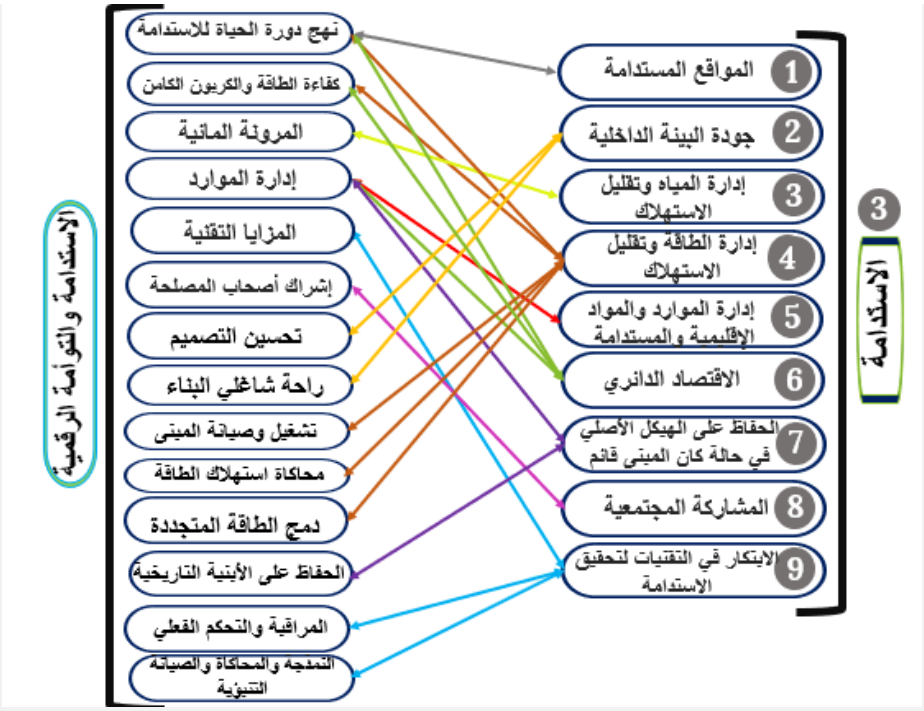
3. **يوضح الشكل 5 تقاطع مبادئ الاستدامة مع خصائص الاستدامة التي يمكن رصدها وتعزيزها في البناء التاريخي.**
4. **يوضح الشكل 6 تقاطع مبادئ الاستدامة مع خصائص الاستدامة التي يمكن تعزيزها من خلال التوائم الرقمية.**



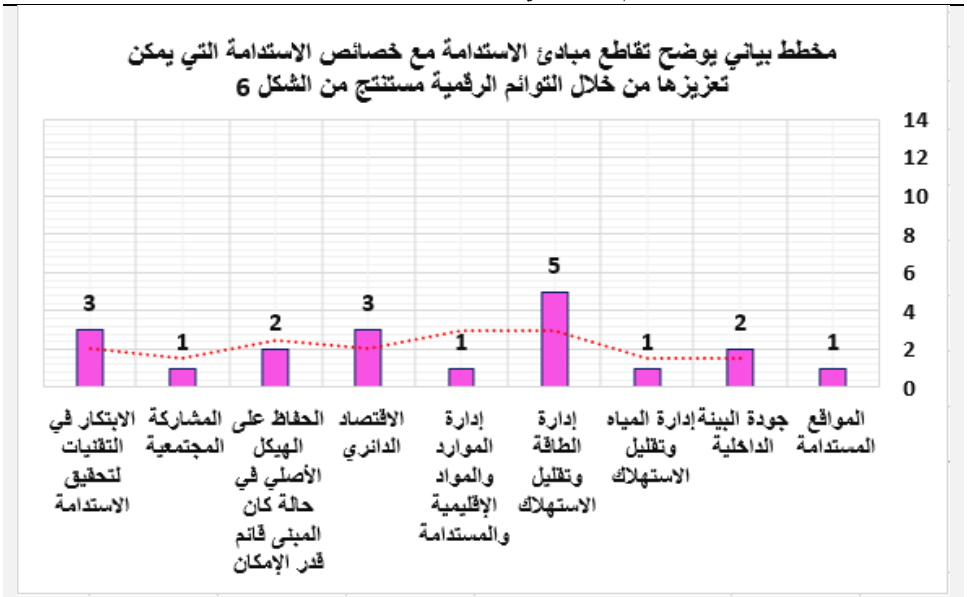
الشكل (5): تقاطع مبادئ الاستدامة مع خصائص الاستدامة في البناء التاريخي. إعداد الباحثة



المخطط (1): مخطط يوضح خلاصة الشكل 5 وعدد البنود فيه 13 ويشير إلى تثقيل مبدأ إدارة الطاقة وتقليل الاستهلاك إلى جانب جودة البيئة الداخلية. إعداد الباحثة



الشكل (6): تقاطع مبادئ الاستدامة مع خصائص الاستدامة التي يمكن تعزيزها من خلال التوائم الرقمية. إعداد الباحثة



المخطط (2): مخطط يوضح خلاصة الشكل 6 وعدد البنود 14 ويشير إلى تثقيل مبدأ إدارة الطاقة وتقليل الاستهلاك إلى جانب الاقتصاد الدائري بعد الاستعانة بالتوأمة الرقمية. إعداد الباحثة

7- **حالات دراسية:** سيتم في هذا الجزء دراسة وتحليل حالتان اثنتان عالميتان لاختبار صحة نتائج الدراسة النظرية. تمَّ اختيار الحالات الدراسية بحيث تكون أبنية تاريخية ذات قيمة وخضعت لعمليات تجديد وفق أدوات رقمية ورصد تعزيز الاستدامة فيها. ثمَّ تمَّت الإشارة إلى مبنى العابد في دمشق بتاريخ إنشاء مشابه لتاريخ الحالة الثانية ورصد خصائص الاستدامة المتوفرة فيه ثمَّ التوصل لآلية لدعم هذه الخصائص وفق تقنية رقمية مستقبلية.

<u>تتشابه الحالة الثانية والحالة المحلية في مايلي:</u>

- **الفترة الزمنية:** يواجه المبنيان تحديات "المباني الانتقالية" التي بُنيت بأساليب قديمة وتتطلب أنظمة تقنية حديثة (تكييف، كهرباء، عزل).
- **الوظيفة المعقدة:** كلاهما مبانٍ تشغيلية (تعليمية أو إدارية أو فندقية) تحتاج إلى موازنة بين "الحفاظ الأثري" و"الاستخدام اليومي المكثّف."

7-1- معهد الرياضيات في بولونيا- إيطاليا The Institute of Mathematics of Bologna يُعد معهد الرياضيات (Dipartimento di Matematica) التابع لجامعة بولونيا في إيطاليا حالة دراسية نموذجية في استخدام تقنية HBIMوالتوائم الرقمية (Digital Twins)للحفاظ على المباني التاريخية وتطويره. Massafra, A., Predari, G. & Gulli, R. (2022), p151

7-1-1- لمحة تاريخية: يُعد معهد الرياضيات في بولونيا، الذي صممه جيوفاني ميتشلوتشي، مثالاً قيّماً على العمارة الحديثة التي شُيّدت بين عامي 1955 و1965 يقع المبنى في المنطقة الجامعية في بولونيا بالقرب من الأسوار القديمة في العصور الوسطى.

7-1-2- معمارياً: يتألف من مبنيين يبلغ ارتفاع المبنى (أ) 24 مترًا ويمتد على عشرة طوابق متداخلة، بمساحة أرضية متوسطة تبلغ 490 مترًا مربعًا .ويضم مكاتب للأساتذة والباحثين، وقاعات دراسية صغيرة، ومكتبة، ومستودعًا للكتب .أما المبنى (ب) فهو برج يبلغ ارتفاعه 36 مترًا ويتكون من ثمانية طوابق بمساحة أرضية متوسطة تبلغ 365 مترًا مربعًا .ويضم قاعات دراسية كبيرة على شكل مدرجات وبعض المكاتب وتبلغ المساحة الإجمالية للمبنى 900 متر مربع Massafra, A., . Predari, G. & Gulli, R. (2022), p151 ويُعد الرواق، الذي يعكس طراز بولونيا المعماري في العصور الوسطى، العنصر المعماري الأكثر تميزًا في الواجهة الرئيسية. بأعمدته المتشعبة . Massafra, A., Costantino, C., Predari, G. & Gulli, R. (2024)p.77,

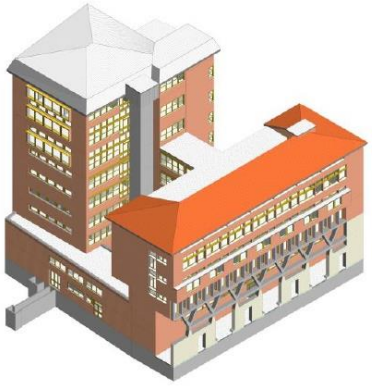


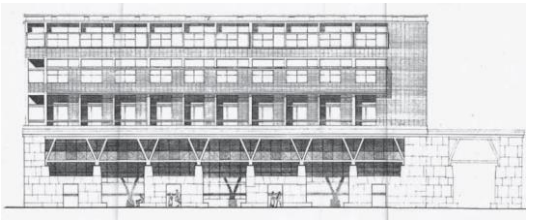
الصورة (1) يمين: مبنى معهد الرياضيات. المصدر :Michelucci, G. (2010),p. p.44 – **الصورة (2) يسار:** مبنى المعهد. المصدر موقع جامعة بولونيا- قسم الرياضيات.

7-1-3- سير العمل القائم على نمذجة معلومات المباني التاريخية:

في هذه الدراسة، تمّ تنظيم منهجية عمل قائمة على نمذجة معلومات المباني التاريخية (HBIM) لدعم التصميم الأولي لتدخلات تحسين كفاءة الطاقة، تمّ التركيز على نظام غلاف المبنى، إذ يُفترض أن تحسينه ضروري لخفض استهلاك الطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون أثناء التشغيل والصيانة. **تتطور هذه العملية وفقًا لمنهجية بحثية من أربع خطوات:**

1. **في المرحلة التوثيقية**، تُجمع المعلومات المتعلقة بالمبنى من خلال الدراسات التاريخية والأرشيفية، والمسوحات الرقمية، وعمليات البحث الميدانية، بالتشارك مع إدارة المبنى .
2. **المرحلة الحسابية** يتم إنشاء نموذج معلومات المباني التاريخية (HBIM) ونموذج طاقة المبنى (BEM) .
3. **في المرحلة التنبؤية**، تُحدد تدابير التدخل في مجال الطاقة، وتُحسب تكاليف البناء باستخدام بياناتBIM ، ويتم التنبؤ بالفوائد من حيث الطلب الحراري وتكاليف الطاقة للتدفئة ثم يُجري تحليل سريع متعدد المعايير مقارنة بين مجموعات التدخل المختلفة، ويُشير إلى الحل الأمثل لتحسين كفاءة الطاقة في المبنى.
4. **المرحلة التشغيلية** تراقب المعايير الديناميكية المتعلقة بإجراءات التدخل المختارة، وبالتالي إنشاء توأم رقمي ديناميكي Massafra, A., Predari, G. & Gulli, R. (2022), p152





الصورة (3): يمين، نموذج رقمي للمعهد وفق.HBIM – المصدر: Massafra, A., Predari, G. & Gulli, R. (2022), p153 – **الصورة (4): يسار**، الواجهة الأساسية للمعهد مطلة على الساحة – Michelucci, G. (2010),p. p.60,

-بالرجوع إلى دراسة الحالة المُحللة، تُظهر نتائج البحث أن تدخلات تحديث الطاقة بالغة الأهمية ليس فقط لتقليل الطلب على الطاقة، بل أيضًا لتقليل تكاليف التشغيل خلال دورة حياة المبنى. وتبين أنَّ ارتفاع تكاليف التدخل يُمكن أن يُقلل بشكل كبير من تكاليف الطاقة.

-يقدم التحليل السابق مجموعة من الحلول المصنفة ضمن استراتيجيتين رئيسيتين .(أ) تدخلات ذات أداء طاقة ممتاز، وتكاليف دورة حياة متوسطة، وتكاليف استثمار عالية .أما (ب) فتتألف من أداء طاقة متوسط، وتكاليف دورة حياة منخفضة، وتكاليف استثمار متوسطة.

— تم اختيار حلول يكون فيها استهلاك الطاقة بين 55 و75% وتنخفض تكاليف دورة الحياة بين 24 و43 %. أداء الطاقة الفعلي للمبنى لا يتطابق في كثير من الأحيان مع التوقعات. (تحليل الباحثة)

7-2- فندق قصر الريتز- اسبانيا، مدريد:

هو فندق فخم في مدينة مدريد الإسبانية، يقع في رقم 5 بلازا دي لا ليلتاد، في منطقة ريتيرو، تم افتتاحه عام 1910، وتديره حالياً سلسلة فنادق ماندارين أورينتال ويصنف بفندق خمس نجوم. (المصدر: ويكيبيديا)



الصورة (5): يمين، واجهة فندق الريتز بمدريد (إسبانيا) .تم تصميمه في عام 1908 من قبل تشارلز فريديريك مويس (1858-1914) وتم بناؤه في الفترة من 1908 إلى 1910 تحت إشراف لويس دي لانديتشو-1852)-1941) **الصورة (6): يسار**، العقار وساحة لاليلتاد. مرجع رقم [32]

7-2-1- لمحة تاريخية:

تمَّ افتتاح المبنى من قبل الملك ألفونسو، في موقع يُعتبر الأكثر صحة وهدوء في مدريد. كان الموقع المختار سابقًا عبارة عن حقل مفتوح، تشغله بعض الثكنات (التابعة لسيرك ميدان سباق

الخيل)، بالإضافة إلى حدائق مسرح تيفولي القديم، وكانت جميع هذه الأراضي في السابق تابعة لحدائق بوين ريتيرو في مدريد. يُعتبر أحد المباني الأولى في مدريد التي تستخدم الخرسانة المسلحة في بنائه. تم الانتهاء من أعمال البناء في 14 مايو 1910، وساهمت أشهر الشركات الإسبانية والأجنبية في ذلك الوقت في زخرفة غرفه. تغيَّرت وظيفته إلى سكن تقليدي عام 1975.

7-2-2- معمارياً:

يتكون المبنى من ستة طوابق بواجهات بسيطة على الطراز الفرنسي .مع 137 غرفة و30 جناحاً، وصالات كبيرة وحديقة محاطة بسياج حديدي ويمكن الوصول إليها من عدة مواقع، أحدها من مطعم.Goya [7] أُعيد افتتاح الفندق بعد تجديده بالكامل على يد المهندس المعماري رافائيل دي لاهوز والمصممين جيل وبواسييه [8] عام 2021. يقع داخل "المثلث الذهبي للفنون"، وهي منطقة تحددها أهم المتاحف في المدينة .المدخل الرئيسي يواجه بلازا دي لا ليلتاد .يحتوي الفندق على مطعمين أحدهما ذو طبيعة غير رسمية يقع في الحديقة والآخر من فئة أعلى يسمى جويا ويمتد إلى الطابق العلوي من التراس,hotel group, (2018),p2 .

7-2-3- سير العمل القائم على نمذجة معلومات المباني التاريخية: تجاوز مجرد الرسم ثلاثي الأبعاد إلى:

- دمج قنوات التكييف الحديثة (HVAC) وشبكات إطفاء الحريق دون اختراق السقوف المزخرفة أو الجدران الحاملة التاريخية.
- **تحليل الاستدامة** :محاكاة الأداء الحراري للمبنى المشيد قديماً لتحسين كفاءة الطاقة.
- **التوثيق الأثري** :تسجيل الحالة الإنشائية الدقيقة للواجهات الحجرية والقباب قبل البدء بأي تدخل جراحي معماري. يعمل نموذج الـ HBIM الآن كـ "توأم رقمي (Digital Twin) " لإدارة عمليات الصيانة والتشغيل للفندق من قبل شركة ماندارين أورينتال. يعتمد على المسح بالليزر (LiDAR) لتوثيق كل التفاصيل المعمارية الدقيقة.
- **إدارة التدهور الإنشائي** :استخدمت النماذج لتحليل الشقوق، الرطوبة، والتشوهات الهيكلية وربطها بقاعدة بيانات جغرافية (GIS) لاتخاذ قرارات ترميم دقيقة.

[7] https://es.wikipedia.org/wiki/Hotel_Ritz_(Madrid)
[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Mandarin_Oriental_Ritz,_Madrid

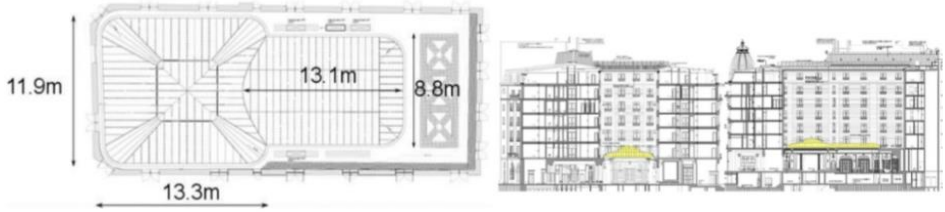
- **التكامل المعرفي** :دمج المعلومات التاريخية والأثرية داخل النموذج ثلاثي الأبعاد لدعم عمليات الصيانة المستقبلية. group sanjose[9], (2021),p.14& group sanjose, (2019),p.28,29

سيتم التعمق بتفصيل بناء القبة الزجاجية:

- **إعادة بناء القبة الزجاجية** :تمت استعادة القبة المركزية التاريخية التي كانت مخفية لأكثر من 80 عاماً. تم تصميم قبة جديدة خفيفة الوزن باستخدام قطاعات فولاذية منحنية على شكل حرف (T) لضمان أقصى درجات الشفافية ونفاذ الضوء الطبيعي. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 276
- يتطلب فن العمارة الحديثة أشكالاً معمارية مبتكرة وهياكل أنيقة ذات تصميمات انسيابية، سعياً وراء الشفافية مع مراعاة العزل الحراري، كما يمثل تجديد المباني القائمة تحدياً كبيراً، حيث تُستخدم تقنيات جديدة ونماذج العناصر المتقدمة في البحث عن هياكل أكثر جمالية ذات تصميمات انسيابية، مع الحفاظ على جوهر المبنى.
- **مراحل العمل:**

تمَّ تحديد الأبعاد الرئيسية والحلول الهيكلية والمكونات .ثم وصف منهجية التحقق من الهيكل الفولاذي في القسم وتم وصف طريقة محاكاة الألواح الزجاجية. وتم تحديد وصف مقاومة العوامل الجوية، والمقاومة، والاستقرار بعد الكسر. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 277

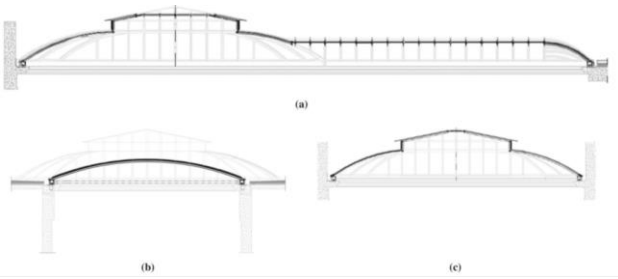
–وصف الهيكل:



الشكل (7): وصف تصميم النافذة السقفية .الأبعاد الرئيسية. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 277

[9] تُعدّ مجموعة سان خوسيه، التي يقع مقرها الرئيسي في إسبانيا، شركة رائدة عالمياً في مجال الإنشاءات والهندسة، حيث تُنشر تقارير أنشطتها ومعلوماتها المؤسسية على موقعها الإلكتروني الرسمي. تتخصص الشركة في مشاريع البنية التحتية الكبرى، بالإضافة إلى ترميم المباني الحديثة والتاريخية.

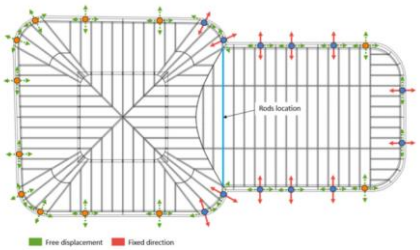
-الألواح الزجاجية:

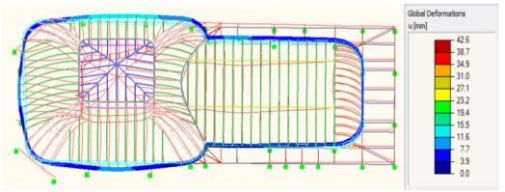


الشكل (8): الأجزاء الرئيسية للسقف الزجاجي – مقطع طولي ومقطعين عرضيين
Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 278

-التحقق من الهيكل (وصف النموذج)

-التحقق من الألواح الزجاجية (وصف النموذج)





الشكل (9)يمين: الانزلاقات المسموح فيها. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 279

الشكل (10) يسار: أقصى انحراف للفتحة تحت أحمال التشغيل. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 282

-اختبارات شاملة، اختبار مقاومة الماء، اختبار الصدمات

-عملية التصنيع والتجميع المسبق في ورشة عمل القاعة العليا والقاعة السفلى على التوالي، تركيب الألواح الزجاجية الهيكلية. اختبارات واسعة النطاق للفتحة السقفية: صُمم اختبارٌ شاملٌ مع مراعاة جزء تمثيلي من قاعة ألتو. أُجريت الاختبارات التالية ونجحت: • نفاذية الهواء ومنع تسرب الماء (الثابت) ,مقاومة أحمال الرياح وفقًا للمعيار • مقاومة أحمال الرياح المتزايدة تم تقييم تأثير ومقاومة ما بعد الكسر وكل ذلك وفق معايير عالمية معتمدة. over, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), 284

8- التقييم والتحليل: تمَّ توصيف الحالات الدراسية السابقة وسيتم اختبار نتائج القسم النظري وفق الحالتين السابقتين، يوضح **الجدول (2)** مبادئ الاستدامة المحققة في المثالين باستخدام التوائم الرقمية وبلغ عددها ستة من أصل 9. (إعداد الباحثة)

نقاط الاستدامة	مثال 1	مثال 2
المواقع المستدامة	-	√
جودة البيئة الداخلية	√	√
إدارة المياه وتقليل الاستهلاك	-	√
إدارة الطاقة وتقليل الاستهلاك	√	√
إدارة الموارد والمواد الإقليمية والمستدامة	-	-
الاقتصاد الدائري	√	√
الحفاظ على الهيكل الأصلي في حالة كان المبنى قائم قدر الإمكان	√	√
المشاركة المجتمعية	√	-
الابتكار في التقنيات لتحقيق الاستدامة	√	√
9	6	6

الجدول (2): مبادئ الاستدامة المحققة في المثالين وبلغ عددها ستة من أصل 9. (إعداد الباحثة)

يشير الجدول (3) إلى الخصائص المستدامة التي يتمتع بها البناء التاريخي وحققت 9 من أصل 13 في المثال الأول و10 من أصل 13 في المثال الثاني. ونلاحظ تثقيل لبند الطاقة بشكل عام (كفاءة الطاقة والطاقة الكامنة) والتوجيه والتكيف وإعادة الاستخدام. **ويشير الرمز√ وتكراره إلى عدد المبادئ المستدامة (أي عدد الأسهم وفق الشكل 5)** لينتج الجدول التالي:

الاستدامة في البناء التاريخي	مثال 1	مثال 2
الحفظ	–	√
كفاءة الطاقة	√	√
اختيار المواد	-	-
التكيف وإعادة الاستخدام	√√	√√
اعتبارات الموقع والمناظر الطبيعية	-	√

ترشيد الطاقة الكامنة	√√	√√
تحسين أداء البناء ومنها استدامة المكان	√	√
خفض استهلاك الطاقة في الأبنية	√	-
تعظيم كفاءة الطاقة والمياه	√	√
مراقبة استهلاك الطاقة والمياه	√	√
التوجيه	√	√√
وسائل التظليل	√	-
تدابير ترشيد استهلاك المياه	-	√
13	9	10

الجدول (3): الخصائص المستدامة المتوفرة في المثالين السابقين. إعداد الباحثة

يشير الجدول (4): الخصائص المستدامة المرتبطة باستخدام التوائم الرقمية وحققت 13 من أصل 14 في المثال الأول والثاني. ونلاحظ تثقيل لبند إدارة الطاقة بشكل عام إلى جانب نهج دورة الحياة والاستدامة إضافة لاستخدام تقنيات التوأمة الرقمية. **ويشير الرمز√ وتكراره إلى عدد المبادئ المستدامة (عدد الأسهم)** وفق الشكل (6) لينتج الجدول التالي:

نقاط التوأمة الرقمية والاستدامة	مثال 1	مثال 2
نهج دورة الحياة للاستدامة	√√	√√√
كفاءة الطاقة والكربون الكامن	√√	√√
المرونة المائية	–	√
إدارة الموارد	√√	√√
المزايا التقنية	√	√
إشراك أصحاب المصلحة	√	_
تحسين التصميم	√	√
راحة شاغلي البناء	√	√
تشغيل وصيانة المبنى	√	√
محاكاة استهلاك الطاقة	√	√
دمج الطاقة المتجددة	√	√
الحفاظ على الأبنية التاريخية	√	√
المراقبة والتحكم الفعلي	√	√

النمذجة والمحاكاة والصيانة التنبؤية	√	√
14	13	13

الجدول (4): الخصائص المستدامة المحققة والمرتبطة باستخدام التوائم الرقمية. (إعداد الباحثة)

9- نتائج الدراسة التحليلية السابقة:

- **القيمة البيئية التاريخية** :بينت نتائج تقييم الحالتين العالميتين في(الجدول 3) امتلاك المباني التاريخية لخصائص بيئية متميزة ناتجة عن حلولها التصميمية وموادها الإنشائية التقليدية.
- **دور التوأمة الرقمية** :أثبت التحليل السابق في الجدول رقم 4 قدرة التوائم الرقمية على دعم استدامة هذا الإرث المعماري عبر عدة محاور، تصدرها بند "كفاءة الطاقة" من خلال خفض الاستهلاك، محاكاة الطاقة المتجددة، وتطبيق نهج دورة الحياة الشامل وإدارة الموارد.
- **تحقق هدف البحث** :تؤكد هذه المؤشرات تحقق هدف الدراسة، والذي يرمي إلى أهمية اعتماد أداة تكنولوجية متقدمة تعزز كفاءة الأبنية التاريخية وتحافظ على استدامتها مستقبلاً.

10- حالة محلية بناء العابد في دمشق:

10-1- لمحة تاريخية:



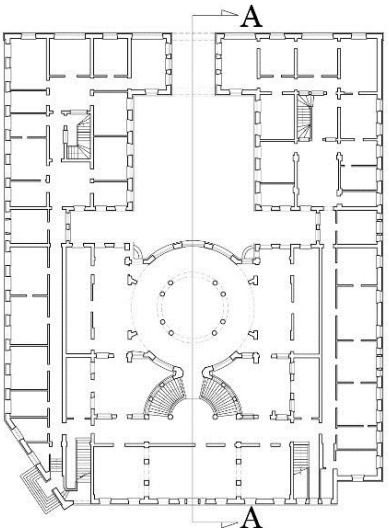
ينتمي هذا البناء للطراز الأوروبي المختلف شكلاً ونظاماً وهدفاً عن البناء المحلي (الخانات)، ويمثل مرحلة هامة في بناء الفنادق في دمشق. فقد أُنشئ هذا البناء ليكون فندقاً ولكن ظروف الحرب العالمية الأولى دفعت لاستخدامه مشفى عسكري ثم منزلاً للعساكر ومازال يحمل اسم المنزل.

الصورة (7): سرايا عزت باشا العابد سنة 1910م مكان قصر والي دمشق. [31]

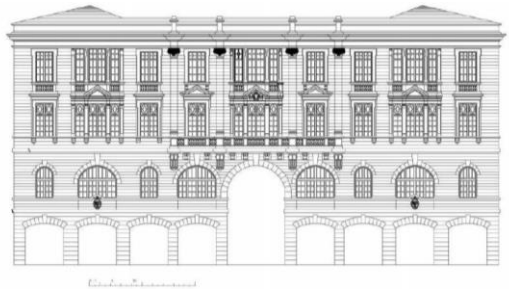
تعود ملكية البناء في الأساس إلى عزة باشا العابد، وبفضل نفوذه في البلاط السلطاني استقدم (داراندە)[10] الإسباني الأصل من تركيا للإشراف على البناء وفق طراز مباني القرن التاسع عشر الأوروبية وانتهى سنة 1910 ليكون فندقاً. الشيخ قاسم، رفاه.(1989-1990). انتهى بناؤه عام 1910. وهو عبارة عن بناء لا يقل أهمية عن قصر العظم في ذلك الوقت حيث شكل من خلاله الواجهة الجنوبية للساحة حيث يقوم دار الحكومة، أما الواجهة الشمالية جامع يلبغا وبناء العدلية والبرق والبريد والواجهة الغربية بناء البلدية والطبابة. الشيخ قاسم، رفاه.(1989-1990). يسيطر مبنى العابد على ساحة المرجة بأهميته وقدمه وطراز بنائه بالإضافة إلى حجمه وارتفاعه.

10-2- معمارياً:

-يحتوي الطابق الأرضي على المدخل الرئيسي وهو مسقوف ويؤدي إلى الباحة السماوية الشمالية الخاصة بالمبنى وفيها بحرة ماء ويمكن الوصول إلى هذه الساحة عبر مدخلين جانبيين مسقوفين أيضاً. يتضمن الطابق الأول مدخل من جادة رامي ذو مطلع حجري (ست درجات)، ويحتوي داخله 41 غرفة ومرتفقين وقاعة دائرية كبيرة وهو بارتفاع 550سم.



[10] Fernando de Aranda (Madrid 1878 Damascus 1968)was the son of the compouser Fernando de Aranda who served at the court of Abdül Hamid II between 1886 and 1909, he settled down in Damascus at the begining of the 20th century and also became homorary consul of Spain during World War 1st



يظهر المخطط المجاور المسقط الأفقي للطابق الأرضي لبناء العابد. ويشغل هذا الطابق فعاليات
عدة تتنوع بين تجارية وصناعية وإدرابة.
بالإضافة إلى مقطع طولي في البناء توضح عليه القبة المركزية لإنارة الجزء الوسطي للبناء .



الشكل (11): الطابق الأرضي لمبنى العابد.
– **الشكل (12):** مقطع في بناء العابد.
المصدر: مكتب عنبر بتصرف الباحثة **الشكل (13):** الواجهة الشمالية لمبنى العابد. المصدر: ورشة عمل في كلية الهندسة المعمارية 2026 .

–يحتوي الطابق الثاني على /76/غرفة للسكن وخمسة ممرات رئيسية وثلاثة مرتفقات، بالإضافة إلى وجود شرفة في الواجهة الرئيسية وبهو غير مسقوف مطل على الباحات السماوية الخلفية وأربع دورات مياه، ودرجين حجر يصلان إلى الطابق الثالث والأخير.

–يضم عدد من الغرف /44/ للسكن وثلاثة ممرات رئيسية وثلاثة مرتفقات وست دورات مياه بالإضافة إلى سطحين قرميد يغطيان الجزء الجنوبي من المبنى ويُستخدمان كمستودعات ويوجد. (الباحثة)

10–3– تحليل الاستدامة في البناء:

–يقع في مركز المدينة ويطل على ساحة عامة ويُعتبر سهل الوصول.

–مادة البناء الأساسية هي الحجر المعروف بخصائصه البيئية العالية بالحفاظ على الحرارة والكتامة ومقاومة عوامل الطقس الخارجية، إضافةً إلى الآجر والطين.

-تصل الإنارة الطبيعية إلى كافة الغرف في البناء صيفاً وتتناسب مساحة الغرف مع مساحة الفتح فيها. ويبلغ ارتفاع الأسقف 470-550 سم.

-تبلغ نسبة الفتح على الواجهة الشمالية 32%، والواجهة الجنوبية 16.02%، والواجهة الشرقية 19.29%، والواجهة الغربية. حوالي 25.39%. ع.

-الباحة السماوية الأساسية وتبلغ مساحتها 344م^2 ومساحة المرتفقين الجنوبيين 100م^2 وبالتالي نسبة الانفتاح للبناء 20.96%.

-السقف الأخير فهو سقف جمالوني من القرميد والخشب مائل يشكل الغلاف العلوي للبناء ويحميه من العوالق المحمولة في الهواء ومن تراكم تأثيرات العوامل الجوية (أمطار وثلوج).

-يساهم استعمال هذه الأسقف تلبية العديد من المتطلبات البيئية من حيث سرعة تصريف مياه الأمطار، وزيادة كمية الهواء الداخلة إلى المبنى، وبالتالي التهوية المستمرة للفراغات إضافةً إلى زيادة الكتلة الهوائية الداخلية، كما حققت فوائد حرارية.

-قامت المحافظة ومكتب عنبر بتنظيف الواجهات الخارجية للتخلص من التلوث عام 2007.

-يُخصص للبناء حوالي 40 م^3 من الماء وذلك تبعاً لقوانين البناء القديمة. وإلى الآن يستهلك البناء ككل كميات أقل من العداد. [11]

-قلة الخدمات في البناء تؤدي إلى التقليل من استهلاك المياه والكهرباء. (تحليل الباحثة)

- **في دراسة حرارية للبناء يظهر مايلي:** المصدر ورشة عمل في كلية الهندسة المعمارية 2026.

توجيه المبنى: يستقبل الفناء الداخلي للمبنى الضوء، بحيث يساعد على التهوية الطبيعية وتوفير الإضاءة دون اكتساب حراري مفرط.

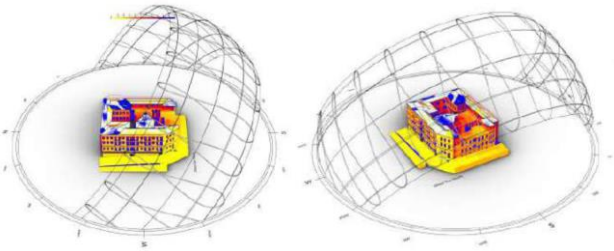
دراسة الغلاف:

تحليل الكتلة والمسار: نلاحظ أنَّ الجهة الجنوبية والشرقية من المبنى هي الأكثر تلوناً بالأصفر والبرتقالي، مما يعني أنها "نقاط ساخنة" تتطلب معالجات حرارية مكثفة. المبنى يظلل نفسه بنفسه؛ حيث تظهر الواجهة الشمالية والمناطق الغائرة باللون الأزرق، مما يوفر راحة حرارية طبيعية.

النتيجة: نجاح استراتيجية "الفناء" في مبنى العابد؛ حيث يوفر الفناء إضاءة طبيعية دون السماح للشمس المباشرة بالدخول لساعات طويلة، مما يمنع الاحتباس الحراري داخل الممرات الداخلية.

[11] تحليل الباحثة.

توزيع الظلال الساقطة الأجزاء السفلية من الواجهة تظهر (اللون الأزرق/البنفسجي)، مما يعني أن الطابق الأرضي محمي بكتلة الطوابق العليا، وهذا يفسر برودة المحلات التجارية في مبنى العابد صيفاً.



الشكل (14): دراسة حرارية لبناء العابد.

10-4- الخلاصة البيئية:

كفاءة التصميم: ينجح المبنى في حماية 30 % من مساحته كلياً من الإشعاع المباشر بفضل الفناء الداخلي، وهي نسبة ممتازة للمباني التاريخية.

الفجوة الحرارية: هناك فارق يصل إلى 2000 ساعة تعرض بين السطح العلوي (الأصفر) وبين قاع الفناء (الأزرق)، مما يخلق فرقاً في ضغط الهواء يساعد على حركة النسيم داخل المبنى.

نقطة الضعف: تتركز في الأسطح الأفقية التي تمثل 22 % من الكتلة، والتي إذا تم عزلها، يمكن رفع كفاءة المبنى الحرارية الإجمالية بنسبة تصل إلى 40%. [12]

يشير **الجدول (5) إلى** تقييم مبادئ الاستدامة المتوفرة في المبنى بوضعه الحالي.

نقاط الاستدامة	مثال 3	الاستدامة في البناء التاريخي	مثال 3
المواقع المستدامة	√	الحفظ	√
جودة البيئة الداخلية	√	كفاءة الطاقة	–
إدارة المياه وتقليل الاستهلاك	–	اختيار المواد	√
إدارة الطاقة وتقليل الاستهلاك	–	التكيف وإعادة الاستخدام	√√

[12] ورشة عمل في كلية الهندسة المعمارية – جامعة دمشق

دور التوائم الرقمية في تعزيز استدامة الأبنية التاريخية

إدارة الموارد والمواد الإقليمية والمستدامة	√	اعتبارات الموقع والمناظر الطبيعية	√
الاقتصاد الدائري	√	ترشيد الطاقة الكامنة	√√
الحفاظ على الهيكل الأصلي في حالة كان المبنى قائم قدر الإمكان	√	تحسين أداء البناء ومنها استدامة المكان	√
المشاركة المجتمعية	-	خفض استهلاك الطاقة في الأبنية	-
الابتكار في التقنيات لتحقيق الاستدامة	–	تعظيم كفاءة الطاقة والمياه	–
9	5	مراقبة استهلاك الطاقة والمياه	-
		التوجيه	√√
		وسائل التظليل	-
		تدابير ترشيد استهلاك المياه	-
		13	7

الجدول (5): تقييم مبادئ الاستدامة المتوفرة في المبنى بوضعه الحالي وخصائص الاستدامة المحققة في البناء بشكل طبيعي ويظهر ذلك ضعف في تدابير خفض استهلاك الطاقة، وبند كفاءة الطاقة ويشير الرمز√ وتكراره إلى عدد المبادئ المستدامة المحققة وفق الشكل 5 الوراد في ص14. (إعداد الباحثة)

نتيجة تحليل المحلية: تشير تقييم الحالة السابقة المحلية إلى أهمية اعتماد التوائم الرقمية في خطة تأهيله لما يتمتع به هذا البناء من ميزات بيئية الأمر الذي يساهم في تعزيزها، وخاصةً على مستوى كفاءَة الطاقة.

11- النتائج العامة، توصَّل البحث إلى النتائج التالية:

على مستوى التوأم الرقمي:

- مفهوم وطبيعة التوأم الرقم: أثبتت الدراسة أن التوأم الرقمي ليس مجرد مجسم أو صورة ثلاثية الأبعاد ثابتة، بل هو نظام تفاعلي حي. يتحرك هذا النظام في اتجاهين متبادلين: ينقل التغييرات من المبنى الحقيقي إلى النسخة الافتراضية، ويرسل الحلول من النسخة الافتراضية إلى أرض الواقع، وذلك بالاعتماد على تدفق مستمر للبيانات بشكل دوري.

- تتجاوز تقنية التوأمة الرقمية مفهوم النمذجة المرئية الساكنة للمبنى، لتشكل نظام إدارة ديناميكي يهدف إلى إطالة العمر الافتراضي للمنشأة التاريخية، مع رفع كفاءتها التشغيلية وتقليص تكاليف الصيانة إلى حدها الأدنى

على مستوى الاستدامة في البناء التاريخي:

- **أولويات التطبيق الرقمي في التشييد** :تخلص النتائج إلى أنَّ الاستدامة البيئية والإنشائية تمثل التطبيق الراهن الأعلى كفاءة والأكثر أهميةً لتقنيات التوائم الرقمية ضمن قطاع البناء والتشييد.
- **تكامل الثلاثية المنهجية** :تحقق المنهجية المقترحة تكاملاً بنيوياً بين (التوأمة الرقمية، الأبنية التاريخية، معايير الاستدامة)، مما يضمن تحويل المنشآت التاريخية إلى مباني ذكية قادرة على التكيف المناخي، والانتقال من إستراتيجية "الصيانة العلاجية كرد فعل" إلى "الإدارة الاستباقية الوقائية.(Proactive Maintenance) " وهي جوهر الاستدامة في البناء التاريخي.
- **الاستجابة الفيزيائية للمواد التقليدية** :تبدي الهياكل التاريخية (المبنية من الحجر، الخشب، والطوب) حساسية وحركية عالية تجاه التغيرات الجوية المحيطة مقارنة بالمباني الحديثة، مما يجعلها النمط المعماري الأكثر احتياجاً لأدوات المحاكاة الرقمية المستمرة.

على مستوى الاستدامة بأبعادها الثلاث:

- **التحسين البيئي والحراري:** تتيح محاكاة التوأم الرقمي إمكانية التحليل الديناميكي للأنظمة الحرارية داخل الكتلة المعمارية، مما يضمن الوصول إلى الأداء الحراري الأمثل للجدران الحجرية السميكة، وتقليل استهلاك الطاقة لعمليات التدفئة والتبريد.
- **الجدوى الاقتصادية والإنشائية** :يسهم الاعتماد على الصيانة الوقائية الرقمية في إطالة العمر الافتراضي للمنشأة الأثرية (استدامة إنشائية)، وضبط وتوجيه نفقات التشغيل، فضلاً عن خفض التكاليف الناتجة عن عمليات الترميم العشوائي التقليدية (استدامة اقتصادية).

على المستوى التطبيقي:

- **التحقق التجريبي من كفاءة الطاقة** :أكدت المخرجات البيانية والتحليلية الواردة في (المخطط 1 والمخطط 2) كفاءة التوائم الرقمية في تعزيز بنود ترشيد الطاقة، وهو ما تم التحقق من صحته من خلال الحالتين الدراسيتين العالميتين المرجعتين.
- **تقييم الحالة الدراسية المحلية (بناء العابد)** :أظهرت نتائج التقييم لـ "بناء العابد" امتلاكه لخصائص ومؤشرات استدامة مدمجة جيدة، إلا أنَّها سجلت قصوراً واضحاً على مستوى "كفاءة الطاقة". وبناءً عليه، يثبت البحث الأهمية العلمية لاعتماد تطبيقات التوأم الرقمي لرفع كفاءة الطاقة أثناء خطط إعادة التأهيل، وهي نتيجة قابلة للتعميم القياسي على غالبية الأبنية التاريخية في مدينة دمشق القديمة لتماثل الخصائص الفيزيائية والإنشائية.

12- المراجع:

1- الشيخ قاسم، رفاه.(1989-1990). ***دراسة تحليلية توثيقية لمبنى العابد وعلاقته بساحة المرجة***، رسالة دبلوم، جامعة دمشق. دمشق،سورية.

[2]. سليمان، صبا، (2026). ***الذكاء الصناعي ودوره في دراسة التاريخ والآثار***، بحث منشور، مجلة جامعة حمص سلسلة العلوم الهندسية المدنية والمعمارية، المجلد 48، العدد 3، حمص، سورية.

[3]. Akyol, G.& Berkay Avci, A. (2025), ***Digital Twins in Heritage Conservation and Visitor Engagement: Comparative Case Studies from Four Historic Sites***, Periodica Polytechnica Architecture, 56(2–3), pp. 80–93, Budapest, Romania.

[4]. Batziou, E. & others, (2025), ***Digital Twin Development for Cultural Heritage Buildings: A Multimodal Approach to Simulating Energy Performance***, ACM IMX Workshops,USA. https://doi.org/10.5753/imxw.2025.9461.

[5]. Bortolini, r. & others, (2022), **Digital Twins' Applications for Building Energy Efficiency: A Review**, Building Energy Efficiency: Energies 2022, 15, 7002, https://doi.org/10.3390/en15197002. Basel, Switzerland.

[6]. Bover, A., Torres, J.Hug Bitlloch, C. & Vilà,J.(2021), ***Skylight of the hotel RITZ: case study***, © Springer Nature Switzerland AG 2020.

[7]. Chen, Z. & Huang, L. (2020), ***Digital Twin in Circular Economy: Remanufacturing in Construction***, World Sustainable Built Environment conference, Series: Earth and Environmental Science 588, Bristol, UK.

[8]. Envision & institute for Sustainable infrastructure, (2025), ***Advancing Infrastructure Sustainability Through Digital Twins***, Report Card for America's Infrastructure). Washington, D.C.

[9]. Ewart, L. & Zuecco, V. (2019), ***Heritage Building Information Modelling (HBIM): A review of published case studies***, This research was carried out as part of an Erasmus+ Student Traineeship between the Universities of Reading, UK and Padova, Italy.

[10]. ecclesiastical.ca, (2023), ***Sustainability for Heritage Buildings: Balancing Preservation and Environmental Responsibility***, white paper, Toronto, Canada.

[11]. group sanjose, (2021), ***information of activities, www.gruposanjose.biz.*** Pontevedra, Spain

[12]. group sanjose, (2019), ***activity report, www.gruposanjose.biz.*** Pontevedra, Spain

[13]. Hosamo, H. (2023), ***Digital Twin technology toward more sustainable buildings Predictive maintenance, energy optimization and occupants' comfort in non-residential buildings***, Doctoral Dissertation for the Degree Philosophiae Doctor (Ph.D.) at the Faculty of Engineering and Science, Specialisation in Renewable Energy, University of Agder, Norway.

[14]. hotel group, (2018), ***Hotel Ritz, Madrid Announces Restoration***, news release, Madrid.

[15]. KAKDAŞ ATEŞ, D. & AKALP, (S.), (2025), ***The Future of Heritage: Digital Restoration and Intelligent Modeling Approaches in Historic Buildings***, International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, vol 9, Skopje, North Macedonia.

[16]. Karatzas, S., Lazari, V., Fouseki, K., Natalia Pracchi, V. & Balaskas, E. (2024), ***Digital twins-enabled heritage buildings management through social dynamics***, Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, Vol. 16 No. 7, 2026, pp. 150-166, Bingley, UK.

[17]. Lemian, D. & Bode, F. (2025), ***Digital twins in the building sector: implementation and key features***, E3S Web of Conferences paper, Romania.

[18]. L. Webb, A. (2017), ***Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods***, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 77, https://www.sciencedirect.com. Netherlands

[19]. Liu, N.F.; Liang, X.X.; Zhang, Y. (2024), ***A Digital-twin Based Conservation of Campus Historic Buildings under Sustainable Development Framework***, (60th ISOCARP World Planning Congress "Reinventing The (In)visible Cities" Siena, Italy.

[20]. Massafra, A., Predari, G. & Gulli, R. (2022), ***Towards digital twin driven cultural heritage management: a HBIM-based workflow for improvement of modern buildings***, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVI-5/W1, Prague, Czech Republic.

[21]. Massafra, A., Costantino, C., Predari, G. & Gulli, R. (2024), ***Modern Construction in Italy: the Institute of Mathematics in Bologna***, 8th International Congress on Construction History – Zurich.

[22]. M. Okba, E. &E. Embaby, M. (2013), ***Sustainability and Heritage Buildings***, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2 Issue 8, Bangalore, India.

[23]. Michelucci, G. (2010), ***I nuovi istituti di matematica e geometria***, Book, ISBN 978-88-902128-6-4, Bologna, Italy.

[24]. NI, Z. & others, (2025), ***Parametric Digital Twins for Preserving Historic Buildings: A Case Study at Löfstad Castle in Östergötland***, Sweden, IEEE Access Journal, Vol 13, USA.

[25]. Pr´edhumeau, M. (2025), ***Sustainable Urban Digital Twins: Reducing, Reusing, Recycling Models***, The 19th International Conference on Computational Urban Planning and Urban Management (CUPUM), CASA, UCL, Jun 2025, London, United Kingdom.

[26]. Standardization Council Industrie 4.0), (2024), ***Digital twin reference model and standardization to realize a sustainable industry***, THE ROBOT REVOLUTION & INDUSTRIAL IOT INITIATIVE, Tokyo, Japan.

[27]. Sghiri, A. & others, (2025), ***Leveraging Digital Twins for Enhancing Building Energy Efficiency***: A Literature Review of Applications, Technologies, and Challenges. Buildings, https://doi.org/10.3390/buildings15030498, Basel, Switzerland.

[28]. Wright, L. & Davidson, S., (2020), ***How to tell the difference between a model and a digital twin***, Advanced modeling and simulation in engineering sciences, no 7, vol 13, Zug, Switzerland.

[29]. W.H. Fung, I., Tsang, Y., W.Y. Tam, V., Xu,Y. & C.K. Mok, E. (2017), ***A review on historic building conservation: A comparison between Hong Kong and Macau systems***, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 71. https://www.sciencedirect.com. Netherland

[30]. Yang, p.& others, (2020), ***Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques***, Journal of Cultural Heritage, Volume 46, https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008 .Paris, France.

[31]. www.tishreen.inet.sy الموقع الإلكتروني لجريدة تشرين

[32]. Wikipedia.com

انتهى البحث

التنبؤ بمقاومة الفتل للجوائز البيتونية المسلحة باستخدام الذكاء الصناعي

د.م دارين شعبان السلامة[1]

1 : دكتور في كلية الهندسة المدنية قسم الهندسة الإنشائية

ملخص البحث

يشكل الفتل أحد الأفعال الإنشائية الأساسية إلى جانب الانعطاف والقص والشد والضغط المحوري، وتتأثر مقاومة الفتل للعناصر الإنشائية بعدد كبير من العوامل لم يتم أخذها جميعا في المعادلات، قمنا في هذا البحث بتقدير مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل الصافي باستخدام الشبكات العصبونية الصنعية أحد تقنيات الذكاء الصناعي التي أثبتت فعاليتها في الكثير من المجالات وذلك بتدريب واختبار شبكة عصبونية صنعية أمامية التغذية باستخدام التراجع التدريجي للخطأ وتابع تفعيل Sigmoid، بأخذ اعتبار لعشرة عوامل مؤثرة على مقاومة الفتل وقد بينت الدراسة فعالية الشبكات العصبونية في محاكاة سلوك الجوائز البيتونية على الفتل الصافي وتقدير قيمة مقاومة الفتل لهذه الجوائز، حيث بلغت قيمة متوسط الخطأ النسبي الأصغري وجذر متوسط الخطأ التربيعي الأصغري الذي أعطت الشبكة المطورة على الترتيب: AVG=2.1%، RMSE=2%. وبلغت قيمة متوسط الخطأ النسبي لعينات الاختبار 0.28%.

كلمات مفتاحية:

الجوائز البيتونية المسلحة، مقاومة الفتل ،الشبكات العصبونية الصنعية.

Predicting of Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams Using Artificial Intelligence

Dr. Dareen Alsalamah[1]

1: doctor in structure department, Faculty of Civil Engineering

Abstract

Torsion forms one of the basic structural actions besides flexure, shear and axial compression/tension. The torsional strength affected large number of factors which aren't taken in equations. There are many attempts by researchers to estimate these strength by relying on as many influencing factors as possible. We used in this research one of artificial intelligence techniques which is neural network, which proves its effective in a lot of applications, to estimate torsional strength of reinforced concrete beams. We trained and tested feed forward networks using back-propagation with Sigmoid activation function, by considering ten factors affecting torsional strength. The result demonstrates that neural networks are effective in simulating the torsional behavior of reinforced concrete beams and estimate torsional strength of these beams. The minimum mean relative error and root-mean-square error (RMSE) yielded by the developed network were AVG = 2.1% and RMSE =2% , respectively. Additionally, the mean relative error for the testing samples = 0.28 %.

Key words:

Reinforced concrete beams, torsional strength, artificial neural networks.

1- مقدمة البحث:

درسنا في هذا البحث إمكانية التنبؤ بمقاومة الجوائز البيتونية على الفتل الصافي باستخدام الشبكات العصبونية الصنعية وذلك بالاستعانة ببيانات جوائز بيتونية مسلحة مختبرة على الفتل الصافي من عدة أبحاث سابقة لتطوير شبكة عصبونية مثلى قادرة على محاكاة السلوك الفتلي للجوائز البيتونية المسلحة وإعطاء قيمة دقيقة لمقاومة هذه الجوائز على الفتل الصافي واخترنا منها الشبكات متعددة الطبقات أمامية التغذية التي تستخدم التراجع التدريجي للخطأ وقمنا بتدريبها واختبارها بالاستعانة ببرنامج "Brain Maker" وقد حصلنا على نتائج جيدة بينت فعالية هذه التقنية في تقدير مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل

2- المشكلة العلمية ومبررات البحث:

حاول العديد من الباحثين فهم سلوك الجوائز البيتونية المسلحة المعرضة للفتل وإيجاد طرق لتقدير قيمة مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل مع محاولة لحظ أكثر العوامل تأثيراً على هذه المقاومة، إلا أن عدد التجارب مازال محدوداً مقارنة مع تجارب تحديد مقاومة القص ومقاومة الضغط. تقدم هذه الدراسة محاولة إضافية لتقدير مقاومة الجوائز البيتونية على الفتل بلحظ عدد كبير من العوامل المؤثرة ومجالات واسعة لكل عامل قبل إجراء التجارب بمحاكاة عمل الدماغ البشري بالاستعانة بتقنية الشبكات العصبونية الصنعية، حيث أحدثت الشبكات العصبونية الصنعية التي استخدمت في العقود الأخيرة نقلة نوعية في مجال محاكاة سلوك العناصر الإنشائية وتقدير مقاوماتها مهما كان عدد ومجال العوامل المؤثرة عليها، إذ وفرت هذه الطريقة كثيرا من الوقت والكلفة، واستطاعت التعبير عن سلوك العناصر الإنشائية على مستوى عال من الدقة والموثوقية.

هدف البحث:

اختيار شبكة عصبونية صنعية قادرة على تقدير مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل بناء على العوامل المؤثرة على هذه المقاومة عن طريق تدريب واختبار عدة شبكات عصبونية صنعية اعتماداً على بيانات تجارب أبحاث سابقة.

3- الدراسة المرجعية:

سوف نستعرض بعض الأبحاث التي حاولت إيجاد طرق لتقدير مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل:

1- أجرى الباحث C.E.Chalioris (2006) دراسة تجريبية لدراسة سلوك الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل ومحاولة تقدير المقاومة الفتلية باختبار خمسة عشر جائز ضمن خمس مجموعات كل مجموعة تضم ثلاث عينات بتغيير لأبعاد الجائز ضمن فئتين وتغيير التسليح الطولي والعرضي ومقاومة البيتون على الضغط، بالإضافة لمحاولة التنبؤ بمقاومة الفتل عن طريق اقتراح طريقة تدمج نظريتين مختلفتين نظرية تحليل الشقوق بالمرحلة المرنة ونظرية الجائز الشبكي بمرحلة ما بعد التشقق وقد توصل الباحث إلى أهمية تأثير التسليح على مقاومة الفتل وإمكانية توقع هذا التأثير. [4]

2- حاول الباحثان Mohammad Rashidi and Hana Takhtfiroozeh(2016) تقدير مقاومة الفتل للجوائز البيتونية المسلحة ودراسة تأثير التسليح على هذه المقاومة بإجراء تجارب على أربعة جوائز بيتونية مسلحة أحدها بدون تسليح والآخر بتسليح طولي فقط والثالث بتسليح عرضي والأخير يحوي تسليح طولي وعرضي ومن ثم مقارنة النتائج مع الكودات العالمية وبينت النتائج أن استخدام التسليح الطولي والعرضي معاً يزيد من مقاومة الجوائز البيتونية على الفتل.[12]

3- قدم الباحثون Luis F.A.Bernardo, Mafalda M. Teixeira, Dario De Domenico and Jorge M. R. Gama (2022) دراسة لإيجاد علاقات أفضل وأبسط من المتوفرة في المراجع لتقدير مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل بالاعتماد على محاكاة الجائز الشبكي الفراغي (Space Truss Analogy) بالاعتماد على بيانات (202) من الجوائز البيتونية المسلحة المختبرة سابقاً ومقارنة العلاقات المطورة من قبلهم مع العلاقات المقترحة من الباحثين وتوصل البحث إلى أن العلاقات المقترحة من قبلهم تقدم دقة مقبولة ويمكن استخدامها بسهولة.[9]

4- اقترح الباحثون Diana S. O. Bernardo, Luis F.A.Bernardo, Hamza Imran, and Tiago P. Ribeiro (2023) طريقة تدريب بتقنية "Machine Learning" للتنبؤ

بمقاومة الفتل للجوائز البيتونية المسلحة وتقسيم البيانات إلى مجموعتين مجموعة للتدريب وأخرى للاختبار بأخذ ثلاثة عوامل (مساحة المقطع العرضي البيتوني Ac، مقاومة البيتون على الضغط Fc، نسبة جداء مساحة التسليح الطولي بإجهاد الخضوع للتسليح الطولي بمساحة التسليح العرضي بإجهاد الخضوع للتسليح العرضي إلى التباعد بين الأساور $A_lF_{yl}A_tF_{yt}/S$) وبناء خمسة نماذج للمحاكاة وتبين أن عامل مساحة المقطع العرضي البيتوني A_c هو الأكثر تأثيرا على مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل، وأن مقاومة البيتون على الضغط هي الأقل تأثيراً على مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل، وأن هناك أربع نماذج أعطت دقة مقبولة بتقدير مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة حيث تراوحت قيمة جذر متوسط الخطأ التربيعي RMSE بين 10.618 و 17.749.[5]

5- تقدم هذه الدراسة محاولة جديدة لتقدير مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل حيث تمت دراسة عشرة عوامل (أي بعدد عوامل أكثر من المقدمة في الدراسات السابقة) أُعتقد أنها مؤثرة على المقاومة الفتلية وبنطاق تباين كبير في مجالات هذه البيانات.

5- تقنية الشبكات العصبونية الصنعية:

هي نظام معالجة للمعلومات له ميزات أداء معينة بأسلوب يحاكي الشبكات العصبونية البيولوجية الطبيعية. تتألف الشبكات العصبونية الصنعية من عدد كبير من عناصر المعالجة البسيطة تدعى عصبونات أو (وحدات – خلايا – عقد)، كل عصبون يرتبط مع العصبونات الأخرى بأداة ربط مباشرة، وكل أداة ربط ترفق برقم معين يدعى وزن مشبكي وهذه الأوزان تمثل المعلومات التي ستبدأ بها الشبكة حل المشكلة.

أهم ميزات الشبكات العصبونية الصنعية بأنها لا تبرمج ولكنها تقوم بالتعلم.

الشكل العام للشبكات العصبونية الصنعية:

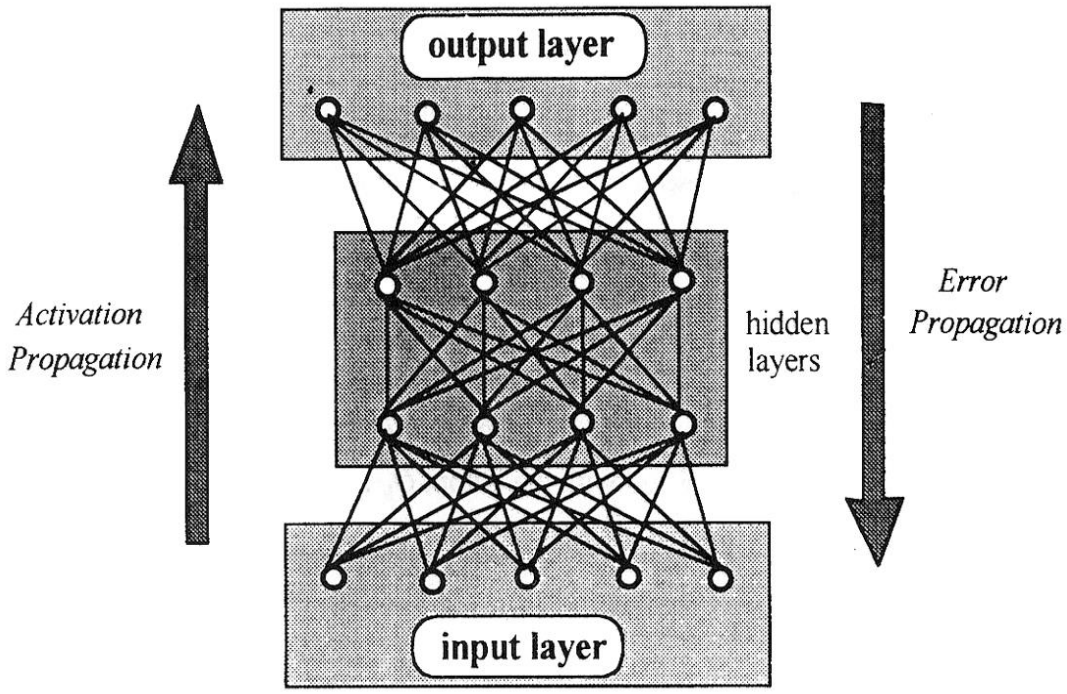
تتألف الشبكات العصبونية الصنعية من وحدات بسيطة تدعى العصبونات مع ارتباطات فيما بينها (الأوزان) هذه العصبونات موزعة في عدة طبقات هي:

طبقة الدخل: تحوي عدد من العصبونات مساو لعدد العناصر المدروسة في بحثنا (10) وهي لا تقوم بأية عملية معالجة فهي مكان تغذية الشبكة الصنعية بشعاع البيانات وهي التي تقوم بنقل المعلومات إلى الطبقة الخفية .

الطبقات الخفية: وهي التي تغذي طبقة الخرج وهي موجودة بين طبقة الدخل وطبقة الخرج ويختلف عددها وعدد العصبونات في كل طبقة بحسب نوع المسألة المدروسة، تقوم بعمليات المعالجة ويتم تحديد هذه الأعداد عن طريق التجريب والمحاولة والخطأ حتى الوصول إلى الشبكة العصبونية الصنعية المثلى التي تعطي أصغر قيمة للخطأ.

الشكل (1) الشكل العام للشبكات العصبونية الصنعية المستخدمة في الدراسة

طبقة الخرج: هي الطبقة النهائية وتحوي عدد من العصبونات مساو لعدد القيم التي نريد الحصول عليها وهي في بحثنا عصبون واحد (متمثل بمقاومة الجوائز البيتونية على الفتل) ، تستلم عصبوناتها الإشارات من الطبقة الخفية السابقة لتعالجها وتقوم بتطبيق تابع التفعيل الخاص بها على هذه القيم الداخلة لتعطي النتيجة النهائية للمسألة.



ويبين الشكل (1) شكل عام للشبكة العصبونية الصنعية متعددة الطبقات أمامية التغذية تستخدم مبدأ التراجع التدريجي للخطأ وهو نوع الشبكة المستخدم في دراستنا.

خوارزميات تدريب الشبكات العصبونية: من أشهر الخوارزميات خوارزمية الانتشار العكسي (التراجع التدريجي للخطأ) Back Propagation Algorithm التي تستخدم في تدريب الشبكات العصبونية كاملة الارتباط ذات التغذية الأمامية متعددة الطبقات وغير الخطية، ويتم تنفيذ هذه الخوارزمية من خلال مرحلتين أساسيتين هما: مرحلة الانتشار الأمامي ومرحلة الانتشار العكسي.

توابع التفعيل: يجب أن يمتلك تابع التفعيل الخواص التالية:

1- أن يكون تابعاً مستمراً وقابلاً للاشتقاق ومشتقه سهل الحساب.

2- أن يكون انسيابياً غير متناقص.

استخدمنا في هذه الدراسة تابع التفعيل Sigmoid.

6- بناء الشبكة العصبونية الصنعية المثلى :

العوامل المؤثرة على مقاومة البيتون على الفتل المأخوذة في الدراسة :

تم دراسة أثر عشرة عوامل تؤثر على مقاومة الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل وتدريب وتطوير الشبكة العصبونية الصنعية بالاستعانة ببيانات (143) جائز بيتوني مسلح مختبر سابقا على الفتل من أبحاث مختلفة (الملحق الأول) .

يبين الجدول [1] نطاق البيانات المستخدمة في تطوير الشبكة العصبونية الصنعية.

العوامل المدروسة	نطاق البيانات
F`c (Mpa)	14.3-109.8
H (cm)	15-80.6
B (cm)	14-120
X(cm)	9.4-78.6

Y(cm)	12-115
At/S (cm2/cm)	0.015-0.0239
Fy (Mpa)	308.8-689.7
F`y (Mpa)	285-672
μ%=Al/(H*B)	0.003-0.035
μ'%=At*u/s*(H*B)	0.001-5.387

الجدول [1]: نطاق البيانات المستخدمة في تطوير الشبكة العصبونية الصنعية

حيث أن :

1- المقاومة المميزة للبيتون على الضغط (Mpa) F'c.

2 - ارتفاع المقطع العرضي (cm) H.

3- عرض المقطع العرضي للجائز (cm) B.

4- عرض مقطع البيتون المحجوز بالاسوارة (عرض اسوارة التسليح العرضي) (cm)X.

5- ارتفاع مقطع البيتون المحجوز بالاسوارة (ارتفاع اسوارة التسليح العرضي) (cm)Y.

6- النسبة بين مساحة فرع واحد من اسوارة التسليح العرضي إلى التباعد بين أساور التسليح العرضي At/S (cm^2/cm).

7- إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح الطولي(Mpa) Fy.

8- إجهاد الخضوع لفولاذ التسليح العرضي (Mpa) F'y.

9- نسبة التسليح الفولاذي الطولي في الجائز μ وتساوي مساحة التسليح الطولي Al مقسومة على مساحة المقطع العرضي (H*B) .

10- نسبة التسليح الفولاذي العرضي في الجائز 'μ وتساوي مساحة فرع واحد من اسوارة التسليح العرضي At مضروبة بمحيط (طول الاسوارة u) مقسومة على (المسافة بين الاساور S مضروبة بمساحة المقطع العرضي للجائز(H*B)).

معمارية الشبكة العصبونية الصنعية:

لتحديد معمارية الشبكة نعتمد مبدأ التجريب أي المحاولة والخطأ للحصول على أصغر خطأ ممكن وذلك بتغيير عدد الطبقات الخفية، وعدد العصبونات ضمن كل طبقة خفية، تابع التفعيل الخاص بكل طبقة، معدل التعلم تجريبياً.

تتألف شبكتنا العصبونية من :

طبقة الدخل :تحوي عصبونات مساوية للعوامل المدروسة (10) عصبونات .

طبقة الخرج : تحوي عدد عصبونات مساو للقيم المطلوب الحصول عليها (1) وهي مقاومة الجائز البيتوني على الفتل متمثلة بعزم الفتل الحدي T (KN.m).

الطبقة الخفية : نجهل مبدئياً عدد هذه الطبقات وعدد العصبونات داخل كل طبقة ومعدل التعلم لكل طبقة وتابع التفعيل لكل من هذه الطبقات ولكننا سنقوم بتحديد هذه العوامل كافة عن طريق التجريب، حيث سيتم استخدام طبقة خفية واحدة كمرحلة أولى ثم سنغير عدد العصبونات في الطبقة الخفية الأولى من 8 إلى 38 عصبون وفي كل مرة يتم تغيير معدل التعلم من 1−0 بخطوة 0.1. ثم تم زيادة عدد الطبقات الخفية إلى طبقتين وثم تغيير عدد العصبونات في الطبقة الخفية الثانية من 10 إلى 30 وأيضاً بتغيير معدل التعلم في كل مرة من 1−0 بخطوة 0.1. وقد استخدم في التدريب شبكة عصبونية صنعية متعددة الطبقات، أمامية التغذية، تعتمد كطريقة تدريب التدريب المراقب، وكخوارزمية تدريب خوارزمية التدريج التراجعي (الانتشار الخلفي) في حساب الخطأ وتوزيعه مع اختيار تابع Sigmoid تابع تفعيل لكل طبقات المعالجة ونأخذ القيم الناتجة لمعدل الخطأ كأساس للمقارنة بين الحالات التصميمية المقترحة للشبكة لاختيار الحل الأمثل الذي يوافق الخطأ الأصغري RMSE وهو جذر متوسط الخطأ التربيعي الذي يعطى بالعلاقة:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(O_{ij} - P_{ij}\right)^2}{n}} \qquad (1)$$

حيث أن:

n :عدد الإدخالات.

m : عدد مركبات شعاع الخرج .

Oij : الخرج الناتج للعصبون j الذي أنتجته الشبكة .

Pij : الخرج الحقيقي للعصبون j الموافق لشعاع الدخل المقدم للشبكة من أجل كل عينة من عينات التدريب.

بعد التجريب والتدريب المستمر ومقارنة النتائج تبين أن هيكلية الشبكة العصبونية المثلى والتي أعطت خطأ أصغري تتألف من:

طبقة دخل: تحوي 10 عصبونات .

طبقة خفية: واحدة تحوي 8 عصبونات ، معدل التعلم لها 0.8، تابع التفعيل Sigmoid.

طبقة خرج : تحوي عصبون واحد هو مقاومة الجائز البيتوني المسلح طولياً وعرضياً على الفتل ، معدل التعلم لها 0.8، تابع التفعيل Sigmoid .

هذه الشبكة أعطت جذر متوسط للخطأ التربيعي RMSE= 0.02 =2% أي خطأ تربيعي أصغري قيمته=0.0004= 0.04%.

اختبار الشبكة العصبونية المثلى:

بعد تحديد بنية الشبكة العصبونية المثلى لدراستنا الموافقة للخطأ الأصغري، تم القيام بعملية التحقق من الشبكة عن طريق تزويدها ببيانات خمسة عشر جائزاً بيتونياً جديداً لم تتدرب الشبكة عليها من قبل(الملحق الثاني)، أعطت الشبكة كما هو مبين بالجدول (2) قيماً لمقاومة هذه الجوائز البيتونية المسلحة على الفتل ثم تمت مقارنة القيم الحقيقية مع النتائج المحسوبة من الشبكة وبعد ذلك تم حساب قيمة الخطأ النسبي بين قيم مقاومة البيتون على الفتل الناتجة عن كسر العينات مقابل نظيراتها التي قامت الشبكة بتحديدها حيث أن:

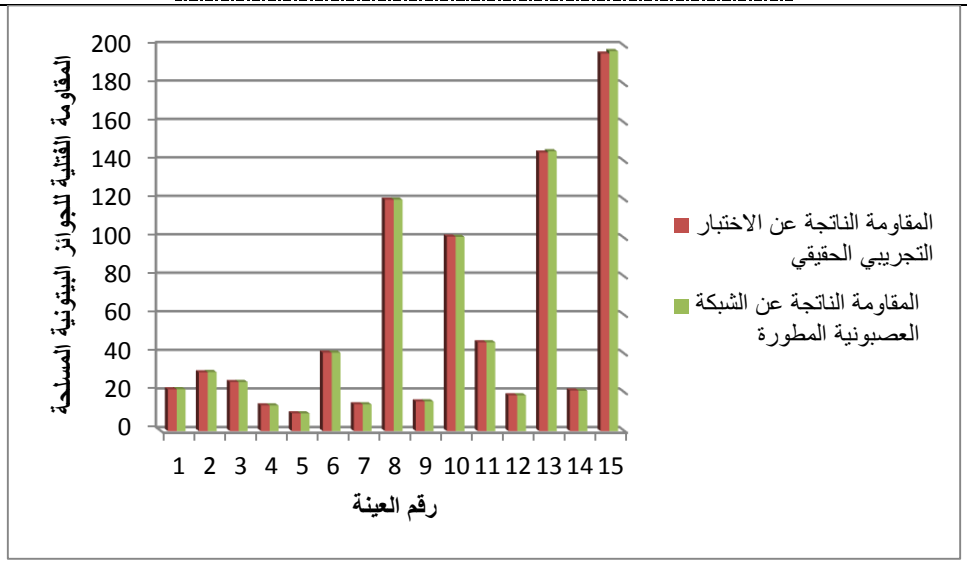
الخطأ النسبي=(المقاومة الناتجة عن اختبار الشبكة–المقاومة الحقيقية)/المقاومة الحقيقية.

رقم الخلطة البيتونية	المقاومة الفتلية للجائز البيتوني المسلح الناتجة عن الاختبار الحقيقي Texe (KN.m)	المقاومة الفتلية للجائز البيتوني المسلح الناتجة عن اختبار الشبكة TANN (KN.m)	الخطأ النسبي %
1	21.56	21.65	0.42
2	30.37	30.52	0.51

0.35	25.38	25.29	3
0.076	13.2	13.21	4
0.31	9.12	9.09	5
0.025	40.54	40.53	6
0.072	13.79	13.8	7
0.033	120.04	120	8
0.196	15.32	15.29	9
0.149	100.65	100.8	10
0.044	45.92	45.9	11
0.108	18.44	18.46	12
0.48	145.2	144.5	13
0.76	20.8	20.96	14
0.66	197.3	196	15

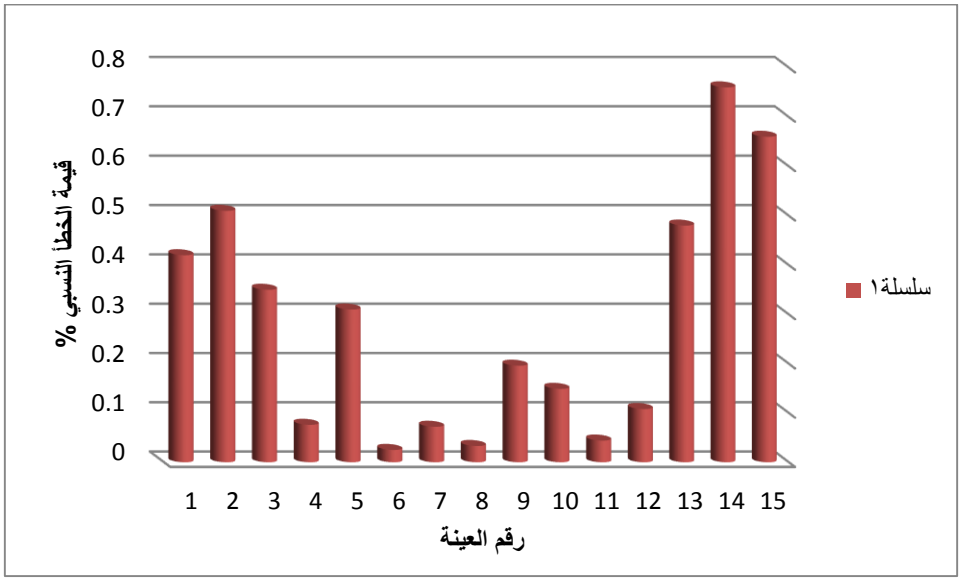
الجدول (2) : قيم مقاومة الفتل للجوائز البيتونية المسلحة طولياً وعرضياً المحسوبة من الشبكة المطورة مقابل نظيراتها من الاختبار التجريبي الحقيقي وقيم الخطأ النسبي.

ويبين الشكل (2) المخطط البياني لكل من القيم الحقيقية والقيم الناتجة عن اختبار الشبكة الذي نلاحظ فيه مدى التقارب الكبير بين تلك القيم لدرجة يكاد يكون متطابقاً عند بعض العينات .



الشكل (2) المقاومة الحقيقية والمقاومة الناتجة عن الشبكة

كما يبين الشكل (3) المخطط البياني للخطأ النسبي الذي نلاحظ فيه أن أكبر قيمة للخطأ النسبي هي 0.76% وأصغر قيمة لهذا الخطأ 0.025% ، أي بمتوسط للخطأ النسبي لكل العينات المختبرة بقيمة 0.28% مما يدل على فعالية الشبكة العصبونية المطورة في هذا البحث بحساب المقاومة الفتلية للجوائز البيتونية المسلحة المتمثلة بعزم الفتل الحدي .



الشكل (3) الخطأ النسبي% للمقاومة الحقيقية والمقاومة الناتجة عن الشبكة

الخلاصة والنتائج:

1- الصيغة النهائية للشبكة العصبونية الصنعية التي تم بناءها وتصميمها في هذه الدراسة تتألف من طبقة دخل تحوي 10 عصبونات ومن طبقة مخفية واحدة تحوي ثمانية عصبونات ،معدل التعلم لها 0.8 ، تابع التفعيل Sigmoid ، ومن طبقة خرج تحوي عصبون واحد ، معدل التعلم لها 0.8 وأيضاً تابع التفعيل Sigmoid .

2- أثبتت الشبكة العصبونية المطورة في هذه الدراسة فعاليتها في التنبؤ بالمقاومة الفتلية لجوائز البيتون المسلحة طولياً وعرضياً، وكان جذر متوسط الخطأ التربيعي للعينات المدربة RMSE = 0.02 أي MSE=0.0004.

3- تم مقارنة قيم المقاومة الفتلية للجوائز البيتونية المسلحة طولياً وعرضياً الناتجة عن كسر الجوائز مع نظيراتها التي قامت الشبكة العصبونية الصنعية المثلى المطورة في هذه الدراسة بتقديرها للعينات المختبرة فكان متوسط الخطأ النسبي لعينات الاختبار 0.28%.

التوصيات:

1- اعتمد هذا البحث على بيانات (158) جائز بيتوني مسلح (143) للتدريب و(15) للاختبار نوصي بإجراء تجارب مخبرية أكثر واستخدام عدد أكبر من البيانات.

2- نوصي بدراسة أثر القطر الأعظمي للحصويات كعامل إضافي للعوامل المأخوذة في هذه الدراسة.

3- استخدام لغة برمجة لوضع الشبكة العصبونية المطورة بهذا البحث كبرنامج مستقل يعطي قيمة المقاومة الفتلية المتوقعة عند إدخال بيانات العوامل العشر المأخوذة بعين الاعتبار.

¤¤¤¤¤¤¤¤

المراجع

[1] A. A. Abdul-Razzak and S. T. Yousif, "Predicting Nonlinear Response of Uniformly Loaded Fixed Plates." Eng. & Technology,Vol.25, No.3, 2007.

[2] Ahmed Faleh Al-Bayati "Torsion Strength Prediction of Reinforced Concrete Beams "International Review of Civil Engineering, Vol. 14, N.2, 2023.

[3] California scietific, "Designing Neural Networks With Brain Maker". sales@calsci.com.800-284-8112.916-372-6800.

[4] C.E.Chalioris "Behaviour model and experimental study for the torsion of reinforced concrete members" WIT Transactions on The Built Environment, Vol 85,2006.

[5] Diana S. O. Bernardo, Luis F.A.Bernardo, Hamza Imran, and Tiago P. Ribeiro" Torsional Capacity Prediction of Reinforced Concrete Beams Using Machine Learning Techniques Based on Ensembles of Trees" Applied Sciences,13,1385,2023.

[6] Flood.I, Kasrtam.N , "NEURAL NETWORKS IN CIVIL ENGINEERING ; PRINCIPLES AND UNDERSTANDING" ,Computing of Civil Engineering ,vol.8, No.2 , April.1994.

[7] Freeman,J.A , Skapura,D.M ," Neural Networks, Algorithms, Applications, and Programming Techniques" ,Addition-Wesley Publishing company, 1991.

[8] Luis F.A.Bernardo, Catia s.b. Taborda, and Jorge M. A. Andrade "Generalized Softened Variable Angle Truss Model for PC Beams under Torsion" International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018

[9] Luis F.A.Bernardo, Mafalda M. Teixeira, Dario De Domenico and Jorge M. R. Gama "Improved Equations for the Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams for Codes of Practice Based on the Space Truss Analogy" Materials,15,3827, 2022.

[10] M.H. Ilkhani, H.Naderpour, A.Kheyroddin "A Proposed novel approach for torsional strength prediction of RC beams" Journal of Building Engineering, 25, 2019.

[11] M.Y.Mansour, M.Dicleli, J.Y.Lee, J.Zhang, "predicting the shear strength of reinforced concrete beams using artificial neural networks", Engineering Structure , pp :781-799 , 2004.

[12] Mohammad Rashidi and Hana Takhtfiroozeh "The Evaluation of Torsional Strength in Reinforced Concrete Beam" Mechanics, Materials Science & Engineering Journal, ISSN 2412-5954, 2016.

[13] Simulated Biological Intelligence " Brain Maker Professional " , California Scientific.

[14] Yongchang Pu , Mesbhi, E. " Application of Artificial Neural Networks to Evaluation of Ultimate Strength of Steel Panels ", Engineering Structure, 28 , pp : 1190-1196, 2006.

[15] دارين السلامة ، تحديد مقاومة البيتون على الضغط اعتماداً على الشبكات العصبونية الصنعية، رسالة ماجستير في الهندسة الإنشائية، 2010.

¤¤¤¤¤¤¤¤¤

الملحق الأول : عينات تدريب الشبكة العصبونية الصنعية

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	µ %	µ1 %	Tr (Kn.m)
1	27.6	25.4	38.1	21.6	34.3	0.0468	314	341	0.0052	0.0054	22.3

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
2	28.1	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1016	327.6	320	0.0117	0.0117	37.48
3	29.2	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1401	320	323.4	0.0160	0.0162	47.3
4	30.6	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1847	332.4	321.4	0.0211	0.0213	56.11
5	28.8	25.4	38.1	21.6	34.3	0.2258	331.7	322.8	0.0267	0.0261	61.64
6	26	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1016	320	318.6	0.0053	0.0117	26.87
7	26.8	25.4	38.1	21.6	34.3	0.2258	322.1	320	0.0053	0.0261	32.51
8	28.8	25.4	38.1	21.6	34.3	0.0466	319.3	342.8	0.0117	0.0054	29.8
9	26.5	25.4	38.1	21.6	34.3	0.0466	334	342	0.0267	0.0054	34.4
10	26.5	25.4	25.4	21.6	21.6	0.0607	334	345	0.0079	0.0081	15.3
11	27.2	25.4	25.4	21.6	21.6	0.1767	328.3	329	0.0240	0.0237	29.69
12	27.6	25.4	25.4	21.6	21.6	0.2391	315.9	327.6	0.0316	0.0320	34.21

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
13	30.9	25.4	50.8	21.6	47	0.0591	323	334	0.0062	0.0063	40.3
14	26.8	25.4	50.8	21.6	47	0.0829	338.6	327.6	0.0088	0.0088	49.56
15	28.3	25.4	50.8	21.6	47	0.1129	325.5	321.4	0.0120	0.0120	64.8
16	26.9	25.4	50.8	21.6	47	0.1505	331	327.6	0.0158	0.0160	71.91
17	29.9	25.4	50.8	21.6	47	0.0561	334	350	0.0059	0.0060	39.1
18	31	25.4	50.8	21.6	47	0.0884	319.3	322.8	0.0093	0.0094	52.61
19	28.3	25.4	50.8	21.6	34.3	0.1232	322.1	329	0.0132	0.0107	73.38
20	45.2	25.4	38.1	21.6	34.3	0.0725	325	349	0.0082	0.0084	36
21	44.8	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1016	343.4	333.8	0.0117	0.0117	45.61
22	45	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1401	315.2	326.2	0.0160	0.0162	58.02
23	45	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1847	310.3	325.5	0.0211	0.0213	70.67

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
24	45.8	25.4	38.1	21.6	34.3	0.2258	325.5	329	0.0267	0.0261	76.65
25	14.3	25.4	38.1	21.6	34.3	0.0466	327.6	346.2	0.0053	0.0054	21.45
26	14.6	25.4	38.1	21.6	34.3	0.0721	320	340.7	0.0083	0.0083	29.13
27	16.9	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1016	388.6	337.2	0.0117	0.0117	35.22
28	16.8	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1401	324.1	331.7	0.0160	0.0162	40.64
29	30.6	15.2	49.5	11.4	45.7	0.0677	335.9	337.9	0.0103	0.0103	23.71
30	29	15.2	49.5	11.4	45.7	0.1042	315.9	320.7	0.0159	0.0158	28.45
31	28.6	15.2	49.5	11.4	45.7	0.1505	344.1	340	0.0226	0.0228	35
32	29.9	25.4	38.1	21.6	34.3	0.0476	326.2	353.1	0.0083	0.0055	30.37
33	26.8	25.4	38.1	21.6	34.3	0.0924	322.1	326.2	0.0160	0.0107	43.8
34	26.6	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1233	318.6	326.9	0.0211	0.0142	49.56

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
35	28	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1563	335.2	331	0.0267	0.0181	55.65
36	29.4	25.4	38.1	21.6	34.3	0.1563	317.9	340.7	0.0316	0.0181	60.06
37	28.7	15.2	30.5	13	28.3	0.0350	346.2	344.8	0.0061	0.0062	8.99
38	30.4	15.2	30.5	13	28.3	0.0635	331	337.9	0.0111	0.0113	14.45
39	27.3	15.2	30.5	13	28.3	0.0508	351.7	351.7	0.0092	0.0091	12.19
40	27.3	15.2	30.5	13	28.3	0.0798	340.9	355.9	0.0142	0.0142	15.69
41	35.3	50	50	45.4	45.4	0.1028	356.7	356.7	0.0072	0.0075	138.6
42	26.4	44	24	42	22	0.0584	541.4	541.4	0.0066	0.0071	42.11
43	39.1	44	24	42	22	0.0584	541.4	541.4	0.0066	0.0071	46.4
44	49.8	44	24	42	22	0.0584	541.4	541.4	0.0066	0.0071	48.54
45	39.1	29.4	16	28	14.6	0.0363	442.4	568.9	0.0064	0.0066	13.89

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
46	36.1	44	24	42	22	0.0532	431.6	436.5	0.0063	0.0064	39.17
47	19	32.4	32.4	30.4	30.4	0.0288	557.1	557.1	0.0033	0.0033	21.11
48	17.6	58	18.6	56	16.6	0.0305	432.6	432.6	0.0040	0.0041	19.98
49	19.5	80.6	14	78.6	12	0.0282	441.4	441.4	0.0045	0.0045	21.9
50	19	44	24	42	22	0.0305	432.6	432.6	0.0035	0.0037	19.53
51	19.5	44	24	42	22	0.0455	432.6	432.6	0.0052	0.0055	28.56
52	19	44	24	42	22	0.0610	432.6	432.6	0.0069	0.0074	34.32
53	19	44	24	42	22	0.0580	570.9	570.9	0.0066	0.0070	33.3
54	19.5	44	24	42	22	0.0560	441.4	441.4	0.0032	0.0068	23.93
55	18.5	44	24	42	22	0.0418	441.4	441.4	0.0064	0.0051	31.04
56	18.5	44	24	42	22	0.0280	441.4	441.4	0.0064	0.0034	25.96

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
57	38.2	25.4	25.4	22.2	22.2	0.0782	380	285	0.0080	5.3871	22.58
58	39.4	25.4	25.4	21.9	21.9	0.0894	352.4	360	0.0124	0.0121	27.77
59	39.2	25.4	25.4	21.9	21.9	0.1242	351	360	0.0176	0.0169	34.43
60	36.3	17.8	35.6	14.6	32.4	0.0387	360	285	0.0045	0.0057	12.3
61	39.6	17.8	35.6	14.6	32.4	0.0719	380	285	0.0080	0.0107	20.8
62	38.6	17.8	35.6	14.3	32.1	0.0860	352.4	360	0.0126	0.0126	25.29
63	38.5	17.8	35.6	14.3	32.1	0.1176	351	360	0.0179	0.0172	31.72
64	41.7	16	27.5	12	23.5	0.0873	620	665	0.0351	0.0141	16.62
65	36.3	16	27.5	12	23.5	0.0873	605	672	0.0351	0.0141	15.25
66	61.8	16	27.5	12	23.5	0.0873	612	665	0.0351	0.0141	19.95
67	61.7	16	27.5	12	23.5	0.0873	612	665	0.0351	0.0141	19.13

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
68	77.3	16	27.5	12	23.5	0.0873	617	658	0.0351	0.0141	20.06
69	76.9	16	27.5	12	23.5	0.0873	614	656	0.0351	0.0141	20.74
70	109.8	16	27.5	12	23.5	0.0873	618	655	0.0351	0.0141	24.72
71	105	16	27.5	12	23.5	0.0873	634	660	0.0351	0.0141	23.62
72	105.1	16	27.5	12	23.5	0.0873	629	655	0.0351	0.0141	24.77
73	39.6	20.3	30.5	16.5	26.7	0.0656	386	373	0.0083	0.0092	19.4
74	64.6	20.3	30.5	16.5	26.7	0.0656	386	399	0.0083	0.0092	18.9
75	75	20.3	30.5	16.5	26.7	0.0656	386	373	0.0083	0.0092	21.1
76	80.6	20.3	30.5	16.5	26.7	0.0656	386	399	0.0083	0.0092	19.4
77	76.2	20.3	30.5	16.5	26.7	0.0695	386	386	0.0083	0.0097	18.4
78	72.9	20.3	30.5	16.5	26.7	0.0746	379.5	386	0.0106	0.0104	22.5

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
79	75.9	20.3	30.5	16.5	26.7	0.0788	373	386	0.0125	0.0110	23.7
80	76.7	20.3	30.5	16.5	26.7	0.1013	380	386	0.0129	0.0141	24
81	93.9	20.3	30.5	16.5	26.7	0.0656	386	386	0.0083	0.0092	21
82	78.5	35	50	30	45	0.0713	440	440	0.0068	0.0061	92
83	78.5	35	50	30	45	0.0710	410	440	0.0118	0.0061	115.1
84	68.4	35	50	30	45	0.0789	500	420	0.0097	0.0068	126.7
85	78.5	35	50	30	45	0.1419	410	440	0.0118	0.0122	155.3
86	68.4	35	50	30	45	0.1613	500	360	0.0097	0.0138	135
87	78.5	35	50	30	45	0.2346	560	440	0.0195	0.0201	239
88	35.5	35	50	30	45	0.0710	440	440	0.0069	0.0061	79.7
89	35.5	35	50	30	45	0.0710	410	440	0.0118	0.0061	95.2

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
90	33.5	35	50	30	45	0.0789	500	420	0.0097	0.0068	111.7
91	33.5	35	50	30	45	0.0789	500	420	0.0162	0.0068	117.3
92	35.5	35	50	30	45	0.1419	410	440	0.0118	0.0122	116.8
93	35.5	35	50	30	45	0.1419	520	440	0.0162	0.0122	138
94	33.5	35	50	30	45	0.1613	500	360	0.0097	0.0138	125
95	35.5	35	50	30	45	0.2346	560	440	0.0195	0.0201	158
96	76	42	42	37	37	0.0594	396	385	0.0051	0.0050	84.9
97	48	42	42	37	37	0.0419	394	385	0.0061	0.0035	74.7
98	78	42	42	37	37	0.0594	400	385	0.0090	0.0050	104.2
99	35	35	50	30	45	0.0509	400	385	0.0043	0.0044	60.6
100	67	35	50	30	45	0.0202	505	600	0.0074	0.0017	62.2

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
101	67	35	50	30	45	0.0149	493	600	0.0082	0.0013	56.3
102	35	35	50	30	45	0.0149	493	600	0.0082	0.0013	52.9
103	67	35	50	30	45	0.0713	402	385	0.0060	0.0061	93.7
104	76	25	70	20	65	0.0509	396	385	0.0052	0.0049	73.54
105	78	25	70	20	65	0.0509	400	385	0.0091	0.0049	95.86
106	43.2	30	35	26	31	0.0548	410	370	0.0048	0.0059	32.9
107	41.7	30	35	26	31	0.1097	410	370	0.0097	0.0119	54.1
108	42.6	30	35	26	31	0.1689	510	355	0.0114	0.0183	62.4
109	41.7	30	35	26	31	0.0548	510	370	0.0076	0.0059	38.1
110	42.7	30	35	26	31	0.0810	510	370	0.0114	0.0088	50.2
111	42.6	30	35	26	31	0.0951	512.4	370	0.0133	0.0103	56.4

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
112	44.2	15	120	10	115	0.0393	480	459	0.0126	0.0055	74
113	29.5	15	100	10	95	0.0393	499	459	0.0121	0.0055	50.7
114	44.2	15	100	9.8	94.8	0.0754	480	480	0.0121	0.0105	68
115	29.5	15	100	9.8	94.8	0.1131	499	499	0.0121	0.0158	74.3
116	33.8	15	100	9.4	94.4	0.1608	497	497	0.0214	0.0223	80.5
117	29.5	15	80	10.2	75.2	0.0402	459	433	0.0118	0.0057	40.4
118	29.5	15	80	9.8	74.8	0.1131	459	499	0.0118	0.0159	60.1
119	73.7	30	40	27	37	0.0713	452	484	0.0258	0.0076	86.8
120	73.7	30	40	27	37	0.0648	499	538	0.0258	0.0069	88
121	73.7	30	40	27	37	0.0648	630	538	0.0258	0.0069	89.4
122	84.7	30	40	27	37	0.0713	456	484	0.0143	0.0076	76.3

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
123	84.7	30	40	27	37	0.0648	529	538	0.0099	0.0069	74.5
124	84.7	30	40	27	37	0.0648	627	538	0.0099	0.0069	70
125	83.1	30	40	27	37	0.0713	474	484	0.0063	0.0076	74.2
126	83.1	30	40	27	37	0.0648	522	538	0.0063	0.0069	67.7
127	83.1	30	40	27	37	0.0648	627	538	0.0066	0.0069	69.9
128	29.3	35	50	30	45	0.0396	489.8	467.5	0.0043	0.0034	55
129	29.3	35	50	30	45	0.0396	500.4	467.5	0.0098	0.0034	57
130	40.3	35	50	30	45	0.0396	500.4	467.5	0.0098	0.0034	58.3
131	40.3	35	50	30	45	0.1057	489.8	489.8	0.0098	0.0091	98.4
132	39.4	20	30	16.8	26.8	0.0628	689.7	534.1	0.0075	0.0091	19.7
133	60.8	20	30	13.8	23.8	0.0628	689.7	534.1	0.0075	0.0079	12.5

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
134	60.8	20	30	16.8	26.8	0.0628	689.7	534.1	0.0075	0.0091	19.9
135	35.4	40	60	31	51	0.1097	313.3	334.9	0.0075	0.0075	123
136	35.4	40	60	31	51	0.0792	474.6	485.8	0.0055	0.0054	124
137	35.4	40	60	31	51	0.0582	569.6	595.9	0.0044	0.0040	89
138	35.4	40	60	31	51	0.1358	320.5	334	0.0093	0.0093	126
139	35.4	40	60	31	51	0.0983	467.6	485.1	0.0069	0.0067	109
140	35.4	40	60	31	51	0.0713	567.6	595.2	0.0054	0.0049	108
141	35.4	40	60	31	51	0.0792	319.4	334.3	0.0055	0.0054	101
142	35.4	40	60	31	51	0.0792	569.6	594.8	0.0060	0.0054	106
143	35.4	40	60	31	51	0.0983	308.8	334.8	0.0069	0.0067	106

الملحق الثاني: عينات الاختبار للشبكة العصبونية الصنعية المطورة في هذا البحث

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
1	17.6	44	24	42	22	0.0290	570.9	570.9	0.0033	0.0035	21.56
2	19.5	44	24	42	22	0.0560	441.4	441.4	0.0048	0.0068	30.37
3	27.2	25.4	25.4	21.6	21.6	0.1311	336.6	327.6	0.0176	0.0176	25.29
4	28.4	15.2	30.5	13	28.3	0.0621	333.1	360.7	0.0035	0.0111	13.21
5	29.5	15.2	30.5	13	28.3	0.0350	352.4	341.4	0.0061	0.0062	9.09
6	30.6	25.4	38.1	21.6	34.3	0.0677	329	357.2	0.0117	0.0078	40.53
7	35.4	20	30	13.8	23.8	0.0628	689.7	534.1	0.0075	0.0079	13.8
8	35.4	40	60	31	51	0.0983	565.1	595.2	0.0075	0.0067	120
9	38.2	16	27.5	12	23.5	0.0873	638	669	0.0351	0.0141	15.29
10	40	58.7	32	56.1	29.4	0.0714	461	442.4	0.0068	0.0065	100.8
11	44	30	35	26	31	0.0839	410	370	0.0072	0.0091	45.9

No	Fc (Mpa)	H (cm)	B (cm)	X (cm)	Y (cm)	At/s	Fyl (Mpa)	Fyt (Mpa)	μ %	μ1 %	Tr (Kn.m)
12	57.1	16	27.5	12	23.5	0.0873	614	665	0.0351	0.0141	18.46
13	68.4	35	50	30	45	0.0789	500	420	0.0162	0.0068	144.5
14	76.2	16	27.5	12	23.5	0.0873	617	663	0.0351	0.0141	20.96
15	78.5	35	50	30	45	0.1419	520	440	0.0162	0.0122	196

تحديد السوية البيئية في المشاريع الهندسية

م.يمان البريجاوي – باحث

الملخص: تعد السوية البيئية أحد المفاهيم الحيوية التي تهتم بتصميم وتخطيط المباني والبنية التحتية بطرق تساهم في الحفاظ على البيئة وتقليل الأثر البيئي السلبي.

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نموذج كمي لتقييم السوية البيئية للمشاريع الهندسية بما يسهم في اتخاذ قرار يحقق التوازن بين متطلبات التنمية والحفاظ على البيئة، حيث واجهت عملية التقييم البيئي التقليدية تحديات ناتجة عن طبيعة المعايير البيئية المتعددة والمتداخلة ولمعالجة هذه المشكلة ، اعتمد البحث على المنطق الضبابي Fuzzy Logic لبناء نموذج تقييم قادر على تحويل البيانات الوصفية والنوعية إلى قيم كمية. تم تحديد ثمانية معايير بيئية رئيسية للتقييم، وهي: تلوث الهواء، تلوث التربة، التلوث بالضجيج، التلوث بالارتجاج، تلوث الغطاء النباتي، تلوث المياه الجوفية، التأثير على جريان المياه السطحية، والتلوث بالوحل. تم ترجيح هذه المعايير وفق ثلاثة مستويات من الأهمية (3، 2، 1) بناءً على استبيان. طُبّق النموذج المقترح باستخدام برنامج MATLAB على دراسة حالة حقيقية لمشروع مدرسة في مدينة حمص، ويشكل النموذج المطور أداة فعالة وموضوعية للمهندسين والمخططين في تقييم واختيار البدائل التصميمية الأكثر استدامة، ويوصى باعتماد نتائجه كمعيار كمي إلزامي في إجراءات منح التراخيص البيئية.

الكلمات المفتاحية:

السوية البيئية، المنطق الضبابي، تقييم الأثر البيئي، المشروع الهندسي

The Environmental Quality Determination in Engineering Projects

Abstract: Environmental quality is a vital concept concerned with designing and planning buildings and infrastructure in ways that contribute to environmental conservation and reduce negative environmental impacts. This study aims to develop a quantitative model for assessing the environmental quality of engineering projects, thereby aiding decision-making processes that balance development requirements with environmental preservation. Traditional environmental assessment processes face challenges due to the multiple and interrelated nature of environmental criteria. To address this issue, the research employed Fuzzy Logic to construct an evaluation model capable of converting descriptive and qualitative data into quantitative values. Eight main environmental criteria were identified for assessment: air pollution, soil pollution, noise pollution, vibration pollution, vegetation cover pollution, groundwater pollution, impact on surface water runoff, and silt pollution. These criteria were weighted according to three levels of importance (weights of 3, 2, and 1) based on a questionnaire survey. The proposed model was applied using MATLAB to a real-world case study of a school project in Homs. The research concludes that the developed model serves as an effective and objective tool for engineers and planners to evaluate and select more sustainable design alternatives. It recommends adopting its results as a mandatory quantitative criterion in environmental licensing procedures.

Keywords

Environmental Quality, Fuzzy logic, environment, pollution, project

1- المقدمة:

السوية البيئية هي حالة يتم فيها الحفاظ على التوازن بين النظام البيئي والأنشطة البشرية. وتشمل هذه الحالة الحفاظ على التوازن بين الطلب على الموارد الطبيعية وقدرتها على التجديد، وتقليل الآثار السلبية للأنشطة البشرية على البيئة. في مجال الهندسة، تُعرَّف السوية البيئية بأنها نهج يدمج الاعتبارات البيئية في تصميم المشاريع وتنفيذها، بهدف الحد من الآثار السلبية وتعزيز الإيجابية. وتمثل عملية تحديد هذه السوية إجراءً تحليلياً منهجياً يهدف إلى رصد وتقدير التأثيرات البيئية المحتملة للمشروع، واقتراح تدابير للتحسين والتخفيف. ويشمل هذا الإجراء جمع البيانات، وتحليل البدائل، وصياغة تقرير تقييم الأثر البيئي[1] .

تواجه عملية التقييم [2] مشكلة جوهرية تتمثل في التناقض بين معايير القرار المختلفة وغالبًا ما يتعارض الحل الأمثل بيئيًا مع المعايير الاقتصادية، كما قد تتعارض متطلبات راحة المجتمع أثناء التنفيذ مع كفاءة المشروع أو الجدوى المالية، وهذا يضع صانع القرار أمام تحدٍّ حقيقي في المفاضلة بين الحلول . لذلك، تبرز الحاجة إلى تطوير منهجية تقييم متكاملة تتيح مقارنة الحلول المقترحة ، واختيار البديل الذي يحقق أعلى درجة مقبولة من التوازن بين المتطلبات البيئية والاقتصادية ، وهو ما يسعى هذا البحث إلى معالجته من خلال تطوير نموذج كمي يعتمد على المنطق الضبابي.

2- الهدف من البحث:

يهدف هذا البحث إلى تحديد السوية البيئية للمشروع الهندسي على الوسط المحيط ودراسة المعايير الأكثر تأثيراً على اختيار التصميم الأفضل للمشروع الهندسي من وجهة نظر الجودة البيئية ، والتي تهدف بشكل عام إلى تحسين قطاع التشييد بأقل ضرر للبيئة المحيطة وبأعلى فائدة إيجابية على السكان والوسط المحيط.

3- أهمية البحث:

يتمتع هذا البحث بأهمية بالغة نظراً للارتباط الوثيق بين المشاريع الإنشائية وحياة الإنسان، حيث يُعد قطاع التشييد من أهم ركائز التطوير العمراني والحضاري. ويُشكّل النهوض بهذا القطاع مع الحفاظ على البيئة أحد أبرز التحديات التي تواجه المخططين و يُعد الحفاظ على البيئة عاملاً لا يقل أهمية عن الحاجة البشرية المستمرة للبناء والتطوير .

وبهدف تطوير نموذج تقييم بيئي ، شمل مجتمع البحث المشاريع الهندسية الإنشائية إضافةً إلى خبراء ومتخصصي القطاع من مهندسين ومخططين بيئيين. وقد تمثلت عينة الدراسة في مشروع محدد كحالة دراسية هو "مدرسة الكندي" في حمص، بينما اعتمد ترجيح المعايير البيئية على مجموعة من الخبراء شاركوا في استبيان خاص لتحديد الأوزان النسبية لتلك المعايير وفق مستويات أهميتها .

4- مواد البحث : اعتمد البحث على ثلاث مواد رئيسية:

الدراسات المرجعية: تحليل الأبحاث السابقة في السوية البيئية والمنطق الضبابي.

معطيات المشاريع الهندسية: بيانات فعلية من مشاريع إنشائية(المدارس حالة دراسية)، جمعت من خلال مديرية التربية حيث تم دراسة ثلاثة مدارس وكذلك استبيان خاص لتحديد أوزان المعايير البيئية.

دراسة حالة واقعية: تطبيق النموذج المقترح على مشروع "مدرسة الكندي" في حمص لاختبار فعاليته.

4-1 الدراسات المرجعية:

1- قام الباحث [Adnan Enshassi, B. K. (2014)][5] بتقييم الآثار البيئية الناجمة عن أنشطة مشاريع البناء في قطاع غزة. يمتاز هذا البحث بتحديد ودراسة التأثيرات البيئية الأكثر شيوعاً لمشاريع البناء في قطاع غزة

كانت النتيجة أن مولدات الغبار ، الملوثات بالضجيج ، عمليات إزالة الغطاء النباتي ، وملوثات الهواء من أهم الآثار البيئية لمشاريع البناء ، واحتل تلوث الغبار المرتبة الأولى في الملوثات والتلوث بالضجيج في المرتبة الثانية وتلوث الغطاء النباتي في المرتبة الثالثة .

2- أجرى الباحث [Vahid Faramarzi, A. S. (Vol. 40, No. 4, Winter 2015)][6] دراسة اعتمدت على المنطق الضبابي كمنهج لدعم القرار في تقييم الأثر البيئي. يتم تقييم القواعد المعرفية باستخدام قواعد المنطق الضبابي لقياس التأثيرات البيئية. تم الأخذ بعين الاعتبار عشر مؤشرات رئيسية وثمان وعشرون مؤشراً فرعياً في إطار التقييم باستخدام نظام السكك الحديدية العالية الجودة في تايوان. وفي النهاية تم تطوير إطار دعم القرار آخذاً بعين الاعتبار الهواء والماء والتربة والضجيج والنفايات

الصلبة والاقتصاد والمجتمع والثقافة لتقييم الأثر البيئي لمشاريع الأبنية، أي قدم إطارًا شاملاً ومتكاملًا لتحديد معايير السوية البيئية للسكك الحديدية.

3- قام الباحثون [(Varshosaz, K. (2011)] [7] بدراسة تقييم الأثر البيئي لبحيرة تقع في طهران اعتماداً على عدد من العوامل والآثار المتبادلة فيما بينها وعلى اعتبار هذه العوامل ليست ثابتة تم إعداد النمذجة لدراسة تقييم الأثر البيئي مع الأخذ بعين الاعتبار العلاقة الديناميكية بين هذه العوامل. تم اعتماد طريقة تحليلية تستند إلى رأي الخبراء باعتبار أن تقييم الأثر البيئي يعتمد على عوامل ومتغيرات متنوعة مرتبطة فيما بينها ارتباطاً وثيقاً. تم دراسة العوامل المؤثرة باستخدام مصفوفة التأثير ثم دراستها باستخدام المنطق الضبابي. قدم هذا البحث منهجية كمية متطورة لقياس السوية البيئية كما حوّل التقييم من وصف عام إلى عملية تحليلية قابلة للقياس تراعي العلاقات المعقدة بين العوامل البيئية وتعطي نتائج أكثر دقة.

تُظهر هذه الأبحاث أن السوية البيئية هي نتاج عملية تقييم منهجية تستخدم أدوات كمية لقياس تأثيرات محددة، مما يؤدي إلى اتخاذ قرارات تصميمية تحقق التوازن المطلوب بين التنمية والحفاظ على البيئة ولكنها لا تعطي مقياس لتحديد هذه السوية بمعايير متوافقة مع متطلبات الانشاء في سوريا بينما يحدد هذا البحث المعايير البيئية الأساسية التي سيتم من خلالها تحديد السوية البيئية للمشروع بما يتوافق مع متطلبات الانشاء في سوريا وبالتالي اختيار أفضل المعايير للمشروع ليحقق أعلى سوية بيئية.

5- منهجية البحث:

اتبعت هذه الدراسة منهجية علمية متكاملة تجمع بين التحليل النظري والنمذجة الرياضية والتطبيق العملي، وذلك لتحقيق هدفها الرئيسي في تطوير إطار منهجي كمي لتقييم السوية البيئية للمشاريع الهندسية.

المرحلة الأولى :بدأ البحث بدراسة مفهوم السوية البيئية كمؤشر متكامل يعكس درجة التوازن بين متطلبات التنمية العمرانية وضرورات الحفاظ على سلامة النظم البيئية المحيطة. تمت مراجعة الأسس النظرية لتقييم الأثر البيئي (EIA) وتطبيقاته في قطاع التشييد والبناء. ثم تحليل الدراسات السابقة حيث تم فحص وتقييم عدد من الأبحاث التطبيقية السابقة التي تناولت قياس الآثار البيئية، مع التركيز

على تلك التي استخدمت منهجيات كمية متقدمة مثل المنطق الضبابي (Fuzzy Logic) [8]وطرق اتخاذ القرار متعدد المعايير(MCDM) .

المرحلة الثانية: تصميم النموذج لتحديد هيكل نظام التقييم حيث تم تطوير هيكل هرمي للتقييم يتكون من ثلاثة مستويات، المستوى الأول حيث يتم تحديد السوية البيئية الشاملة للمشروع (كنسبة مئوية) أما في المستوى الثاني تم تحديد ثمانية معايير بيئية جوهرية بناءً على المراجع وطبيعة المشاريع الهندسية في المنطقة المدروسة والمستوى الثالث تم تحويل كل معيار رئيسي إلى مجموعة من العوامل المدخلة القابلة للقياس أو التوصيف، مع ربطها بمرحلة المشروع المناسبة (تنفيذ، استثمار، هدم) ثم ترجيح المعايير نظراً لاختلاف الأهمية النسبية للمعايير، تم تطبيق نظام ترجيح هرمي:

أعلى وزن (3) للمعايير ذات الأثر طويل المدى أو صعوبة المعالجة (تلوث المياه الجوفية، تلوث الغطاء النباتي، التلوث بالارتجاج).

وزن متوسط (2) للمعايير ذات الانتشار الواسع والتأثير المباشر (تلوث الهواء، تلوث التربة).

وزن أساسي (1) للمعايير ذات الأثر الأكثر موضعية أو قابلية أكبر للتحكم (الضجيج، الوحل، جريان المياه السطحية).

الاستبيان: يوضح التالي جزء من الاستبيان الذي تم إجراؤه

اســـتبيان لتقييم القواعد المعرفية والمعايير البيئية المســـتخدمة في النموذج :حيث تم تحديد ثمانية معايير بيئية رئيسية في البحث هي:

تلوث الهواء،تلوث التربة،التلوث بالضجيج،التلوث بالارتجاج،تلوث الغطاء النباتي،تلوث المياه الجوفية، التأثير على جريان المياه السطحية، التلوث بالوحل

المقياس:

5 أوافق بشدة 4=أوافق 3=محايد 2=لا أوافق 1 =لا أوافق بشدة

كما هو كوضح في الجدول (1)

الرقم	السؤال	1	2	3	4	5

1	المعايير الثمانية المختارة شاملة وتغطي الجوانب البيئية الرئيسية للمشروع الهندسي.					
2	تصنيف المعايير إلى ثلاثة مستويات (تلوث الارتجاج والغطاء النباتي والمياه الجوفية بالمستوى الأول، تلوث الهواء والتربة بالمستوى الثاني، الباقي بالمستوى الثالث) منطقي وواقعي.					
3	العوامل المؤثرة المذكورة تحت كل معيار (مثل: حجم المشروع، نوع التربة، حركة الآليات) كافية وملائمة للتقييم.					
4	القواعد المعرفية المُستخدمة لربط المدخلات (العوامل) بالمخرجات (نسبة التلوث) واضحة وقابلة للتطبيق.					
5	هناك معايير بيئية أخرى مهمة لم يتم تضمينها ويجب إضافتها (يرجى ذكرها في التعليقات).					
6	معايير أخرى.....					

المرحلة الثالثة[9]: النمذجة الرياضية باستخدام المنطق الضبابي تعريف المجموعات الضبابية لمعالجة الطبيعة النوعية و غير المؤكدة لكثير من البيانات (مثل: تربة موحلة، ضجيج مزعج، حركة آلية كثيفة)، تم استخدام نظرية المجموعات الضبابية. حيث تم تعريف دوال عضوية (Membership Functions) من نوع شبه المنحرف (Trapezoidal) لتحويل هذه الأوصاف اللغوية إلى قيم رياضية ثم بناء قاعدة المعرفة الضبابية حيث تم صياغة نظام استدلال ضبابي من نوع ممداني (Mamdani) يعتمد هذا النظام على مجموعة من قواعد إذا–فإن (IF–THEN Rules) التي تمثل الخبرة المنطقية في تقييم الأثر. على سبيل المثال : إذا كان حجم المشروع كبيرًا و نوعية الآليات قديمة، فإن تلوث الهواء في مرحلة التنفيذ يكون عالياً.

عملية الاستدلال والتفعيل :عند إدخال بيانات مشروع ما، يقوم المحرك الضبابي بتفعيل جميع القواعد المنطقية المتعلقة، ويجمع بين مخرجاتها للحصول على نتيجة ضبابية لكل معيار بيئي.

إزالة الضبابية : يتم في هذه الخطة تحويل المخرجات الضبابية المجمعة لكل معيار إلى قيمة حادة واحدة تمثل نسبة التلوث (من 0% إلى 100%) باستخدام طريقة مركز الثقل(Centroid) ، وهي الطريقة الأكثر شيوعاً.

المرحلة الرابعة– البرنامج الحاسوبي: لتمكين التطبيق العملي للنموذج، تمت برمجته بالكامل في بيئة MATLAB، مما يوفر واجهة قوية لتنفيذ العمليات الحسابية المعقدة للمنطق الضبابي وإدارة قاعدة المعرفة. تم اختبار النموذج وحساسية النتائج قبل التطبيق على حالة حقيقية، كما تم إجراء تحليل حساسية للنموذج عن طريق اختباره على سيناريوهات افتراضية متنوعة. تم تغيير معطى واحد في كل مرة (مثل: موقع المشروع من "وسط المدينة" إلى "الريف"، أو تغيير طريقة تجهيز البيتون من "ورشة" إلى "جاهز") لقياس مدى تأثر السوية البيئية النهائية بهذا التغيير.

المرحلة الخامسة: دراسة الحالة و اختيار مشروع تطبيقي :تم اختيار مشروع مدرسة الكندي في حي الوعر في حمص كحالة دراسة واقعية، لكونه مشروعاً خدمياً كبيراً ويمثل نموذجاً شائعاً للمشاريع الإنشائية العامة. جمعت البيانات الميدانية والنوعية في جدول معطيات المدرسة (وجود مياه جوفية، حجم كبير، وجود قبو، مجبل جاهز، فصل الشتاء، إلخ)، ثم تم تشغيل النموذج والحصول على النتائج، أدخلت هذه البيانات إلى برنامج MATLAB الذي قام عبر خطوات النمذجة الضبابية والتجميع الموزون، بحساب نسب تلوث تفصيلية لكل معيار في كل مرحلة ثم السوية البيئية النهائية الشاملة للمشروع، والتي بلغت 36.34%، وذلك باستخدام معادلة متوسط الأوزان.

6– الأثر البيئي [10]

يُعرف الأثر البيئي على أنه تغيير على النظام البيئي نتيجة للأنشطة الخاصة بالمشروع.

يعتبر تقييم الآثار البيئية للمشروعات أداة مهمة لأسلوب الإدارة البيئية المتكاملة والاستغلال الأمثل للموارد المادية والبشرية والمعنوية لتحديد السوية البيئية و لضمان تنمية اقتصادية متواصلة ولضمان حاجات الوقت الحاضر مع حماية البيئة للأجيال القادمة.

6-1 الغرض من تقييم الأثر البيئي وفوائده[11]

الغرض من تقييم الأثر البيئي هو تحديد السوية البيئية وضمان حماية البيئة والمواد الطبيعية والحفاظ عليها من خلال

- الحد من التلوث البيئي الناتج عن المشاريع الجديدة.
- خفض كمية الهدر في المواد والخامات والطاقة.
- ضمان سلامة المشروعات من الناحية البيئية وضمان استدامتها .
- ضمان إدراج الاعتبارات البيئية في دورة المشروع في مرحلة مبكرة والالتزام بأفضل المعايير .
- ضمان تحقيق أهداف التنمية المستدامة في التخطيط واتخاذ القرار.
- تحقيق وفر في رأس المال وتكاليف المشروع وحمايته من المخاطر غير المحسوبة وتغطية العائد الاقتصادي وضمان استمراريته.
- التأمين والحفاظ على العناصر الطبيعية الأساسية لمشروعات التنمية والموارد الطبيعية والبيئية في منطقة المشروع .
- تفادي تغيرات أساسية على المشروع في مرحلة لاحقة .

6-2 مكونات الأثر البيئي[12]:

- الأثر البيئي الموضعي: ويشمل: تلوث الهواء – تلوث الماء – تلوث التربة – التلوث بالغبار – تلوث الغطاء النباتي – التلوث بالوحل –التأثير على الغطاء الحيواني – التلوث بسبب النفايات .
- الأثر البيئي المحيطي: ويشمل التلوث بالضجيج – التلوث بالارتجاج – التلوث البصري.

7-المعايير البيئية المعتمدة في تحديد السوية البيئية[13]:

تم تحديد مجموعة من المعاييربناء على دراسات مرجعية سابقة أهمها:

7-1 تلوث الهواء[14]

مرحلة التنفيذ: الفصل الذي تم فيه تنفيذ المنشأ، وجود مياه جوفية، حجم المشروع، حجم الحفر، طريقة جبل البيتون.

مرحلة الهدم: الفصل الذي تم فيه تنفيذ الهدم، طبيعة المواد المستخدمة في البناء (بيتون ، مواد معدنية).

7-2 تلوث التربة[15]

مرحلة التنفيذ: حجم المشروع، كمية بقايا الورشات الناتجة عن الصب، نوعية الآليات،كمية بقايا الورشات الناتجة عن غير الصب.

مرحلة الاستثمار :حجم المشروع، طبيعة المشروع.

مرحلة الهدم والترحيل: حجم المشروع، بقايا الزجاج والسيراميك.

7-3 التلوث بالضجيج[16]

مرحلة التنفيذ: مدة الضجيج ، درجة الضجيج (عادي ،مقبول ، مزعج ، مؤذي) .

مرحلة الاستثمار :حجم المشروع، طبيعة المشروع.

مرحلة الهدم والترحيل: حجم المشروع، موقع المشروع.

7-4 التلوث بالارتجاج[17]

مرحلة التنفيذ: شدة الارتجاج، مدة التعرض للارتجاج، بعد المنشأ المتأثر بالارتجاج الناتج عن أعمال الإنشاء.

مرحلة الهدم والترحيل: مستوى الارتجاج، مدة التعرض للارتجاج، بعد المنشأ المعرض للارتجاج عن المباني المجاورة.

7-5 تلوث المياه – التأثير على جريان المياه السطحية[18]

مرحلة التنفيذ: إعاقة الجريان، زيوت محركات الآليات،طريقة جبل البيتون،كمية النفايات الناتجة عن تنفيذ المشروع.

مرحلة الهدم والترحيل: التلوث بالغبار ،الزيوت الناتجة عن آليات الهدم والترحيل.

7-6 تلوث المياه – التأثير على المياه الجوفية[19]

مرحلة التنفيذ: وجود القبو، تغير منسوب البساط المائي.

مرحلة الهدم والترحيل: مياه غسيل محملة بملوثات تتسرب للتربة، تسرب الزيوت والوقود من المعدات.

7-7 التلوث بالوحل[20]

مرحلة التنفيذ: طبيعة تربة الموقع ، حركة الآليات في موقع العمل(حركة كثيفة،حركة عادية)

مرحلة الاستثمار: الحركة في الموقع من قبل المشاة والآليات، نوع التربة (غضارية ، كلسية ، رملية).

مرحلة الهدم والترحيل: موقع المبنى في المقسم،طبيعة التربة ،موقع المقسم في المدينة

7-8 تلوث الغطاء النباتي[21]

مرحلة التنفيذ: مساحة المبنى، نوع التربة ،طبيعة سطح المبنى ،عمليات صب البيتون تلوث الجوار.

مرحلة الاستثمار: طبيعة سطح المبنى وطبيعة الجوار،التلوث بالوقود والزيوت.

مرحلة الهدم: الغبار والوحل الناتج عن عمليات الهدم، تأثير الدخان الناتج عن آليات الهدم على النباتات الموجودة.

8- القواعد المعرفية:

لصياغة النموذج المعلوماتي الذي يمكن من تحديد السوية البيئية للمشروع الهندسي،لا بد من إيجاد أهم القواعد المعرفية الناظمة لعملية التقييم المطلوبة وسنورد فيما يلي أهم هذه القواعد التي تم اعتمادها بناءً على الدراسات المرجعية والاستبيان والمشاريع:

1- وجود القبو.
2- تغير موقع المقسم على المدينة.
3- تغير اتجاه المبنى على المقسم.
4- تغير طبيعة سطح المبنى.

5- تغير مكان المجبل.

تم تقسيم أوزان المعايير إلى ثلاثة أوزان بناء على الاستبيان وتشمل:

المستوى الأول: يعطى لكل معيار فيه وزن(3) درجة أهمية وذلك نسبة تعادل ثلاث أضعاف المستوى الثالث ، ويشمل:

1- التلوث بالارتجاج.

2- تلوث الغطاء النباتي.

3- تلوث المياه الجوفية.

المستوى الثاني: يعطى لكل معيار فيه وزن(2) درجة أهمية وذلك نسبة تعادل ضعفي المستوى الثالث ويشمل:

1- تلوث الهواء.

2- تلوث التربة.

المستوى الثالث: ويمثل المستوى المعياري لبقية المستويات ويشمل:

1- التلوث بالضجيج.

2- تأثير على جريان المياه السطحية.

3- تلوث بالوحل.

وبعد تحديد وزن كل معيار لابد من تحديد مؤشر عام يدمج هذه المعايير ويتم ذلك بالاعتماد على عدة طرق منها[22]:

1- طريقة EECTRE I : طريقة لترتيب البدائل عبر المقارنة الزوجية باستخدام "علاقة التفوق"، حيث يتم استبعاد البدائل الأقل تفوقاً (عدم السيادة)، وتحديد مجموعة من أفضل البدائل المتفوقة (النواة).

2- طريقة EECTRE II : تُنتج تصنيفاً كاملاً للبدائل بدلاً من تحديد مجموعة متفوقة فقط، من خلال تطبيق معايير تفوق أكثر صرامة للحصول على تسلسل هرمي أوضح.

3- طريقة PROMETHEE I&II: تعتمد على فكرة التدفق التفاضلي، تقارن كل بداية بأخرى وفق كل معيار PROMETHEE I ينتج ترتيباً جزئياً (قد تكون بعض البدائل غير قابلة للمقارنة) ، بينما PROMETHEE IIينتج ترتيباً كاملاً وحيداً للبدائل باستخدام التدفق الصافي.

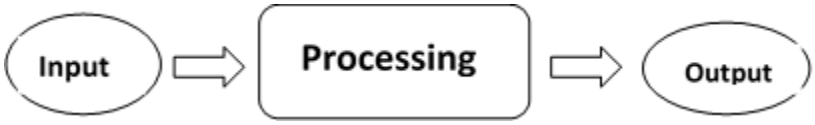
4- طريقة التوازن: عند حل أي مسألة بهذه الطريقة يتم دمج كل المعايير المفروضة بمؤشر واحد وذلك بعد تصعيد كل معيار بمعيار تثقيل مناسب ويدعى وزن المعيار، حيث نحدد الأوزان (P1 Pn ..... P2 ,) للمعايير (Cn ..... C2 , C1) على الترتيب من أجل الحصول على مؤشر جديد C وحيد كما يلي:

$$C = \frac{P1.C1 + P2.C2 + \cdots \ldots Pn.Cn}{\sum Pn}$$

إذاً إن وزن المعيار يعبر عن الأهمية النسبية لكل معيار ، وهذا الوزن يقترح من قبل المقرر انطلاقاً من معطيات المسألة .

يتم الحل باستخدام برنامج ماتلاب الذي يحوي صندوق أدوات المنطق الضبابي ، لتوضيح مراحل الحل الرياضي نقوم بتحديد المدخلات، المعالجة، المخرجات كما موضح في الشكل (1):

المدخلات في كل مشروع [1] :



الشكل 1 دورة معالجة البيانات (إعداد الباحث)

- حجم المشروع
- وجود مياه جوفية.
- وجود قبو.
- المجبل.
- الفصل.
- المواد المستخدمة في البناء.
- بقايا الورشات في المشروع.
- بقايا الورشات من غير الصب(سيراميك ، زجاج ...).
- نوعية الآليات المستخدمة.
- طبيعة المشروع.
- تردد الآليات المستخدمة.
- مدة التعرض للضجيج.
- موقع المشروع.

المعالجة: فيتم فيها تقييم كل معيار وإعطائه علامة مئوية حيث يستخدم الحاسب هذه المعطيات ثم يقوم بتحويلها إلى قواعد ضبابية وبالاعتماد على قواعد المنطق الضبابي يمر في مرحلتين أساسيتين هما: التضبيب وفك التضبيب[9]

1- تعريف مدخلات المعيار:

يتم في هذه المرحلة التعريف عن المدخلات الخاصة لكل معيار : العنصر الأول، العنصر الثاني....

2- مرحلة التضبيب الفردي المعيار[23]

إذا كان المدخل مقيماً بشكل لفظي فإننا نقوم بمبادلته بقيم عددية ثم نقوم بتضبيبه ، أما إذا كان مقيماً بشكل عددي نقوم بتضبيبه مباشرة بدون تضبيب لفظي.

نقوم بتضبيب القيم العددية إلى قيم لفظية ونحدد لها انتماء إلى المجموعات الضبابية حيث نقوم بتضبيب القيم حسب المجموعات الضبابية من قيم عددية إلى قيم مجموعات انتماء إلى المجموعات الضبابية.

تستخدم دالة العضوية لتحديد كيفية انتماء أي عنصر من العناصر إلى المجموعات الضبابية ، والشرط الأساسي لهذه الدالة أن يكون مداها بين الصفر والواحد، ومن أشكالها:المثلثية، شبه المنحرفة، الجرسية.

3- مرحلة دمج وتضبيب المدخلات معاً:

يتم وضع القواعد الضبابية للمعيار من خلال دمج العناصر معاً.

4- مرحلة إزالة التضبيب لكل معيار:

تتم عملية إزالة التضبيب من خلال تطبيق قانون مركز الثقل بحسب طريقة مامدنس المخرج كقيمة عددية ، أما المعيار يعطى كنسبة مئوية.

$$C_x = \frac{\sum x_i . d_A}{A}$$

حيث :

C_x: نسبة الخطورة.

A: المساحة الكلية.

والمخرجات: يتم فيها إعطاء تقييم عام كنسبة مئوية للسوية البيئية لتصميم معين لمشروع ما. لقد تم اعتماد شكل شبه المنحرف لاعتباره الأكثر شيوعاً.

9- اختبار البرنامج بأمثلة واقعية: يتم تحديد معطيات كل مشروع كما مبين في الجدول رقم(2)

معطيات المشروع	
وجود مياه جوفية	نعم / لا
حجم المشروع	كبير/ متوسط / صغير
وجود قبو	يوجد / لا يوجد
المجبل	ورشة / جاهز
الفصل	صيفاً / شتاءاً
المواد المستخدمة في البناء	بيتون / معدن
بقايا الورشات في المشروع	كبيرة / متوسطة / صغيرة
بقايا الورشات من غير الصب(سيراميك ، زجاج ...)	كبيرة / صغيرة
نوعية الآليات المستخدمة	جديدة / قديمة
طبيعة المشروع	ليلي / نهاري
تردد الآليات المستخدمة	مزعج جداً / مزعج / مقبول / عادي
مدة التعرض للضجيج	طويل / متوسط / صغير
موقع المشروع	وسط المدينة / طرف المدينة / ريف
شدة الارتجاج	قوي / متوسط / ضعيف
مدة التغرض للارتجاج	أكثر من شهر/من شهر لأسبوعين/أقل من أسبوعين
بعد المنشآت القريبة عن المنشأ المعرض للارتجاج	50> م/50-100/ >100
مستوى الارتجاج	قوي / متوسط / ضعيف
مساحة المبنى	كبيرة / متوسطة / صغيرة
نوع التربة	غضارية/ كلسية –رملية
طبيعة سطح المبنى	قابل للزراعة / غير قابل للزراعة

إعاقة الجريان	مبنى بشكل طولي/مبنى بشكل عرضي
كمية النفايات	كبيرة / صغيرة
طبيعة حركة الآليات	حركة كثيفة / حركة عادية
نوع التربة	موحلة / غير موحلة
موقع المبنى في المقسم	وسط المقسم / على تماس مع الطريق

جدول رقم(2) معطيات المشروع

مدرسة الكندي:

تمت تطبيق البرنامج المقترح لإيجاد قيمة السوية البيئية للمشروع على ثلاثة مدارس مختلفة من حيث المعطيات منها: مدرسة الكندي المنفذة في حي الوعر في محافظة حمص، وهي مدرسة مؤلفة من 3 طوابق وتصنف من المدراس ذات الحجم الكبير .

معطيات المشروع: موضحة في الجدول رقم (3)

معطيات المشروع	
وجود مياه جوفية	نعم
حجم المشروع	كبير
وجود قبو	يوجد
المجبل	جاهز
الفصل	شتاءً
المواد المستخدمة في البناء	بيتون
بقايا الورشات في المشروع	متوسطة
بقايا الورشات من غير الصب(سيراميك ، زجاج ...)	صغيرة
نوعية الآليات المستخدمة	قديمة
طبيعة المشروع	نهاري
تردد الآليات المستخدمة	مزعج

مدة التعرض للضجيج	طويل
موقع المشروع	طرف المدينة
شدة الارتجاج	قوي
مدة التغرض للارتجاج	أكثر من شهر
بعد المنشآت القريبة عن المنشأ المعرض للارتجاج	100<
مستوى الارتجاج	قوي
مساحة المبنى	كبيرة
نوع التربة	غضارية
طبيعة سطح المبنى	غير قابل للزراعة
إعاقة الجريان	مبنى بشكل طولي
كمية النفايات	كبيرة
طبيعة حركة الآليات	حركة كثيفة
نوع التربة	موحلة
موقع المبنى في المقسم	وسط المقسم

جدول رقم (3) مدخلات مدرسة الكندي

وعند إدخال المعطيات كانت النتائج كالتالي:

1- تلوث الهواء: مرحلة التنفيذ : 38,7%

مرحلة الهدم: 50 %

2- تلوث التربة: مرحلة التنفيذ : 48,7%

مرحلة الاستثمار :38,7%

مرحلة الهدم: 38,7%

3- تلوث بالضجيج: مرحلة التنفيذ: 83,7%

مرحلة الهدم:20%

4- تلوث بالارتجاج: مرحلة التنفيذ:48,8%

مرحلة الهدم:61,3%

5- تلوث الغطاء النباتي: 27,5%

6- تلوث المياه- التأثير على المياه الجوفية : 20%

7- تلوث المياه- التأثير على جريان المياه السطحية : 16,3%

8- تلوث بالوحل: مرحلة التنفيذ: 20%

مرحلة الهدم:16,3%

وتم إزالة التضبيب لحساب السوية البيئية من خلال تطبيق قانون مركز الثقل بحسب طريقة مامدنس [9]

$$C_x = \frac{\mathbf{3(48.8+61.3+27.5+20)+2(38.7+50+48.7+38.7+38.7)+(83.7+20}}{\mathbf{27}}$$

C_x=36.34% وبالتالي فإن السوية البيئية للمدرسة 36,34% .

وهذه النسبة تحدد السوية البيئية للحالة المدروسة اعتماداً على تحقيقها للمعايير البيئية المطروحة في الدراسة ولو تم الأخذ بعين الاعتبار تحقيق هذه المعايير أثناء دراسة وتنفيذ هذه المدرسة لحصلنا على بناء يحقق سوية بيئية عالية.

10- النتائج والتوصيات

10-1 النتائج:

بالاعتماد على البرنامج واعتبار المشروع الأكثر سوية بيئياً هو الذي يحقق نسبة 100% تم استخلاص النتائج التالية:

1- في حال وجود المشروع في مدينة حمص (وسط المدينة، طرف، ريف) وحجم المشروع (كبير، متوسط ، صغير) فإن تثبيت هذه المعطيات وتغيير معيار وجود القبو وعدم وجوده : تنخفض السوية البيئية بمقدار يتراوح 14.6% في حال وجود القبو عن حالة عدم وجوده بالنسبة لنفس المشروع.

2- تتغير السوية البيئية لمشروع بتغيير مكانه في المدينة من مشروع وسط المدينة بعد تطبيق النموذج الرياضي على مشاريع في وسط و طرف وريف المدينة كما مبين في الجدول رقم (4)

موقع المشروع	وسط المدينة	طرف المدينة	ريف
تغير السوية البيئية	مرجعي	+2.9%	+6.7%

جدول رقم (4) التقييم البيئي لمشروع دارج بتغيير مكانه في المدينة

3- ترتفع السوية البيئية لمشروع عند تطبيق النموذج المقترح بعد تثبيت جميع مواصفات المشروع وتغيير فقط طبيعة سطح المبنى بتغيير السطح العادي إلى سطح زراعي بنسبة تتراوح +2.4% .

4- تتغير الجودة البيئية بتغير حجم المشروع وتغير نوع طريقة تجهيز البيتون بالشكل التالي عند تطبيق النموذج المقترح على مشاريع بأحجام مختلفة وطرق جبل مختلفة كما مبين في الجدول رقم (4)

زادت السوية البيئية بنسبة 10.5% بالنسبة لمشروع حجمه كبير عند تغير طريقة الجبل من ورشة إلى جاهز.

وزادت السوية البيئية بنسبة 10.5% بالنسبة لمشروع حجمه متوسط عند تغير طريقة الجبل من ورشة إلى جاهز.

وزادت السوية البيئية بنسبة 9.5% بالنسبة لمشروع حجمه صغير عند تغير طريقة الجبل من ورشة إلى جاهز.

طريقة تجهيز البيتون		**مجبل ورشة**	**مجبل جاهز**	**السوية البيئية**
حجم المشروع	كبير	14.2	24.7	+10.5
	متوسط	15.8	26.3	+10.5
	صغير	19.1	28.2	+9.1

جدول رقم (5) التقييم البيئي للمشروع وتغيير التقسيم تبعاً لطريقة تحضير البيتون

وبالتالي وسطياً فإن ترك الجبل بالورشة والانتقال إلى بيتون جاهز يرفع الجودة البيئية بحوالي 10% مهما كان حجم المشروع.

10-2 التوصيات:

1- اعتماداً على النتائج يوصى باعتماد التالي للوصول إلى التصميم الأفضل للمشروع الهندسي من وجهة نظر الجودة البيئية وهي:

a. استخدام الخرسانة الجاهزة في المشاريع المتوسطة والكبيرة الحجم مما يخفض انبعاثات الغبار والضجيج في موقع التنفيذ.

b. توجيه المشاريع ذات البصمة البيئية العالية (كالمدارس الكبرى والمستشفيات) إلى مواقع أقل كثافة سكانية، مع تطوير البنية التحتية اللازمة في تلك المناطق.

2- استخدام أدوات السوية البيئي لاختبار أفضل تصميم للمشروع من حيث عدة مقترحات وبدائل للتصميم.

3- يوصى باختيار عوامل أخرى غير التي تم اعتمادها كدراسة تأثير نوعية البيتون المستخدم واستخدام إضافات مختلفة.

4- يوصى بإدراج فقرة تحفز على استخدام الأسطح الخضراء في أنظمة الأبنية خاصة للمشاريع التعليمية والصحية.

11- المراجع:

1. علي دياب ، عبد الخالق طالب ، مها أيوب (2015) "التقييم البيئي لآليات الأعمال البيتونية بالاعتماد على نظرية المنطق الضبابي " مجلة جامعة حمص . المجلد 37 . العدد 3.
2. علي دياب ، حمزة علي . (2010) "تحليل النظم الهندسية" . جامعة حمص .
3. نبيل هاشم العرجي ، محمد علي الأنباري،جبار حمود البيضاني (2010)"دليل الجودة البيئية في جامعة بابل حسب المواصفة العالمية للبيئة الايزو 14001 " .
4. ممدوح سلامة مرسي أحمد .(2008) "الإدارة البيئية لتقييم الأثر البيئي " مجلة أسيوط للدراسات البيئية العدد (32).
5. Adnan Enshassi, B. K. (2014). An evaluation of environmental impacts of construction. Revista Ingeniería de Construcción RIC, 234-254.

6. Vahid Faramarzi, A. S. (Vol. 40, No. 4, Winter 2015). Assessment of Environmental Impacts Using Fuzzy Logic Inference Model. Journal of Environmental Studies.
7. varshosaz, K. (2011). Application of Fuzzy Logic in Environmental Impact Assessment Modeling of a man-made Lake in Western Tehran(Iran). 2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE vol.6 (2011) © (2011) IACSIT Press, (p. 155). Singapore.
8. Zadeh, Lotfi, "Fuzzy Logic", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2024 Edition), Edward N. Zalta & Uri Nodelman (eds.)
9. SINGH, B, KAUNERT, C & VIG, K (Eds) 2025 Fuzzy Logic in Smart Sustainable Cities, 1st Edition. Jenny Stanford Publishing.
10. Nahidi, M. J., & Kakhani, A. (2021). Optimization of environmental impacts of construction projects: a time–cost–quality trade-off approach. International Journal of Environmental Science and Technology, 18(2).
11. Ahmed, M. R. (2025). Environmental and social impact assessment in construction projects. In M. K. Smith (Ed.), Encyclopedia of sustainable engineering management. Springer.
12. Romianingsih N, Utomo S, Hamzah U (2023) A comparative study of different practices in environmental impact assessment. J Environ Sci Sustain Dev.

13. Sandanayake M (2022) Environmental impacts of construction in building industry – a review of knowledge advances, gaps and future directions. Knowledge 2(1).
14. Diener, A., & Mudu, P. (2021). How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective - with implications for urban planning. Science of the Total Environment, *796*, 148605.
15. Cachada, A., Rocha-Santos, T., & Duarte, A. C. (2018). Soil and pollution: An introduction to the main issues. In A. C. Duarte, A. Cachada, & T. Rocha-Santos (Eds.), Soil pollution: From monitoring to remediation (pp. 1–28). Elsevier.
16. Ali, Y., Khan, A. R., & Raza, S. A. (2025). Picture-Fuzzy Decision-Making Tool for Enhanced Risk Prioritization in Construction and Demolition Waste Management: A Hybrid FMEA–Fine–Kinney–SWARA–TOPSIS Approach. Buildings.
17. Khan, M. I., Zaman, S. F., & Al-Ghamdi, S. G. (2023). Understanding the environmental impacts of virgin aggregates: Critical literature review and primary comprehensive life cycle assessments. Journal of Cleaner Production, 415.
18. Mannan, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Environmental impact of water-use in buildings: Latest developments from a life-cycle assessment perspective. *Journal* of Environmental Management, 261(6).

19. Johnson, A., & Patel, S. (2025). Environmental and social impact assessment in construction projects. In L. Chen & M. K. Smith (Eds.), *Handbook of construction project management* (pp. 1419–1460). Springer.
20. Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2024). Decision support model for selecting construction and demolition waste management alternatives: A life cycle-based approach. Science of the Total Environment, 951, 175408
21. Stam C (2021) Environmental and social impact assessment (ESIA) – more than ticking the box, LANDac, the Netherlands Land Academy.
22. Chen, L., Wang, H., & Zhang, Y. (2022). Environmental impacts of construction in building industry—A review of knowledge advances, gaps and future directions. Knowledge, 2(1).
23. Slyvka, M. M. (2025). Environmental monitoring and environmental impact assessment as management functions in the field of environmental protection. Uzhhorod National University Herald. Series: Law, 2(91).
24. Rana, J., Abeykoon, D., & York St John University. (2025). Environmental impact assessment in civil engineering projects. International Journal of Research in Informative Science Application & Techniques (IJRISAT), *13*(XI).
25. Ika, L. A., Meredith, J., & Zwikael, O. (2024). Project governance: The impact of environmental changes on governance adaptations in

large-scale projects. International Journal of Managing Projects in Business, *17*(4/5)

أثر علاقة الإدراك الإنساني مع الذكاء الصنعي في تحسين عملية التصميم المعماري

كلية الهندسة المعمارية _ جامعة حمص

إعداد: م. يوسف ابراهيم الخطيب إشراف: د. مؤنس الجرايحي

الملخص:

يعد الإدراك الإنساني الركيزة التراكمية الأهم التي حافظت على تطور المعارف والعلوم عبر التاريخ وخاصة في علوم الهندسة المعمارية والتصميم المعماري ومع ظهور التقنيات الجديدة البسيطة منها والثورية على حد سواء تظهر أهمية مراجعة وضبط تأثيرها على علم التصميم المعماري، الذكاء الصنعي بوصفه تقنية ثورية بدأت فعلا بتغيير ملامح الأعمال والعلوم المختلفة بنسب مختلفة وخاصة العلوم التي تبحث بالإدراك الإنساني.

يقدم البحث طرحا جديدا فيما يتعلق بنماذج الدمج بين الادراك الإنساني والذكاء الصنعي لخدمة العملية التصميمية اذ يؤسس لنموذجين بشكل واضح مع شرح منهجية بناء كل نموذج وطريقة عمله داخل العملية التصميمية مع تحديد دور كل من الانسان ومحرك الذكاء الصنعي المستخدم. النموذج الأول المبتكر في البحث (التبادلي PAIR MODEL) الذي يطوع العلاقة لخدمة العملية التصميمة وفق مبدأ التبادل الفعال بين المصمم والذكاء الصنعي والنمو المشترك. النموذج الثاني المبتكر في البحث (الاعتمادي HCAI–AD MODEL) الذي يطوع العلاقة لخدمة العملية التصميمة وفق مبدأ الاعتمادية الواعية على محركات الذكاء الصنعي بتعليم وتوجيه وضبط المصمم المعماري. كما وصل البحث الى محددات تقييمية تم من خلالها تحليل عدة امثلة والوصول الى نتائج دقيقة تتيح الاطلاع على مقدار الفجوة بين ما هو موجود فعلا وما هو ممكن.

الكلمات المفتاحية: ذكاء صنعي _ إدراك انساني _ تبادلية _ اعتمادية

The Impact of the relationship between human cognition and artificial intelligence on improving the architectural design process

Ar. Yousef Al-khteeb **Dr. Mounes Al-Jarayhi**

Abstract :

Human cognition constitutes the most significant cumulative foundation that has sustained the development of knowledge and the sciences throughout history, particularly within the architectural sciences and architectural design. With the emergence of new technologies—both incremental and revolutionary—the importance of reviewing and regulating their influence on the discipline of architectural design becomes evident. Artificial intelligence, as a revolutionary technology, has already begun to reshape the features of various fields of work and science to varying degrees, particularly those disciplines concerned with human cognition.This research proposes a novel framework concerning models of integration between human cognition and artificial intelligence in service of the design process, establishing two distinct models while explaining the methodology underlying the construction of each model, its mode of operation within the design process, and the respective roles of the human designer and the artificial intelligence engine employed.The first model introduced in this research the **(PAIR) model** harnesses this relationship in service of the design process according to the principle of effective reciprocity between the designer and artificial intelligence, and of mutual growth.The second model introduced in this research the **(HCAI-AD) model** harnesses this relationship in service of the design process according to the principle of conscious dependency on artificial intelligence engines, whereby the architectural designer is taught, guided, and regulated.

1- المقدمة:

تطور العلوم وطرق البحث العلمي في كل مجال من المجالات أفضـــى بطبيعة الحال لأن تؤثر على بعضها بعضاً وخاصة أن الهدف الأساسي لكافة العلوم هو تحقيق الراحة النسبية و الفهم المنطقي

صورة 1 انشاء صورة باستخدام الذكاء الصنعي التوليدي من اعداد الباحث
المصدر(https://www.midjourney.com/)

للإنسان سواء في الماديات أو المعنويات ، وعندما كان التصميم المعماري علماً يعتمد على تطور باقي العلوم الإنسانية والتكنولوجية ظهر علم الإدراك الإنساني وكيفية تفسيريه لمعنى الأشياء ، ليكون من أكثر المجالات تأثيراً عل التصاميم الإنسانية عامةً وعلى المعمارية خاصةً على مر السنين ، كما أن أحد أكثر المؤثرات على عملية التصميم هي الإمكانيات التقنية الخاصة بكل عصر او مرحلة زمنية ما وبذلك تشكل تكنولوجيا الذكاء الصنعي و تطبيقاتها عاملاً حاسماً في عملية التصميم المعماري في العصر الحالي ، ومن هنا يعنى هذا البحث بدراسة العلاقات التبادلية بين هذه المجالات حتى علاقة الإدراك الإنساني و الذكاء الصنعي التي تحدد بطبيعة الحال دور المصمم و كيفية الاستفادة من التقنيات المتاحة وتحديد دوره في المجالات الثلاثة على ضوء التغيرات الحاصلة في علم التصميم المعماري .



2- أهمية البحث:

البحث يقدم مدخل جديد لتطوير وتحسين عملية التصميم المعماري من خلال تطويع علاقة أحدث تقنيات الذكاء الصنعي و مجالات الادراك الإنساني للوصول الى نماذج مخصصة.

3- هدف البحث:

يهدف هذا البحث الى توظيف تقنيات الذكاء الصنعي وتقوية تفاعلها وتحديد دورها في مراحل الادراك الإنساني بشكل عام و المعماري بشكل خاص لتحسين عملية التصميم المعماري وبالتالي استنتاج نماذج دمج محددة المعالم.

4- علاقة الإدراك الإنساني والذكاء الصنعي في العملية التصميمية

يمكن النظر إلى **الذكاء الصنعي** بوصفه الحلقة الأحدث في سلسلة الأدوات التي ابتكرها الإنسان لمواجهة محدوديته. غير أن الذكاء الصنعي لا يُعد امتدادًا تقنيًا فحسب، بل تحولًا نوعيًا في العلاقة بين الإنسان وإدراكه لذاته. فعندما يصبح الإنسان قادرًا على تصميم منظومة تفكّر وتتعلم، فإنه يعيد تعريف مفهوم الإدراك نفسه من كونه تجربة ذاتية إلى كونه عملية قابلة للمحاكاة. ومن هنا تتشكل **علاقة الإدراك الإنساني بالذكاء الصنعي**، كحوار مستمر بين وعي الإنسان الطبيعي ورغبته في استنساخه وتوسيعه عبر الآلة.

تقوم هذه العلاقة على جدلية أساسية: كلما **ازداد وعي الإنسان بحدوده، ازداد سعيه لتجاوزها تقنيًا**. فالإنسان هو من يدرك أولًا، وهو من يسعى دومًا لتوسيع مجاله الإدراكي خارج حدوده الفيزيائية. وهكذا يصبح الذكاء الصنعي مرآة إدراكية جديدة، تعكس وعي الإنسان بمحدوديته، وتكشف في الوقت نفسه عن طموحه في تجاوزها، عبر أدوات تحاكي الفكر وتعيد إنتاجه، في محاولة لإعادة تعريف معنى الإدراك ذاته ضمن منظومة معرفية مشتركة بين الإنسان والآلة.

4-1 الأسس المعرفية للعلاقة بين الإدراك الإنساني والذكاء الصنعي

تمثّل العلاقة بين الإدراك الإنساني والذكاء الصنعي أحد أكثر الموضوعات تعقيدًا في الفكر العلمي المعاصر، لأنها تربط بين مجالين متباعدين في الأصل ومتقاربين في الجوهر :**الوعي الإنساني بوصفه ظاهرة بيولوجية–معرفية، والذكاء الصنعي بوصفه بنية رقمية – خوارزمية** تسعى لمحاكاة ذلك الوعي. تقوم الأسس المعرفية لهذه العلاقة على فكرة مركزية هي أن كليهما الإنسان والآلة يتعاملان مع **المعلومة كمدخلٍ للإدراك**، لكن بأساليب معالجة مختلفة في البنية والغاية. [35]

4–1–1 الأساس الأول: الإدراك الإنساني كأساس لبناء منظومة الذكاء الصنعي

بدأت فكرة الذكاء الصنعي من **حاجة إنسانية خالصة**، و ليس من نزعة تقنية محضة؛ حاجةٍ لفهم العقل ذاته، ولتجاوز حدود الإدراك الطبيعي نحو مستوى أوسع من التحليل والفهم والمعالجة. فالإنسان منذ بدايات تطوره الحضاري أدرك أن قدرته على التفكير والاستنتاج محدودة بحدود الذاكرة والانتباه والزمن، وأنه عاجز عن الإحاطة الشاملة بالمعلومات المتراكمة حوله. هذه المحدودية في قدرات الإدراك هي التي دفعته للبحث عن **وسيط ذكيّ مكمّل**، قادر على تقليد آليات تفكيره وتنظيمها بل وتطويرها. إنّ

الذكاء الصنعي لم يكن اختراعًا وليد الصدفة، بل هو استجابة عميقة لأزمة الإنسان الوجودية مع المعرفة؛ إذ سعى من خلاله إلى أن يفهم كيف يفكر، لا أن يخلق فقط من يفكر مكانه. [24]

لقد استُعير من الإدراك الإنساني عدد من المبادئ التي شكّلت العمود الفقري للذكاء الصنعي:

- **التعلّم من الخبرة** :حيث يُغذّى النظام بالبيانات كما تُغذّى الذاكرة الإنسانية بالتجارب.
- **التحليل السياقي** :إذ لا تُقرأ المعلومة في فراغ، بل ضمن شبكة علاقات تشبه السياقات الإدراكية للوعي البشري.
- **اتخاذ القرار التكيّفي** :أي تطوير القدرة على تعديل السلوك بناءً على النتائج السابقة، كما يفعل العقل عند التعلّم. [22]

بناءً عليه، يمكن القول إنّ **الإدراك الإنساني هو الجذر الذي أنبت الذكاء الصنعي**، وإنّ الأخير أصبح بمثابة "المرآة" التي تعكس كيف يفكر الإنسان، ولكن أيضًا "النافذة" التي تُريه كيف يمكن التفكير بطريقة مختلفة. فكلّما ازداد استقلال الذكاء الصنعي، ازدادت الحاجة إلى وعيٍ إنسانيّ أعمق **لضبط معناه وحدوده،** لأنّ ما بدأ كمحاكاة للإدراك قد يتحوّل — إن تُرك دون توجيه — إلى إدراكٍ آخر لا يشبه الإنسان، بل يتجاوزه. [22]

4-1-2 الأساس الثاني: مقارنة بين الإدراك البيولوجي والإدراك الصنعي

يُعدّ الإدراك البيولوجي والإدراك الصنعي مجالين متقاربين في المظهر، متباينين في الجوهر؛ فكلاهما يتعامل مع المعلومات ويُنتج قرارات ومعاني، غير أن **جوهر التكوين والدافع والغاية** يفرّق بينهما بصورة لا يمكن تجاوزها. فالإدراك البيولوجي هو نتاج منظومة عصبية حية، تتفاعل فيها الخلايا العصبية مع الحواس والمشاعر والتجارب الشخصية لتكوّن الوعي والمعنى، بينما الإدراك الصنعي هو منظومة رياضية رقمية تعتمد على البيانات والخوارزميات لتوليد استجابات منطقية محسوبة. وعلى الرغم من أن الذكاء الصنعي استُلهم من الدماغ الإنساني، إلا أن **المحاكاة لا تعني التطابق،** فالعقل البشري لا يُختزل في معادلات، كما أن الخوارزمية لا تختبر الوجود كما يختبره الإنسان. [22]

تكمن **الاختلافات الجوهرية بين الإدراكين** في ثلاثة مستويات رئيسية:

- **الدوافع** :الإدراك البيولوجي تحكمه دوافع ذاتية مرتبطة بالبقاء، الإحساس، الحاجة، والانفعال؛ في حين أن الإدراك الصنعي يخلو من الدوافع الطبيعية ويعمل ضمن أهداف محددة مسبقًا وضعها الإنسان. فالعقل البشري يسعى إلى الفهم لأنه يعي ذاته، بينما النظام الصنعي يسعى إلى الحل لأنه مبرمج على تحقيق نتيجة.
- **المستقبلات** :يعتمد الإدراك البيولوجي على شبكة من الحواس المترابطة (البصر، السمع، اللمس، الشم، الذوق) التي تنقل الواقع في صورته المتغيرة والعاطفية، بينما الإدراك الصنعي يعتمد على أجهزة استشعار أو قواعد بيانات جامدة لا تعي التجربة، بل ترصدها كقيم رقمية أو صور ثابتة. لذلك، لا يعيش النظام الصنعي التجربة، بل **يقيسها فقط**. [31]
- **الغاية** :الإدراك الإنساني يُنتج المعنى، أما الإدراك الصنعي فيُنتج التمثيل. [24]

وبناءً على ذلك، لا يمكن الحديث عن تماهٍ بين الإدراكين، بل عن علاقة **أصل وفرع** :فالإدراك الصنعي وُلد من رحم الإدراك الإنساني، لكنه نما في بيئة مختلفة، وتغذّى بآليات مغايرة، حتى أصبح كيانًا معرفيًا مستقلًا في بنيته، تابعًا في معناه. وهكذا تتجسد العلاقة في معادلة دقيقة :كلّ **إدراك صنعي هو إنسانيّ في الأصل، لكنه غير إنساني في الطبيعة.** [22]

جدول 1 يوضّح نقاط الاختلاف والالتقاء بين الإدراك البيولوجي الإنساني والإدراك الصنعي الخوارزمي. الجدول مصاغ بمنهج تحليلي مقارن يعكس البنية الفكرية العميقة لكل منظومة المصدر [24] [27] [22] (اعداد الباحث)

المحور المقارن	الإدراك البيولوجي (الإنساني)	الإدراك الصنعي (الخوارزمي)	نوع العلاقة (اختلاف / التقاء)
الدافع	تحركه دوافع فطرية مرتبطة بالبقاء، والرغبة في الفهم، والتفاعل الوجداني مع البيئة. ينشأ من الوعي الذاتي والإحساس بالحاجة.	محكوم بأهداف مبرمجة مسبقًا من الإنسان، بلا رغبة أو قصد ذاتي. يعمل لتحقيق مهام محددة رياضيًا.	**اختلاف جوهري** في المنطلق والدافع؛ الأول ذاتي والثاني موجه خارجيًا.
المستقبلات	الحواس الخمس وأنظمتها العصبية، تنقل العالم عبر الخبرة	مستشعرات رقمية أو قواعد بيانات ثابتة تستقبل معلومات	**اختلاف هيكلي** في طبيعة الاستقبال ونوع المعلومة.

	الشعورية والزمنية. ترتبط بالذاكرة والانفعال والمعنى.	كمية فقط، بلا بعد شعوري أو سياقي ذاتي.	
الغاية	بناء المعنى وفهم الذات والعالم بهدف التكيّف والنمو والتجربة.	تحقيق الأداء الأمثل والنتائج الدقيقة من خلال الكفاءة الحسابية.	**اختلاف في الغاية**: الإنسان يبحث عن الفهم، والآلة تبحث عن الحل.
منظومة العمل الداخلية	شبكة عصبية حية ترتكز على الناقلات العصبية والتفاعل الكهرو–كيميائي ضمن الدماغ، تمتاز بالمرونة والقدرة على التكيف.	شبكة عصبية صنعية تعتمد على الوصلات الرياضية والتعلّم المتدرّج من البيانات عبر أوزان رقمية قابلة للتعديل.	**التقاء هيكلي في المبدأ** (شبكات مترابطة)، مع **اختلاف في الطبيعة** (عضوية مقابل رقمية).
التعلّم من الخبرة	يحدث عبر تراكم التجارب الحسية والمعرفية والتأملية، ويتأثر بالانفعال والذاكرة طويلة الأمد.	يتم عبر تحليل البيانات المتكررة وإعادة ضبط الأوزان الحسابية استنادًا إلى التغذية الراجعة.	**التقاء وظيفي** في آلية "التعلّم بالتجربة"، واختلاف في ماهية التجربة ذاتها.
التحليل السياقي	يقرأ المعلومة ضمن سياق ثقافي وزمني وعاطفي، ويعيد تفسيرها استنادًا للخبرة والمعنى.	يفسّر المعلومة ضمن نموذج احتمالي يعتمد على العلاقات الإحصائية بين البيانات.	**التقاء شكلي** في ربط المعلومة بسياق، مع **اختلاف معرفي** في طبيعة ذلك السياق.
اتخاذ القرار التكيفي	ناتج عن عملية وعي إدراكي متكاملة تشمل التفكير النقدي، الحدس، والتقييم الأخلاقي.	يعتمد على الخوارزميات والمنطق الاحتمالي لتحقيق أفضل نتيجة وفق معايير محددة مسبقًا.	**التقاء سلوكي** في "الاستجابة"، مع **اختلاف جوهري** في مصدر الحكم والقيمة.
الزمن الإدراكي	متغيّر ومرتبط بالخبرة الذاتية والإحساس بالمدة والانتظار والذاكرة الشعورية.	ثابت وخالٍ من التجربة الزمنية؛ الزمن يُقاس بوحدات المعالجة لا بالإحساس.	**اختلاف مفاهيمي** في إدراك الزمن بين الشعور به ومعالجته.
الإبداع والتخيّل	يولد من تفاعل الوعي واللاوعي، والقدرة على توليد صور ذهنية غير مسبوقة.	محصور ضمن حدود البيانات السابقة؛ التوليد الإبداعي قائم على إعادة تركيب الأنماط لا على الوعي بالمعنى.	**اختلاف جذري** في مصدر الإبداع وطبيعته.
المرجعية الأخلاقية	تنبع من القيم والضمير الجمعي والوعي بالمسؤولية.	لا يمتلك ضميرًا أو حسًّا أخلاقيًا، بل يعتمد على القواعد التي يبرمجها الإنسان.	**اختلاف مبدئي** في المرجعية والسلوك الأخلاقي.
الوعي بالذات	الإنسان يدرك أنه يدرك؛ أي يمتلك وعيًا ميتا–إدراكيًا يسمح له بالتفكير في تفكيره.	النظام الصنعي لا يمتلك وعيًا ذاتيًا؛ يدرك المعلومة دون أن يعي إدراكه لها.	**اختلاف جوهري** بين الوعي بالذات وغيابه.
العلاقة مع العالم الخارجي	تفاعلية، انفعالية، وجدانية، تُبنى على المعايشة والتجربة الحسية المباشرة.	تحليلية، حسابية، غير شعورية، تُبنى على المعالجة الرمزية للمعلومات.	**اختلاف في طبيعة التجربة والمعنى** رغم وجود تشابه في آليات التحليل.
المحدودية والاتساع	محدود بالقدرة البيولوجية، لكنه غير محدود بالإبداع والمعنى.	غير محدود حسابيًا، لكنه محدود بالمعنى والوعي.	**توازن عكسي** بين قدرة المعالجة والقدرة على الفهم.

يتّضح من المقارنة أن الإدراكين يشتركان في البنية المنطقية العامة لمعالجة المعلومات — الاستقبال، التحليل، التعلّم، واتخاذ القرار — غير أن **الاختلاف الفلسفي الجوهري** يكمن في **"المعنى"**. فالإدراك الإنساني يتكوّن من الوعي والشعور بالذات، بينما الإدراك الصنعي يفتقد لتلك الطبقة المعرفية العليا التي تمنح الفعل قيمة وغاية. وبالتالي، يمكن القول إن الإدراك الصنعي هو **ظلّ رقميّ للإدراك الإنساني**؛ يشبهه في المظهر البنيوي، ويختلف عنه في الجوهر الوجودي.

جدول 2 أوجه التبادل المعرفي بين الإدراك الإنساني والإدراك الصنعي، من حيث ما يمنحه كلٌّ منهما للآخر في إطار التكامل نحو إدراك مطلق يجمع الحس الإنساني بالدقة الخوارزمية المصدر [31]-[35]-[28]-[22] (تنظيم الباحث)

جهة التبادل	ما يمنحه الإدراك الإنساني للذكاء الصنعي	ما يمنحه الإدراك الصنعي للإدراك الإنساني	غاية التكامل (الإدراك المطلق)
المعنى والنية	يزوّده بقدرة على فهم الهدف والمعنى من وراء البيانات، إذ يُدخل البعد الإنساني في برمجة القيم والغرض.	يعيد صياغة المعنى في صورة قابلة للقياس والتحليل، فيحوّل القيم المجردة إلى معطيات عملية.	**بناء إدراك مزدوج يوازن بين "نية الفعل" و"فعالية التنفيذ."**
الحدس والخيال	يمنح الذكاء الصنعي الحسّ بالاحتمال، والقدرة على توليد فرضيات غير محددة سلفًا.	يحفّز الإدراك الإنساني على تجاوز حدوده التقليدية من خلال استكشاف حلول لم يكن ليتصورها منفردًا.	**تشكيل منظومة تفكير إبداعي تتبادل بين اللاوعي البشري والمنطق الخوارزمي.**
الخبرة والسياق	يزوّد الآلة بالمعرفة التجريبية والمرجعية الثقافية التي تفتقدها البيانات المجردة.	يمنح الإنسان أدوات لتحليل الخبرة بسرعة هائلة وكشف الأنماط غير المرئية.	**الوصول إلى فهم معمّق يجمع بين "التجربة" و"التحليل."**
الأخلاق والمسؤولية	يغرس في النظم الذكية قيم الإنصاف والإنسانية لتوجيه قراراتها.	يكشف للإنسان حدود قدرته الأخلاقية في مواجهة القرارات الآلية ويذكّره بمسؤوليته عنها.	**خلق وعي أخلاقي مشترك يضبط التقدّم التقني بالقيمة الإنسانية.**
المرونة والتأقلم	يقدّم نموذجًا إدراكيًا متكيّفًا مع التغير، قادرًا على إعادة التعلم في سياقات جديدة.	يزوّد الإنسان بقدرة على محاكاة سيناريوهات معقدة وفهم احتمالات المستقبل.	**تحقيق قدرة إدراكية متكاملة للتكيّف والتوقّع.**
الوعي الذاتي	ينقل للآلة مفهوم الانعكاس المعرفي	يدفع الإنسان إلى تأمل ذاته من منظور رقمي وتحليل	**بناء "وعي ميتا–إدراكي" يجمع بين**

	(التفكير في التفكير) كأساس للتطوير الذاتي.	وعيه كظاهرة قابلة للفهم العلمي.	**التأمل البشري والانعكاس الحسابي.**
اللغة والتعبير	يزوّد النظم الذكية بأدوات لفهم اللغة الطبيعية بما تحمله من رموز وثقافة.	يمنح الإنسان مرآة جديدة لترجمة أفكاره إلى رموز رقمية دقيقة.	**تحقيق تواصل لغوي–إدراكي بين الإنسان والآلة.**
الإبداع التحويلي	يُلهِم الآلة بطرق التفكير غير الخطية والاستدلال بالرموز والمعاني.	يعلّم الإنسان كيف يستفيد من المنهج الخوارزمي لتطوير أدواته الإبداعية.	**توليد إبداع معماري ومعرفي يجمع بين الحس والاحتمال.**

إذاً يتبادل الإدراك الإنساني والإدراك الصنعي عناصر النقص والكمال؛ فيمنح الإنسان الآلة **المعنى، القيم، والسياق**، بينما تمنح الآلة الإنسان **الدقة، السرعة، والاتساع المعرفي** .وعندما يُوحَّد هذان البعدان في منظومة واحدة، ينشأ ما يمكن تسميته بـ **الإدراك الموحد** إدراك يمتلك الحسّ الإنساني في جوهره، والدقة الصنعية في أدائه، فيقترب بذلك الوعي من صورته الكاملة :**وعيٌ يفهم، ويحلّل، ويشعر، ويصنع.**

4-1-3 الأساس الثالث: دور علم الأعصاب الإدراكي في تطوير الذكاء الصنعي

يشكّل **علم الأعصاب الإدراكي** الجسر المعرفي الأكثر عمقًا بين الإدراك الإنساني والذكاء الصنعي، إذ يوفّر الإطار العلمي الذي مكّن الباحثين من **فهم البنية الذهنية للإنسان وتحويلها إلى نموذج قابل للبرمجة** .يقوم هذا العلم على دراسة العلاقة بين العمليات العقلية – كالإدراك، والانتباه، والذاكرة، واتخاذ القرار – وبين البنية العصبية الفيزيولوجية للدماغ، وهو ما جعل منه المرجعية الأولى لتطوير الخوارزميات الذكية والشبكات العصبية الاصطناعية. فالذكاء الصنعي في جوهره ليس إلا محاولة لإعادة بناء وظائف الدماغ ضمن بيئة رقمية تحاكي بنيته وآلياته. [33]

جدول 3 يُظهر المقابلات بين مفاهيم علم الأعصاب الإدراكي في الدماغ البشري ونظيراتها في الذكاء الصنعي المصدر (اعداد الباحث)

المفهوم العصبي في الدماغ البشري	النظير في الذكاء الصنعي	آلية العمل المقابلة	الأثر على تطوير الذكاء الصنعي
البنية العصبية (Neural Structure)	الشبكات العصبية الصنعية (Artificial Neural Networks)	ترابط الخلايا العصبية في الدماغ يقابله ترابط العقد في النموذج الرقمي، حيث تنقل كل "وصلة" معلوماتٍ محسوبة تماثل الإشارة العصبية.	إرساء البنية الأساسية للذكاء الصنعي القادر على التعلّم المتدرّج والتعميم عبر مستويات من المعالجة.

اللدونة العصبية (Neuroplasticity)	التعلّم العميق القابل للتحديث (Adaptive Deep Learning)	الدماغ يعيد تشكيل وصلاته تبعًا للتجربة؛ والنظام الصنعي يحدّث أوزانه الحسابية عبر التغذية الراجعة.	تمكين الآلة من التعلّم المستمر وتحسين أدائها ذاتيًا دون إعادة برمجة كاملة.
الانتباه الانتقائي (Selective Attention)	آليات الانتباه في الشبكات (Attention Mechanisms)	الدماغ يركّز على المعلومة الأهم ويتجاهل البقية؛ والنموذج الصنعي يوزّع "الأوزان" حسب أهمية المدخلات.	تحسين دقة الفهم السياقي للنصوص والصور، وتطوير نماذج اللغة والرؤية الذكية.
الذاكرة قصيرة وطويلة الأمد	الذاكرة الاصطناعية (Short & Long-Term Memory Models)	الدماغ يخزّن المعلومات مرحليًا وفق الأهمية؛ والنظام الصنعي يعتمد على طبقات ذاكرة لتتبّع السياق والتاريخ.	تعزيز قدرات النماذج في الفهم المتسلسل واتخاذ القرار عبر تراكم المعرفة.
اتخاذ القرار (Decision-Making)	خوارزميات الاختيار والتحسين (Optimization Algorithms)	الدماغ يستخدم مزيجًا من التحليل والعاطفة والخبرة؛ والنظام الصنعي يعتمد على تقييم احتمالات متعدّدة واختيار الأنسب.	تطوير أنظمة ذكاء قادرة على المحاكاة المنطقية واتخاذ قرارات دقيقة في بيئات معقّدة.
المعالجة الموزّعة (Distributed Processing)	المعالجة الموازية (Parallel Processing)	الدماغ يشغّل شبكات متعددة تعمل بالتوازي؛ والنظام الصنعي يوزّع المهام بين وحدات المعالجة أو الأنوية.	رفع كفاءة الأداء وتقليل زمن المعالجة في التطبيقات الكبيرة والمعقّدة.
الانفعال والاستجابة العاطفية (Emotional Response)	الذكاء العاطفي الاصطناعي (Affective AI)	الدماغ يدمج الشعور في التفسير والسلوك؛ والنظام الصنعي يحاكي الاستجابة الوجدانية عبر تحليل نبرة الصوت أو الوجه.	تحسين التفاعل الإنساني–الآلي وجعل الأنظمة أكثر إنسانية في التواصل.
كفاءة الطاقة الحيوية	الحوسبة العصبية الحيوية (Neuromorphic Computing)	الدماغ يستهلك طاقة منخفضة مقارنة بحجمه وقدرته الحسابية؛ والذكاء الصنعي يسعى لمحاكاة هذا الاقتصاد في الطاقة عبر رقاقات تحاكي الدماغ.	إنشاء أنظمة ذكاء صنعي فعالة طاقيًا، قادرة على العمل في الزمن الحقيقي بقدرات معالجة عالية.
الوعي الذاتي (Self-Awareness)	الانعكاس الإدراكي الاصطناعي (Meta-Learning / Self-Monitoring)	الدماغ يراجع ذاته باستمرار عبر التفكير الميتا–إدراكي؛ والنظام الصنعي يطبّق آليات تقييم ذاتي لأدائه وتصحيح سلوكه.	تمهيد الطريق نحو نماذج قادرة على تحسين ذاتها دون إشراف مباشر، وزيادة وعيها السياقي بمهامها.

جدول 4 جدول تركيبي موحد يلخص أثر كل من الأسس المعرفية الثلاثة على العملية التصميمية المعمارية المصدر(اعداد الباحث)

العنوان الفرعي	المحور الإدراكي المركزي	آلية التكامل المعرفي بين الإدراك الإنساني والذكاء الصنعي	الأثر المباشر على العملية التصميمية	انعكاسه في المراحل التصميمية (تحليل – توليد – تقييم)	القيمة المضافة في الوعي التصميمي
الأساس الأول **الإدراك الإنساني كأساس لبناء منظومة الذكاء الصنعي**	تحويل مبادئ الإدراك البشري إلى بنى خوارزمية تمكّن الذكاء الصنعي من تحليل المعطيات كما يفعل الإنسان.	الذكاء الصنعي يتبنى آلية "الاستقبال – المعالجة – الاستجابة" على غرار الدماغ البشري، مما يتيح له تمثيل المعرفة التصميمية بطريقة مشابهة للإدراك.	تطوير القدرة على تحليل المشكلات التصميمية المعقدة بناءً على البيانات والسياقات بدلاً من الحدس وحده.	**التحليل :**تنظيم البيانات المعمارية في شبكات معرفية. **التوليد :**إنتاج بدائل تصميمية منطقية قائمة على الأنماط المستخلصة **التقييم :**مطابقة الحلول لمتطلبات المستخدم الإدراكية.	رفع مستوى **الوعي التحليلي** للمصمم وتوسيع قدرته على الربط بين المعطيات الوظيفية والمعرفية.
الأساس الثاني **مقارنة بين الإدراك البيولوجي والإدراك الصنعي**	التمييز بين الدوافع والمعالجات في كل من الإدراكين مع البحث عن نقاط الالتقاء لإنتاج تصميم متوازن بين الحس الإنساني والمنطق الآلي.	إدخال البعد الثقافي والوجداني في الأنظمة الذكية وتحويل التحليل الرقمي إلى فهم رمزي للبيئة والمعنى.	توليد تصاميم تحافظ على هوية المستخدم الثقافية وتستجيب للمفاهيم الإنسانية دون فقدان الكفاءة التقنية.	**التحليل :**إدماج البيانات الاجتماعية والثقافية **التوليد :**ابتكار حلول تحقق التكامل بين الشكل والرمز **التقييم :**قياس التجربة الشعورية للمستخدم لا الأداء فقط.	خلق **توازن معرفي** بين الحس الإنساني والتحليل الآلي، وتعزيز مفهوم العمارة كوسيط إدراكي مشترك.
الأساس الثالث **دور علم الأعصاب الإدراكي في تطوير الذكاء الصنعي**	محاكاة البنية العصبية للدماغ من خلال الشبكات العميقة وآليات الانتباه، وربطها بآليات التعلم المعماري.	بناء أنظمة تصميمية قادرة على التعلّم من التفاعل مع المستخدم وتكييف الفراغ وفق المعطيات الإدراكية.	إنشاء بيئات تصميمية ذكية ذات وعي تشغيلي يمكنها فهم تغيرات المستخدم والبيئة بشكل مستمر.	**التحليل :**تحديد النقاط الإدراكية الحرجة (الرؤية، الحركة، الصوت). **التوليد :**تصميم حلول تستجيب للأنماط السلوكية المتكررة. **التقييم :**مقارنة أنماط الانتباه .	تمكين **العمارة التفاعلية** التي تتطور بناءً على التعلم من التجربة، وتعيد تعريف العلاقة بين المستخدم والفراغ.

يُظهر هذا الجدول أن الأسس المعرفية الثلاثة تتكامل في تشكيل إطار إدراكي موحّد داخل العملية التصميمية المعمارية، حيث يُسهم الإدراك الإنساني في منح الذكاء الصنعي **المعنى والغاية**، بينما يمنح الذكاء الصنعي الإدراك الإنساني **القدرة على التحليل الواسع والدقة الحسابية**. ومن خلال هذا التبادل تنشأ **منظومة تصميمية إدراكية** توحّد التجربة الإنسانية بالقدرة التحليلية للآلة، فتتحقق عمارة واعية قادرة على التطور ذاتيًا ضمن نطاق الإدراك المشترك بين الإنسان والنظام الصنعي.

2-4 نموذج :PAIR الحلقة التبادلية بين الإدراك الإنساني والذكاء الصنعي (نموذج دمج مُنشأ خصيصا للبحث)

يُعدّ نموذج PAIR (Perception–AI Reciprocity) إطارًا معرفيًا جديدًا اقترحه هذا البحث بوصفه محاولة لتأسيس منهج علمي منظّم يفسّر **عملية التبادل المعرفي والإدراكي بين الإنسان والآلة داخل العملية التصميمية المعمارية** .نشأ هذا المصطلح من الحاجة إلى وجود صيغة أكاديمية واضحة توضّح آلية التفاعل المستمر بين الإدراك الإنساني بوصفه مصدرًا للمعنى، والإدراك الصنعي بوصفه أداة تحليلية واستقرائية قادرة على إعادة تفسير المعطيات التصميمية بمنطق خوارزمي. [32]

يرتكز **النموذج التبادلي (PAIR)** على فرضية أن العلاقة بين الإنسان والذكاء الصنعي في المجال المعماري لا يمكن أن تكون علاقة خطّية أو أحادية الاتجاه، بل يجب أن تكون **علاقة تبادلية** تتضمن تدفقًا ثنائيًا للمعرفة والإدراك. فالإنسان يزوّد النظام الذكي بالمدخلات القائمة على الخبرة الحسية والرمزية، بينما يقوم الذكاء الصنعي بتحليل تلك المدخلات واستنباط الأنماط الخفية منها، ثم يعيد صياغتها في مخرجات جديدة تُغني وعي المصمم وتوسّع أفق إدراكه للمكان والمعنى. هذه الدورة المتكررة تمثّل جوهر مفهوم "التبادل الحقيقي" الذي يسعى هذا النموذج لتأطيره علميًا. [30]

يهدف **النموذج التبادلي (PAIR)** إلى بناء **حلقة معرفية متكاملة** يُسهم فيها الطرفان على نحو متوازن. فالإدراك الإنساني يمنح المنظومة قيمها الثقافية والعاطفية، في حين يقدّم الإدراك الصنعي الدقة الحسابية والقدرة على معالجة الكمّ الكبير من البيانات التصميمية. ومن خلال هذا التفاعل تتشكل بيئة إدراكية مشتركة تمهّد لمرحلة جديدة من التفكير التصميمي القائم على الوعي المزدوج الإنساني–الخوارزمي. [30]

4-2-1 طبقات النموذج التبادلي (PAIR)

A. **طبقة الإدراك الإنساني:** تشكل الأساس البيولوجي–المعرفي للدورة؛ وفيها تعمل قنوات الحسّ مع الانتباه الانتقائي والذاكرة العاملة وطويلة الأمد على تشكيل تمثيلات ذات معنى، تتأثر بالانفعال والخبرة والسياق الثقافي. [30]

B. **طبقة التمثيل الدلالي المشترك:** التي تُحوِّل الخبرة البشرية إلى صيغ قابلة للحوسبة عبر خرائط دلالية ورسوم معرفة مكانية تربط "الإتاحة" الإدراكية بالأهداف والقيود. [28]

C. **طبقة التحليل والتوليد الخوارزمي:** تعمل على تعلّم السمات التمثيلية من البيانات الهيكلية والسلوكية، واستخراج الأنماط المكانية والزمنية، ثم توليد بدائل مقيدة بالقيود الدلالية. [23]

D. **طبقة المواءمة والتواصل الإدراكي:** تؤمن أرضية الفهم المشترك بين الإنسان والنظام، عبر إخراجات قابلة للتفسير (خرائط انتباه، تفسيرات محلية وعالمية) وقنوات حوارية تسمح بالمراجعة والتوجيه. [30]

E. **طبقة الارتجاع والتعلّم التكيفي:** تغلق الحلقة عبر قياسات بشرية وخوارزمية تُعاد حقنها في النموذج: تتبّع العين، زمن العثور على المقصد، أخطاء التوجيه، الرضا الشعوري، إلى جانب مقاييس الدقة والتعميم وقابلية التفسير وكلفة الاستدلال. [23]

4-2-2 التحولات الطارئة على العملية التصميمية باستخدام النموذج التبادلي PAIR

يشكّل إدخال النموذج التبادلي (**PAIR**) في العملية التصميمية تحوّلًا جوهريًا في فهم التصميم المعماري بوصفه فعلًا إدراكيًا ومعرفيًا لا مجرد ممارسة مادية. فحين تتداخل آليات الإدراك الإنساني مع الخوارزميات الصنعية في حلقة تبادلية واعية، تتحول العملية التصميمية من مسار خطي قائم على التسلسل (تحليل–توليد–تقييم) إلى **منظومة ديناميكية تكيفية** تعمل وفق مبدأ التفاعل المستمر بين الخبرة الإنسانية والمعالجة الخوارزمية. هذا التحول يفرض إعادة نظر في جميع مكونات العملية التصميمية، بدءًا من دور المصمم ووصولًا إلى طبيعة الفكرة ذاتها بوصفها كيانًا متطورًا لا نهائيًا في الزمان والمكان. [26]

جدول 5 جدول يُلخّص التحديات والفرص الناتجة عن إدخال نموذج (PAIR)في العملية التصميمية المصادر[23]-[24]-[30]-[35]-[36] (تنظيم الباحث)

المجال التحولي	التحديات الرئيسة	الفرص الممكنة
البنية المعرفية للتفكير التصميمي	تضارب آليات التفكير بين الحدس الإنساني والمنطق الخوارزمي.	تكوين عقل تصميمي مزدوج يجمع بين الإدراك الحسي والقدرة التحليلية.
الدور المهني للمصمم المعماري	احتمال تراجع سلطة القرار البشري أمام الأنظمة الذكية.	تعزيز دور المصمم كمشرف معرفي يوجّه النظام دون أن يخضع له.

منهجية العملية التصميمية	صعوبة الحفاظ على الاتساق داخل دورة تبادلية مستمرة من التحليل والتوليد والتقييم.	تحقيق تصميمات تكيفية متطورة قادرة على التطور عبر الزمن.
المعنى والرمزية المعمارية	خطر فقدان البعد الثقافي أمام الكمّ الهائل من البيانات الكمية.	تحويل الرموز والمعاني الإنسانية إلى معايير دلالية قابلة للقياس دون تشويه معناها.
الزمن التصميمي	تسارع العمليات إلى حد يهدد العمق التأملي في اتخاذ القرار.	اختصار دورة التطوير وتمكين المصمم من استكشاف احتمالات متعددة بزمن أقل.
البيئة التعليمية والمعرفية	ضعف المناهج الأكاديمية في دمج الإدراك العصبي مع الذكاء الصنعي في تعليم التصميم.	تأسيس جيل جديد من المصممين يمتلك الوعي التبادلي بين الإدراك والذكاء الصنعي.
المسؤولية الأخلاقية والتقييم الإنساني	احتمالية انحراف القرارات التصميمية عند غياب الإشراف القيمي البشري.	ترسيخ دور الإنسان كضابط أخلاقي في دورة اتخاذ القرار ضمن بيئة الذكاء الصنعي.
الإنتاج المعماري والتطبيق العملي	تحدي دمج الأنظمة الذكية في مراحل التنفيذ دون فقدان المرونة التصميمية.	تطوير أدوات ذكية تضمن جودة التنفيذ وتغذية النموذج بخبرة الاستخدام الواقعية.
التفاعل الإنساني–الآلة في بيئة العمل التصميمي	خطر الاعتماد المفرط على أدوات الذكاء الصنعي وانخفاض مهارات التفكير النقدي.	بناء بيئة عمل تشاركية قائمة على التكامل بين الذكاءين البشري والصنعي.
الاستدامة والوعي البيئي	احتمال توظيف النماذج الذكية لتحسين الأداء التقني فقط دون الوعي البيئي الكافي.	دمج التحليل الخوارزمي مع القيم البيئية لتوليد تصميمات أكثر توازناً واستدامة.

4-2-3 البنية التشغيلية المقترحة للنموذج داخل بيئة التصميم المعماري (اقتراح الباحث بناء على ما سبق)

يمثل هذا العنوان الانتقال من الحيّز النظري إلى الحيّز التشغيلي في تطبيق النموذج التبادلي **(PAIR)** داخل بيئة التصميم المعماري، أي الانتقال من مفهوم الإدراك التبادلي بوصفه إطارًا فكريًا إلى كونه **نظامًا فعليًا يعمل ضمن مراحل العملية التصميمية.**

تُبنى البنية التشغيلية للنموذج على مبدأ التكامل بين المعرفة الإدراكية البشرية والخبرة التحليلية الخوارزمية، بحيث يصبح تشغيل النظام ليس مجرد استخدام أداة رقمية، بل **إدارة لتفاعل إدراكي–معرفي مستمر** يُترجم الخبرات الحسية والرمزية للمصمم إلى بيانات قابلة للمعالجة، ثم يُعيد تحويل النتائج التحليلية إلى مدخلات تصميمية ذات معنى.

جدول 6 خلاصة متطلبات تشغيل النموذج من جانب المصمم الإنساني ومن جانب محرك الذكاء الصنعي، في ضوء المعرفة الإدراكية والعلمية المكتسبة من الفصول السابقة المصدر (اعداد الباحث)

الجانب التشغيلي	المتطلبات الأساسية	الوظيفة المعرفية والإدراكية	نقاط التلاقي بين الإدراك الإنساني والإدراك الصنعي	أمثلة تطبيقية في بيئة التصميم المعماري
جانب المصمم الإنساني	**1.إدخال المعطيات الإدراكية والمعرفية**	ترجمة الانطباعات الحسية، المشاعر، والرموز الثقافية إلى معطيات أولية قابلة للفهم الخوارزمي.	يزوّد الإدراك الإنساني النظام بالمعنى، بينما يترجم الإدراك الصنعي هذا المعنى إلى بيانات كمية.	يرسم المصمم المساقط المبدئية لقاعة مطالعة أكاديمية تعبّر عن الانفتاح والهدوء باستخدام خطوط ناعمة ومسارات ضوء.
	2.الوعي بالنية التصميمية والغاية الإنسانية	توجيه العملية التصميمية بقيم أخلاقية وجمالية ترتبط بالاحتياجات المعرفية للإنسان.	يتحول الوعي الإنساني إلى مرجع قيمي تضبط به الخوارزميات اتجاه عملها.	يحدّد المصمم هدف التصميم بتحقيق راحة إدراكية تحفّز التركيز العلمي للباحثين.
	3.القدرة على قراءة المخرجات وتحليلها نقديًا	تقييم المقترحات التوليدية بوصفها احتمالات مفتوحة لا نتائج نهائية.	يستخدم الإنسان التحليل النقدي، بينما يقدّم الذكاء الصنعي البدائل الممكنة.	يختار المصمم بين ثلاثة حلول ضوئية تولّدها الخوارزمية بناء على توازن الإضاءة والظل.
	4.تنظيم الحوار التفاعلي مع النظام	إدارة التفاعل اللحظي مع الذكاء الصنعي لضمان وضوح التواصل وفهم المقاصد المتبادلة.	الإدراك الإنساني يصيغ اللغة، والإدراك الصنعي يفسرها ويعيد صياغتها بمعايير قابلة للقياس.	يصحّح المصمم فهم النظام لعبارة "إضاءة محايدة" لتشير إلى الضوء المنتشر لا الأبيض البارد.
	5.تغذية الذاكرة المشتركة بالتعديلات والتجارب	إدخال الخبرة المكتسبة بعد كل تجربة تصميمية لتطوير الأداء الإدراكي للنموذج.	المصمم يقدّم الخبرة، والنظام يوثقها كمعلومة للتعلّم التكيفي.	بعد تنفيذ القاعة، يُدخل المصمم ملاحظات المستخدمين حول الصوت والضوء ليطور النظام اقتراحاته اللاحقة.
	6.الالتزام بالتحكم القيمي والأخلاقي في القرار التصميمي	ضمان بقاء العملية منضبطة بالقيم الإنسانية، بعيدًا عن الانحياز الحسابي.	الإدراك الإنساني هنا هو المعيار الأعلى الذي يُعيد تقييم نواتج الذكاء الصنعي.	يرفض المصمم حلولًا مقترحة تقلل التفاعل الاجتماعي رغم فعاليتها الطاقية العالية.
جانب محرك	**1.تحليل البيانات الإدراكية والمعرفية المدخلة**	استقبال البيانات من المصمم (صور، رسومات، أوصاف لغوية) وتحليلها ضمن نموذج معرفي متعدد الطبقات.	يلتقي الإدراكان عند تحويل التجربة الإنسانية إلى بيانات قابلة للمعالجة.	يحلل النظام خطوط السكتش لتحديد اتجاهات النظر ومراكز الجذب البصري في الفراغ.
	2.بناء التمثيل الدلالي الموحد (Semantic Model)	إنشاء طبقة معرفية تربط المفاهيم الإنسانية (هدوء، تركيز، انفتاح)	الإدراك الصنعي يستعير الرمزية من الإدراك الإنساني	يترجم النظام مفهوم "الخصوصية" إلى مؤشرات عن الارتفاعات

الذكاء الصنعي		بمعايير كمية (إضاءة، ضوضاء، مساحة).	ويعيد تمثيلها خوارزميًا.	ونِسَب الانفصال البصري بين المقاعد.
	3.التوليد التصميمي الخوارزمي (Generative Design)	ابتكار حلول تصميمية متعددة عبر خوارزميات تعلم عميق تراعي القيود الإدراكية والقيم الجمالية.	الإنسان يقدّم الهدف الإدراكي، والذكاء الصنعي يولّد البدائل المحكومة بتلك القيم.	يولّد النظام عدة نماذج لتوزيع الضوء والمداخل ويقارنها بمعيار الراحة البصرية المحدد مسبقًا.
	4.التفسير البصري واللغوي للمخرجات	إنتاج مخرجات قابلة للفهم الإنساني من خلال الخرائط، الجداول، والنصوص التوضيحية.	الإدراك الصنعي يشرح، والإدراك الإنساني يتحقق من المعنى.	يعرض النظام خريطة حرارية توضّح تراكمات الضوء ومناطق الظلال داخل القاعة.
	5.التعلّم التكيفي المستمر من سلوك المصمم	تحديث أوزان النموذج استنادًا إلى قرارات المصمم وملاحظاته لتطوير مستوى التوافق الإدراكي.	يحدث تبادل مستمر للمعلومات: الإنسان يُعلّم والنظام يتطور.	يلاحظ النظام تكرار تفضيل المصمم للضوء الجانبي فيقترحه في المشاريع التالية تلقائيًا.
	6.حفظ المعرفة التبادلية وتوسيعها	تكوين ذاكرة معرفية تفاعلية تخزن الخبرات المشتركة لتُستخدم في مشروعات مستقبلية.	تتوحد الخبرة الإنسانية مع الخبرة الخوارزمية في قاعدة بيانات إدراكية واحدة.	يستخدم النظام بيانات مشاريع سابقة لتحديد أنماط الإضاءة المفضلة لدى الباحثين في القاعات المشابهة.

3-4 نموذج الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان للتصميم المعماري (نموذج دمج مُنشأ خصيصا للبحث)

(Human-Centered Artificial Intelligence for Architectural Design – HCAI-AD)

يشكّل الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان **(HCAI)** أحد أكثر الاتجاهات تطورًا في الفكر المعاصر للذكاء الصنعي، إذ يسعى إلى إعادة بناء العلاقة بين الإنسان والنظام التقني على أساس **التمكين الإدراكي والمعرفي**، لا على أساس الاستبدال أو الأتمتة الكاملة. جوهر هذا التوجه أن الذكاء الصنعي ليس غاية في ذاته، بل وسيلة لتوسيع قدرات الإنسان العقلية والحسية عبر نظام يعي القيم الإنسانية، ويفهم اللغة والسياق والثقافة، ويشارك في إنتاج المعرفة بدلاً من احتكارها.

يرتكز مفهوم **(HCAI)** (Human–Centered Artificial Intelligence) على أن الإدراك البشري هو المرجعية المركزية التي يجب أن يُبنى عليها كل نظام ذكي، فبدون إدراك الإنسان لا يمكن للذكاء الصنعي أن يمتلك معنى حقيقيًا أو غاية وظيفية. لذلك، يُصمم الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان

ليكون **تفاعليًا وتفسيريا**، بحيث يمكن للمستخدم أن يفهم منطق النظام ويفسر قراراته، ويشارك في صياغة المخرجات بدل أن يتلقاها سلبًا. هذا النوع من الذكاء يُدار عبر عمليات تعلم تكيفي تراعي حدود الإدراك الإنساني ومبادئه الأخلاقية والمعرفية، ما يجعله امتدادًا للعقل الإنساني لا نقيضًا له. [21]

يُعدّ هذا الاتجاه بمثابة **ثورة رقمية ثانية** في تصميم أنظمة الذكاء الصنعي، وفقًا لما أورده *Ben Shneiderman2020*، إذ ينقل مركز الثقل من الخوارزمية إلى الإنسان. يقدّم الباحث إطارًا ثلاثي المحاور لهذا التوجه:

- **إطار عمل ثنائي الأبعاد** يربط بين مستويات عالية من التحكم البشري ومستويات عالية من الأتمتة، ما يسمح للإنسان بالاحتفاظ بدور فاعل حتى في الأنظمة المعقدة.
- **تحول لغوي ومعرفي** في وصف الأنظمة، من اعتبارها كيانات ذكية مستقلة إلى أدوات قوية تعمل بخضوع لإرادة الإنسان وتحت توجيهه المعرفي.
- **هيكل حوكمة ثلاثي المستويات** يضمن موثوقية الأنظمة عبر مستويات التطوير البرمجي، والإدارة المؤسسية، والاعتماد المهني على مستوى الصناعة. [21]

من خلال هذا الإطار، يصبح الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان وسيلة لتحقيق **الكفاءة الذاتية البشرية والإبداع والمسؤولية الاجتماعية**، فهو لا يسعى فقط إلى تحسين الإنتاجية، بل إلى تعزيز القيم الإنسانية مثل العدالة، وحماية الخصوصية، والأمن الرقمي، والحفاظ على البيئة. إنه ذكاء يسعى لتكامل أخلاقي وتقني يضع الإنسان في مركز كل عملية حسابية، ويجعل التقنية أداة لإثراء التجربة البشرية لا لتقليصها. [21]

4-3-1 طبيعة المدخلات المغذّية لنماذج الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان الاعتمادية (HCAI)

إن الهدف من تغذية النماذج بهذه المواد هو **تعليم النظام كيفية التفكير بالمعنى** .فعندما يتعلم الذكاء الصنعي من الشعر أو الفلسفة، فهو لا يكتسب مهارة لغوية أو منطقية فقط، بل يدخل في عملية تعلم عميق تتعلّق بالترابط السياقي بين المفاهيم، والانزياح الدلالي، والمفارقة الرمزية، وهي آليات أساسية

لفهم السلوك الإنساني المعقد. بهذا، تتحول المدخلات الوجدانية إلى **مصفوفات معرفية** تُغذي المستويات العليا من التعلم العميق، فتُسهم في صياغة خوارزميات قادرة على التعامل مع الغموض والاحتمال كما يتعامل العقل البشري. [22]

جدول 7 يوضّح مقارنة دقيقة ومبسطة بين طبيعة المدخلات في الذكاء الصنعي التقليدي (الغير مختص) والذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان المصدر (اعداد الباحث)

مجال المقارنة	الذكاء الصنعي غير المتخصص (Traditional AI)	الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان (Human-Centered AI - HCAI)
طبيعة البيانات	بيانات رقمية كمية (صور، أرقام، نصوص خام) تُعالج عبر خوارزميات إحصائية.	بيانات معرفية ووجدانية تمثل النتاج الفكري والثقافي والفني للإنسان.
مصدر المدخلات	مستودعات بيانات عامة، إنترنت، سجلات معاملات، أنظمة مراقبة.	مصادر مختارة بعناية: نصوص فلسفية، روايات، لوحات فنية، تصميمات معمارية رمزية.
الغرض من التغذية	تحسين الأداء الحسابي وزيادة دقة النماذج في المهام المحددة.	تعميق الفهم الإدراكي للسلوك الإنساني وبناء وعي اصطناعي يتفاعل مع القيم والمعاني.
طبيعة التعلم	تعلّم آلي إحصائي يعتمد على الأنماط الكمية والعلاقات الرياضية.	تعلّم معرفي عميق قائم على المعنى، والسياق، والرموز، والعلاقات الوجدانية.
التعامل مع اللغة	معالجة لغوية آلية تُركّز على البنية النحوية والدلالية السطحية.	فهم لغوي إدراكي يتعامل مع الانزياح، والرمز، والنية، والمعنى الثقافي.
مفهوم الجودة	يقاس بمعدلات الخطأ والدقة الإحصائية.	يقاس بقدرة النظام على الفهم، والتفاعل، وتوليد معنى متكامل مع الإدراك الإنساني.
درجة الصفاء المعرفي للمدخلات	منخفضة، بسبب ضخامة البيانات وتنوّعها غير المصفّى.	عالية، نتيجة عملية "الانتقاء المعرفي" التي تقتصر على المضمون الإنساني الخالص.
دور الإنسان في إعداد البيانات	محدود في مرحلة التجميع والإشراف التقني.	محوري في اختيار المضمون وتحديد القيم والمعايير الإنسانية المغذية للنظام.
مخرجات النظام	نتائج تحليلية أو توليدية ذات طابع وظيفي أو إجرائي.	نتائج معرفية–إدراكية تعبّر عن تكامل الحس الإنساني والوعي الخوارزمي.

الأثر على العملية التصميمية	يدعم اتخاذ القرار الهندسي عبر الحساب والمعايير التقنية.	يثري عملية التصميم عبر فهم النية المعمارية والبعد الإنساني للفراغ والوظيفة.

4-3-2 المدخلات الخاصة بالعملية التصميمية لنماذج الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان (HCAI-AD)

تستند النماذج الإدراكية في الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان ضمن المجال المعماري إلى مدخلات تتجاوز المعطيات الشكلية والهندسية التقليدية، إذ تُغذّى بأنماط معرفية–سيكولوجية تمثّل جوهر التجربة الإنسانية داخل الفضاء المعماري. هذه المدخلات لا تهدف إلى وصف الشكل أو تحديد الوظيفة، بل إلى **ترجمة السلوك الإدراكي للإنسان ومؤشرات الوعي الحسّي والعاطفي والمعرفي** إلى بيانات قابلة للمعالجة الخوارزمية، بما يتيح للذكاء الصنعي فهماً أعمق للكيفية التي يُدرك بها الإنسان المكان ويتفاعل معه. [33]

يُعدّ الإدراك الإنساني في بيئة التصميم المعماري منظومة متكاملة بين الحواس والتجربة والذاكرة، ولهذا تتنوّع المدخلات الخاصة بالنماذج الإدراكية للنموذج المعماري الاعتمادي (HCAI-AD) بحسب الجوانب السيكولوجية التي تعبّر عنها. ويمكن تصنيفها في أربعة محاور أساسية مترابطة:

– 4-3-2-1 المدخلات الأساسية في نماذج الذكاء الصنعي الاعتمادية المتخصص بالإنسان للتصميم المعماري(HCAI-AD)

أولاً – المدخلات الحسيّة الانطباعية: تمثل هذه الطبقة من المدخلات القناة الأولى لفهم علاقة الإنسان بالفراغ من خلال الإحساس المباشر بالعناصر المادية كالضوء والظل، واللون، والملمس، والصوت، ودرجة الحرارة.[33]

ثانيًا – المدخلات المعرفية–الذهنية: تعكس هذه المدخلات قدرة النظام على فهم العمليات العقلية العليا مثل الانتباه، التمييز، الذاكرة، والتعلّم من التجربة. [31]

ثالثًا – المدخلات الشعورية–الوجدانية: تشمل الانفعالات العاطفية التي يختبرها المستخدم في الفضاء المعماري، مثل الشعور بالانتماء، الراحة، الإلهام، أو العزلة. يتم تحليل هذه البيانات عبر أدوات تتبع فيسيولوجية (كاستشعار النبض، أو تتبع حركة العين) أو عبر توصيفات لفظية وسلوكية. ويُستخدم هذا النمط من المدخلات لتدريب النماذج على **فهم العلاقة بين الانفعال الإنساني والتكوين المكاني.** [24]

رابعًا – المدخلات الاجتماعية–الثقافية: ترتبط هذه الفئة من المدخلات بالسياق الاجتماعي والثقافي الذي يوجّه سلوك المستخدم داخل المكان، وتشمل العادات، والرموز، والطقوس، ومعايير الخصوصية. [29]

جدول 8 يوضّح المدخلات الأساسية الخاصة بالعملية التصميمية في نماذج الذكاء الصنعي الاعتمادية المتخصص بالإنسان للتصميم المعماري (HCAI-AD) ودورها في تعزيز الإدراك الإنساني المصدر [21]-[33]-[35]-[26]-[28] (اعداد الباحث)

المحور السيكولوجي	نوع المدخلات الدقيقة	الوظيفة الإدراكية في النموذج-(HCAI AD)	أثر المدخل على تعزيز الإدراك الإنساني
المحور الحسي–الانطباعي	• بيانات ضوئية (شدة الضوء – نوع المصدر – توزيع الإضاءة) • بيانات لونية (تدرجات – تشبع – تباين) • بيانات صوتية (الضجيج – الصدى – التردد) • درجات الحرارة والرطوبة والملمس المادي للسطوح.	تمكين النظام من فهم **الانطباع الأولي** الناتج عن التجربة الحسية للمكان وربطها بالاستجابة الشعورية للمستخدم.	يساعد الذكاء الصنعي على توليد بيئات متوازنة بصريًا وسمعيًا تحفّز **الهدوء الإدراكي والتركيز الذهني.**
المحور المعرفي–الذهني	• بيانات تتعلق بالانتباه البصري ومراكز التركيز . • أنماط الحركة داخل الفراغ . • مدة البقاء في نقاط معينة من القاعة. • التفاعل مع عناصر مثل الطاولات، النوافذ، أو الشاشات.	تحليل آلية **توزيع الانتباه** لدى المستخدم واستيعاب الطريقة التي يُبنى بها الفهم الذهني للمكان.	تطوير استراتيجيات تصميمية تدعم **التفكير المنطقي والهدوء المعرفي** لدى المستخدمين ذوي النشاط الذهني العالي.
المحور الشعوري–الوجداني	• بيانات تعبير وجهي وإيمائي (تتبع تعابير الارتياح أو التوتر) . • استجابات فسيولوجية (معدل نبض، تفاعل جلدي) • بيانات لغوية من المقابلات أو تقييمات المستخدمين العاطفية.	بناء تمثيل خوارزمي للعلاقة بين **المزاج الإنساني والبيئة المكانية** وتحديد محفّزات الراحة أو القلق.	تمكين النظام من اقتراح حلول تصميمية تستجيب للانفعال وتعيد تحقيق **الاتزان العاطفي والإدراكي** للمستخدم.

المحور الاجتماعي– الثقافي	• بيانات حول عادات القراءة والعمل الجماعي والفردي . • رموز السلوك الثقافي (مستويات الخصوصية، التفاعل الاجتماعي المقبول) • معايير جمالية موروثة (الألوان، النسب، التقاليد البصرية المحلية).	إدخال **الوعي الثقافي والاجتماعي** ضمن خوارزمية الإدراك، ما يسمح بفهم التباينات الحضارية في تجربة المكان.	يساهم في تحقيق توافق بين **هوية المستخدم الثقافية** وطبيعة الفضاء، مما يعزز الإحساس بالانتماء والاحترام المتبادل.
المحور الإدراكي– القيمي (التكاملي)	• بيانات حول القيم الأخلاقية والسلوك المعرفي المثالي في بيئة البحث • أنماط استخدام الطاقة، الموارد، والمواد المستدامة . • استجابات المستخدم لقيم الهدوء والنظام والمسؤولية.	تمكين النموذج من ربط **الإدراك بالمعنى الأخلاقي والبيئي** لتصميم بيئة تحفّز السلوك المسؤول والمستدام.	توليد حلول تصميمية تُشرك الوعي الإنساني في بعده القيمي، فتجعل التصميم وسيلة لترسيخ **المسؤولية والالتزام** تجاه الآخرين والبيئة.

تحليل الجدول 31: يمثل هذا التوزيع المنهجي للمدخلات الإطار التشغيلي الذي يغذي الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان في المجال المعماري. فكل محور من هذه المحاور يُعدّ حلقة في سلسلة الإدراك الكلي التي تبدأ بالإحساس وتنتهي بالوعي الأخلاقي. من خلال إدخال هذه البيانات المترابطة، يستطيع النظام إدراك الإنسان لا كعنصر مستخدم، بل كـ **كائن مدرك يمتلك عاطفة، وذاكرة، ومعرفة، وثقافة، وقيم**، وبذلك تتحول العملية التصميمية إلى فعل معرفي متبادل بين الذكاءين الإنساني والصنعي.

4-3-2-2 – المدخلات العميقة في نماذج الذكاء الصنعي الإعتمادية المتخصص بالإنسان للتصميم المعماري (HCAI-AD)

تمثّل **المدخلات العميقة** المستوى الأكثر تجريدًا وعمقًا في منظومة تغذية الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان، إذ لا تُعنى بالبيانات الحسية أو الشعورية المباشرة، بل بما يمكن تسميته **التراث المعرفي الموجِّه للوعي الإنساني** .هذه المدخلات تشكّل البنية الخلفية التي تمنح النظام ثباته المعرفي واستقراره القيمي، وتؤدي دور **صمام الأمان** الذي يضمن توازن العملية التصميمية بين الجانب التقني والجانب الإنساني. فمن دونها، يتعرّض الذكاء الصنعي لخطر التحول إلى أداة صمّاء مفرطة في الدقة الحسابية، لكنها فقيرة في الفهم، عاجزة عن إدراك عمق التجربة الإنسانية التي أفرزت العمارة عبر التاريخ. [30]

تنبثق هذه المدخلات من **جذور الفلسفة المعمارية**، التي تُعدّ الإطار المفاهيمي الأشمل لفهم المعنى والغرض من التشكيل المعماري. فعندما يُغذّى الذكاء الصنعي بالنظريات الكبرى في العمارة من الكلاسيكية التي تقدّس التناسب، إلى الحداثة التي تُعلي من الوظيفة، إلى ما بعد الحداثة التي تحتفي بالرمز والهوية فهو لا يتعلم أشكالًا أو أساليب، بل يتعلّم **طرائق تفكير الإنسان في المكان**. [32]

ومن أهم ركائز هذه المدخلات أيضًا **المرجعيات الفكرية والاجتماعية** التي تُعنى بعلوم الاجتماع، والأنثروبولوجيا، والتفكير الجمعي. فالتصميم المعماري لا يتم في فراغ، بل في إطار مجتمع يمتلك قيمًا، وتقاليد، وهياكل تفكير تحدد سلوك الأفراد والجماعات. عندما يتغذى النظام بمدخلات مستمدة من دراسات الثقافة والسلوك الاجتماعي، يصبح أكثر قدرة على إدراك العلاقة بين **الفرد والمجتمع والبيئة المبنية**. [26] وبذلك يمكن القول إنّ المدخلات العميقة هي **الذاكرة الفلسفية للذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان**.

جدول 9 يوضّح طبيعة المدخلات العميقة في نماذج الذكاء الصنعي الاعتمادية المتخصص بالإنسان (HCAI-AD)مع تحليل مزدوج لأثر كل مدخل على النموذج الإدراكي ذاته وعلى العملية التصميمية
المصدر (اعداد الباحث)

نوع المدخل العميق	طبيعة المدخل ومصدره	أثره على نموذج-HCAI AD)	أثره على تصميم قاعة مطالعة أكاديمية ضمن مكتبة مركزية
الفلسفات والنظريات المعمارية	نصوص تأسيسية في الفكر المعماري (مثل فيتروفيوس، لوكوربوزييه، نوري برهاد،)، تمثل الخلفية الفلسفية لفهم الغاية من العمارة.	**تمنح النموذج بنية معرفية معيارية تتيح له تقييم الحلول وفق مقاصد إنسانية وليس معايير شكلية. تساعده على تطوير "حس معماري" قائم على المعنى والغاية.**	يُترجم الذكاء الصنعي مفاهيم مثل "الوظيفة" و"الجمال" إلى مقاييس تصميمية متوازنة بين الانفتاح والإنتاجية، فيقترح توزيعًا هندسيًا يحقق الانسجام بين الشكل والغرض الأكاديمي.
تحليل النماذج الحضارية التاريخية	دراسات تحليلية للبنى والفضاءات من الحضارات القديمة (الإسلامية، الإغريقية، اليابانية، الفرعونية...) التي تُمثل الذاكرة الإدراكية للإنسان عبر العصور.	**يزوّد النموذج بقدرة على فهم القيم الزمنية في التصميم (التناسب، الإيقاع، القداسة، الانتماء). يساعده على بناء وعي سياقي متجذر ثقافيًا.**	يقترح النظام عناصر مستوحاة من العمارة حسب التوجه كالتدرج في الإضاءة أو الفتحات المقوسة لتوفير بيئة تأملية هادئة تحاكي احترام المعرفة وقدسيتها.
جذور نشأة التيارات المعمارية	بيانات تحليلية حول المدارس الفكرية في العمارة (الحداثة، ما بعد الحداثة، التفكيكية، الاستدامة...).	**تمكّن النموذج من فهم دوافع التحولات الفكرية، مما يمنعه من الجمود المعرفي أو تبني اتجاه واحد. يتيح له الجمع**	يوازن النظام بين مفاهيم الحداثة (الوظيفة والتقنية) ومفاهيم الاستدامة (الإنسان والطبيعة)، فيقترح مواد محلية مستدامة وتقنيات تهوية طبيعية.

		بين التقنيات الحديثة والقيم الإنسانية.	
المراجع الاجتماعية والثقافية	دراسات من علم الاجتماع والأنثروبولوجيا عن التفكير الجمعي والعلاقات الاجتماعية داخل الفضاءات العامة.	**تُمكّن النموذج من تحليل الإدراك الجمعي والتفاعل الإنساني في المكان، مما يعزز فهمه لمفاهيم الخصوصية والانتماء والتواصل.**	يوجّه النظام لتصميم فراغات مرنة تتكيف مع الاستخدامات الفردية والجماعية، مع مناطق صامتة وأخرى تفاعلية تعزز توازن العمل الأكاديمي والتبادل المعرفي.
النظريات الأخلاقية والقيمية في التصميم	نصوص فلسفية وأخلاقية حول المسؤولية الإنسانية في العمران (هايدغر، شولتز، أريستوتال، هانس جوناس...).	**تضبط عمل النظام ضمن منظومة قيمية تمنع تحيّزه التقني. تزرع داخله "وعيًا بالمسؤولية الإنسانية" تجاه المستخدمين والبيئة.**	يوجّه النظام لاختيار حلول تحقق الراحة المعرفية دون استهلاك مفرط للطاقة، عبر أنظمة ذكية مستدامة تُوازن بين الكفاءة والرحمة البيئية.
التحليل النفسي للإبداع المعماري	دراسات سيكولوجية عن علاقة المخيلة بالابتكار مثل أعمال يونغ وفروم وغاستون باشلار.	**تعزز لدى النموذج قدرة على رصد الارتباط بين الحالة الذهنية للمصمم ونواتج الفعل التصميمي، مما يوسّع إدراكه للعمليات غير المنطقية في الإبداع.**	يستنتج النظام أن الشكل المنحني والضوء المتحرك يحفّزان الجانب التأملي لدى الباحثين، فيقترح قبة علوية تسمح بتسرب الضوء التدريجي لخلق بيئة تأملية محفزة للإبداع العلمي.
التراث الرمزي والدلالي للعمارة	الرموز والعلامات الثقافية المتوارثة (الأقواس، المحاريب، الساحات، المحاور المحورية).	**يكوّن لدى النموذج قاموسًا دلاليًا لفهم الإشارات المكانية باعتبارها حوامل للمعنى الجمعي لا عناصر شكلية.**	يدمج النظام رموز الانفتاح الأكاديمي عبر محور بصري يربط القاعة ببهو المكتبة المركزي ليعزز فكرة المشاركة المعرفية والانتماء للمؤسسة العلمية.

تحليل الجدول 32: تشكل هذه المدخلات العميقة البنية المفاهيمية التي تربط بين **المستوى الفلسفي للعمارة** والمستوى التطبيقي في تصميم الفضاء. فهي تمنح نموذج **(HCAI–AD)** القدرة على التفكير بمفاهيم الذاكرة، والانتماء، والغاية، والوعي الجمعي، فتجعل مخرجاته أقرب إلى ما يمكن وصفه بـ"الإبداع الواعي". وفي المثال التطبيقي قاعة مطالعة الباحثين تؤدي هذه المدخلات إلى بيئة تصميمية تمتاز بالهدوء، والاحترام، والرمزية، والانتماء، أي أنها تُجسّد الإدراك الإنساني في بعده الأعمق داخل الفضاء المادي.

جدول 10 يختصر جميع أنواع المدخلات في نماذج الذكاء الصنعي الاعتمادي المتخصص بالإنسان للتصميم المعماري (HCAI-AD) الأساسية والعميقة معًا المصدر (اعداد الباحث)

	المدخل	أهميته في تعزيز الإدراك الإنساني داخل النموذج(HCAI-AD)

مدخلات أساسية	المدخلات الحسية–الانطباعية	تكوّن الأساس الأولي لفهم الانطباع الحسي وتفسير استجابة الإنسان الفورية للمكان.
	المدخلات المعرفية–الذهنية	تمكّن النموذج من محاكاة عمليات التفكير الإنساني وبناء التمثيلات الذهنية للمكان.
	المدخلات الشعورية–الوجدانية	تُكسب النموذج حسًا إدراكيًا عاطفيًا يجعله يفهم أثر المكان على الحالة النفسية للإنسان.
	المدخلات الاجتماعية–الثقافية	تُمكّن النظام من احترام التنوع الثقافي وتحقيق توافق بين التصميم والهوية الاجتماعية.
	الفلسفات والنظريات المعمارية	تضبط رؤية النظام للعمارة كفعل إنساني ذي غاية ومعنى، لا مجرد إنتاج شكلي.
	تحليل النماذج الحضارية التاريخية	تُكسب النموذج ذاكرة معرفية تاريخية تمنحه استقرارًا وعمقًا في فهم القيم المكانية.
مدخلات عميقة	جذور التيارات المعمارية	تمنع النظام من الانغلاق في نمط واحد وتساعده على التوازن بين الإبداع والتجديد.
	المراجع الاجتماعية والفكرية	تمنحه وعيًا بسلوك المجموع وقدرته على تصميم بيئات تُراعي التواصل والخصوصية.
	النظريات الأخلاقية والقيمية	تضمن أن يكون الإبداع التصميمي خاضعًا لمعايير إنسانية وأخلاقية رفيعة.
	التحليل النفسي للإبداع	تُساعد النظام على استيعاب البعد اللاواعي للإبداع الإنساني وتحفيز الجانب التأملي.
	التراث الرمزي والدلالي	تمنح النموذج قدرة على فهم المعنى الضمني وراء التكوينات المكانية والرموز الشكلية.

4-3-3 دور المصمم المعماري في عمل النموذج الاعتمادي (HCAI-AD)

تُعدّ علاقة المصمم المعماري بنماذج الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان للتصميم المعماري (HCAI-AD) **علاقة إشرافية–تنظيمية ذات طابع معرفي عالٍ، تتجاوز مفهوم التفاعل التقني المباشر إلى** دور إدراكي مراقِب **يُعنى بتصنيف وضبط المدخلات الموجَّهة للنظام. فالمعماري في هذا السياق لا يُمارس التصميم بوصفه مُنفِّذًا، بل بوصفه** العقل المنسّق بين الإنسان والآلة، **الذي يضمن بقاء العملية التصميمية ضمن حدودها الإنسانية والأخلاقية دون المساس بقدرتها على التجريب والإبداع.**

– 4-3-3-1 دور المصمم المعماري في تصنيف المدخلات

تمثل عملية **تصنيف المدخلات** الركيزة الجوهرية في بناء فعالية نموذج الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان (HCAI-AD) ضمن العملية التصميمية المعمارية، إذ تُعدّ هذه المهمة **النقطة المفصلية** التي

تضمن تحوّل النظام من مجرد أداة حوسبية عامة إلى منظومة قادرة على **إدراك المعاني التصميمية المعقدة** واستيعابها. فالنموذج الصنعي، بطبيعته الأولية، يُنشأ كمنظومة تعلم غير متخصصة، مبنية على الخوارزميات العامة للذكاء الصنعي العميق(Deep Learning) ، دون امتلاك مرجعية معمارية أو حس إدراكي مرتبط بسلوك الإنسان في الفضاء. وهنا يأتي دور المصمم المعماري، أو بالأحرى فريق المصممين، ليؤدوا وظيفة تربوية معرفية تشبه **تعليم الطالب المفاهيم الأولى للهندسة المعمارية**، لكن على نطاق واسع وبأدوات رقمية. [31]

جدول 11 يوضّح مراحل تصنيف المدخلات في نماذج الذكاء الصنعي الاعتمادي المتخصص بالإنسان للتصميم المعماري (HCAI-AD)، وما يقابل كل مرحلة من المهارات والمعارف الواجب توافرها لدى المصمم المعماري المصدر (اعداد الباحث)

مرحلة التصنيف	وصف المرحلة	المهارات والمعارف المطلوبة لدى المصمم المعماري
1.جمع البيانات الأولية	تجميع المدخلات الخام المتعلقة بالبيئة، الإنسان، والسلوك من مصادر متعددة تشمل الصور، النصوص، النماذج، ودراسات الحالة.	**مهارات البحث الأكاديمي، الإلمام بأساسيات علم النفس البيئي، فهم نظريات التصميم والسلوك الإنساني في الفراغ.**
2.الفرز الأولي	تصنيف المدخلات بحسب نوعها (حسية، معرفية، ثقافية، فلسفية...) لتسهيل معالجتها لاحقًا داخل النظام.	**القدرة على التحليل البنيوي للمعلومات، وفهم أنماط الإدراك الإنساني ومستوياته.**
3.التنقية النوعية	حذف أو تعديل البيانات غير الدقيقة، أو المنحازة ثقافيًا أو فكريًا، لضمان اتساق المحتوى وحياده.	**حس نقدي عالٍ، إلمام بأخلاقيات البحث العلمي، وقدرة على تمييز الانحيازات الفكرية أو الثقافية.**
4.الترشيح المتقدم	اختيار المدخلات الأعلى دقة وتأثيرًا في تطوير النموذج، وتحديد أوزانها داخل عملية التعلم.	**معرفة بأساسيات الذكاء الصنعي وخوارزميات التعلم العميق، وقدرة على تقييم مدى ارتباط المعلومة بسياقها التصميمي.**
5.إعادة الهيكلة الهرمية	تنظيم المدخلات ضمن تسلسل يعكس تطور الإدراك البشري من الحس إلى الفكر إلى الرمز.	**إلمام بنظريات الإدراك الإنساني (كما ورد في الفصل الثاني)، وفهم الترابط بين الإدراك والمكان.**
6.التقييم والتحقق	اختبار مدى كفاءة المدخلات المختارة في إنتاج مخرجات متوافقة مع أهداف المشروع التصميمي.	**القدرة على التحليل النقدي، ومهارة القياس الإدراكي للمخرجات، ومعرفة بالمعايير الإنسانية والجمالية.**

7.المراجعة المستمرة	تحديث المدخلات وتصحيح المسارات بناء على التغذية الراجعة من المشاريع السابقة والنماذج التطبيقية.	**مرونة فكرية، واستيعاب ديناميكية الذكاء الصنعي، والانفتاح على التعلّم المستمر.**

4-3-3-2 – دور المصمم المعماري في مرحلة التصميم في النموذج الاعتمادي (HCAI-AD)

تُمثّل مرحلة التصميم في نموذج الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان (HCAI–AD) النقطة التي **يبدأ فيها الذكاء الصنعي بالعمل الفعلي** في صياغة الحلول المعمارية، بالاعتماد على ما تم تزويده به من مدخلات أساسية وعميقة في المراحل السابقة. في هذه المرحلة يتحول المصمم المعماري من كونه المُغذّي للنظام بالمعلومات إلى **المراقب والموجّه الإدراكي** الذي يضبط إيقاع العملية التصميمية ويضمن سلامة مسارها من الانحرافات الشكلية أو المفاهيمية. فالذكاء الصنعي في هذا النموذج هو من "يُصمم" بالمعنى التنفيذي، لكن تحت مظلة إشراف إنساني دقيقة تحافظ على الطابع القيمي والجمالي للمشروع. [21]

تتطلب هذه المرحلة وجود **مصممين معماريين ذوي خبرة عالية في اتخاذ القرارات التصميمية**، إذ يجب أن يمتلكوا قدرة تحليلية متقدمة لاستشراف العواقب المكانية والاجتماعية والجمالية لكل مسار تقترحه خوارزميات النموذج.[26]

يُمارس المعماريون في هذه المرحلة نوعًا من **الرقابة التفاعلية**، إذ يراقبون الذكاء الصنعي وهو يختبر بدائل تصميمية متعددة، ويتعلم من الأخطاء والنجاحات في الوقت ذاته. فهم لا يوقفون التجريب، بل يضمنون أن يظل ضمن حدود الفهم الإنساني للعمارة. يمكن القول إن العلاقة هنا قائمة على **الثقة المتبادلة المشروطة**؛ فالمصمم يثق بقدرة الذكاء الصنعي على التجريب والابتكار، لكنه يحتفظ بحق المراجعة والتدخل عند الحاجة، تمامًا كما يترك المعلم لطالبه مساحة للاستكشاف، ثم يعيد تقويمه عندما يخرج عن المسار المنهجي. [22]

جدول12 يوضّح المهارات والمعارف التي يجب أن يمتلكها المصمم المعماري أثناء مراقبته للنموذج (HCAI-AD) في مرحلة التصميم المصدر (اعداد الباحث)

المهارة أو المعرفة	الوصف العام	الدور العملي أثناء مراقبة النموذجHCAI	الأثر على العملية التصميمية

الفهم العميق للخوارزميات التصميمية	معرفة آلية عمل أنظمة التعلم العميق والتصميم التوليدي، وكيفية معالجة البيانات وتحليلها داخل النظام.	تفسير مخرجات الذكاء الصنعي وتحديد مدى منطقية العلاقات التصميمية التي يقترحها.	ضمان أن تكون النتائج منسجمة مع المبادئ الهندسية والإدراكية دون انحرافات بنيوية.
القدرة على التقييم الإدراكي	فهم كيفية إدراك الإنسان للفضاء، واستحضار مبادئ الإدراك النفسي والحسي أثناء تحليل المخرجات.	تحديد مدى ملاءمة الحلول التصميمية للإنسان من حيث الراحة البصرية، والإحساس بالمكان، والانتماء إليه.	تحقيق التوازن بين الشكل والمضمون، وبين التقنية والإحساس الإنساني.
التحليل النقدي والتفكير المنطقي	مهارة تحليل القرارات التصميمية التي ينتجها النظام على أساس علمي غير انفعالي.	تشخيص مواطن الخطأ أو المبالغة في المقترحات التصميمية للنظام واتخاذ قرار مدروس بالتدخل أو عدمه.	منع النظام من الانجراف نحو تصاميم غير واقعية أو غير منسجمة مع السياق الإنساني.
القدرة على اتخاذ القرار اللحظي	سرعة الاستجابة المعرفية في مواقف التصميم الديناميكية.	التدخل عند ظهور خلل أو اتجاه تصميمي غير مقصود لتصحيح المسار أو إعادة توجيه النظام.	المحافظة على استمرارية العملية التصميمية ضمن الإطار المحدد دون تعطيل.
الإلمام بالمنهجيات الأخلاقية والمعايير الإنسانية	معرفة الأسس الأخلاقية لتوظيف الذكاء الصنعي في التصميم والالتزام بمبدأ الإنسان أولًا.	مراقبة التوازن بين المخرجات التقنية واحترام القيم الإنسانية، خصوصًا في الفضاءات العامة والحساسة.	ضمان ألا يتحول الإبداع التقني إلى إخلال بالعدالة أو تجاوز للقيم الاجتماعية والثقافية.
الخبرة في اتخاذ القرارات التصميمية المعقدة	امتلاك القدرة على وزن البدائل وتحليل النتائج المترتبة على كل قرار تصميمي.	اختيار الحلول الأنسب عند تعارض البدائل المقترحة من النظام وفق معايير المنفعة الجمالية والوظيفية.	رفع كفاءة عملية التصميم وتحقيق مخرجات أكثر انسجامًا مع أهداف المشروع الكلية.
المرونة الفكرية والانفتاح على التجريب	تقبّل الاحتمالات التصميمية الجديدة الناتجة عن النظام وعدم مقاومة الحلول غير المألوفة.	تشجيع النموذج على الاستكشاف مع الحفاظ على الإطار الإدراكي الإنساني العام.	تعزيز الإبداع والابتكار داخل بيئة التصميم دون التضحية بالمعنى أو الوظيفة.
القدرة على التواصل البصري والمعرفي مع النماذج التوليدية	فهم لغة الصور والمخططات والرموز الناتجة عن النظام وتحليلها بسرعة ودقة.	ترجمة مخرجات النظام إلى قرارات تصميمية مفهومة وقابلة للتطبيق.	تمكين المعماري من لعب دور المفسّر البصري بين العقلين الإنساني والصنعي.
الإشراف الجماعي وإدارة فرق العمل	مهارة إدارة الفرق متعددة التخصصات (مصممون،	تنسيق الجهود بين الجوانب التقنية والإدراكية	تحقيق تناغم بين مستويات العمل

	مبرمجون، مختصون نفسيون).	لضمان تكامل مراحل التصميم.	المختلفة داخل المشروع الواحد.
الذكاء العاطفي والتفهم الإنساني	وعي بمشاعر المستخدم النهائي وتوقع ردود فعله تجاه الفضاء المصمم.	توجيه النموذج لإنتاج تصاميم تُعبّر عن القيم الإنسانية مثل الطمأنينة، الانتماء، الجمال.	جعل الناتج المعماري أكثر دفئًا وارتباطًا بالنفس البشرية رغم نشأته من آلة.

– 4-3-3-3دور المعماري في مرحلة تقييم نتائج النموذج الاعتمادي (HCAI-AD) واتخاذ القرار النهائي

تُعتبر مرحلة **تقييم نتائج نموذج الذكاء الصنعي المتخصص بالإنسان** (HCAI–AD) من أدق وأرفع المراحل في العملية التصميمية، إذ تمثّل اللحظة التي يتقاطع فيها **الوعي النقدي الإنساني** مع **الوعي الخوارزمي الاصطناعي** في فعل معرفي واحد هو "الحُكم". ففي هذه المرحلة، لا يُكتفى باستعراض المخرجات أو تحليلها شكليًا، بل يُمارس المصمم المعماري دوره كـ **ناقد أكاديمي ومفكر تصميمي** ذي قدرة عالية على استقراء المعنى الكامن خلف النتائج وتقييمها ضمن سياقاتها الإدراكية، الجمالية، والوظيفية. [27]

يتطلب هذا الدور وجود معماريين من **المستوى النقدي المتقدم**، أي أولئك الذين يملكون خبرة تراكمية واسعة تجمع بين **الممارسة الأكاديمية** و**الخبرة المهنية الواقعية** .فالنقد هنا لا يقوم على الذوق أو الانطباع الشخصي، بل على **منهجية تحليلية علمية** تستند إلى فهمٍ عميق لمراحل بناء النموذج، وآلية تصنيفه للمدخلات، وأسلوب تعلمه من الخبرة. [23]

جدول 13 يوضّح المهارات والمعارف الواجب توافرها لدى المصمم المعماري في مرحلة تقييم نتائج النموذج الاعتمادي (HCAI-AD) واتخاذ القرار النهائي المصدر (اعداد الباحث)

المهارة أو المعرفة	الوصف العام	الدور العملي أثناء التقييم	الأثر على تطور النموذج(HCAI-AD)
الخبرة الأكاديمية والعملية المتوازنة	دمج بين المعرفة النظرية والاحتكاك الميداني المباشر في المشاريع الواقعية.	تحليل النتائج من منظور شامل يجمع بين التجربة المهنية والفكر الأكاديمي.	ضمان موضوعية التقييم وربط النتائج بالواقع المعماري الفعلي.
القدرة على النقد العلمي المنهجي	تطبيق أدوات نقدية تحليلية قائمة على أسس معرفية ومنطقية	فحص العلاقات البنيوية في التصميم وتقييم مدى	تمكين النموذج من تعديل استراتيجياته وفق قواعد منطقية راسخة.

	لا على الانطباع أو الذوق.	اتساقها مع المبادئ الإنسانية والمعمارية.	
الإدراك الفلسفي لطبيعة العمارة	فهم العمارة بوصفها فعلًا معرفيًا لا إنتاجًا ماديًا فقط، له دلالات وجودية وثقافية.	تفسير المعاني الضمنية في مخرجات النموذج وربطها بالقيم الإنسانية والثقافية.	تعزيز وعي النموذج بالمستوى الرمزي والمعنوي للفراغ المعماري.
التحليل المقارن للنتائج	مقارنة المخرجات الحالية مع مشاريع أو حلول سابقة أو مراجع معيارية.	تحديد موقع الأداء التصميمي للنموذج ضمن منحنى التطور الزمني.	بناء ذاكرة تعلم تراكمية تربط بين الأجيال المختلفة للنماذج.
القدرة على قراءة المنطق الخوارزمي	فهم آلية اتخاذ القرار داخل الذكاء الصنعي والتسلسل الحسابي للنتائج.	تفسير أسباب نجاح أو فشل المسارات التصميمية المقترحة من النموذج.	تطوير خوارزميات النموذج وتصحيح الاتجاهات غير المرغوبة.
التحليل الإدراكي العميق للمخرجات	استيعاب المخرجات بوصفها انعكاسًا للإدراكين الإنساني والصنعي معًا.	تحليل العلاقة بين الشكل والوظيفة والمعنى في كل مقترح تصميمي.	رفع مستوى الحس الإدراكي للنظام ليقارب الإدراك البشري الواعي.
الوعي بالقيم الأخلاقية والبيئية	إدراك تأثير القرارات التصميمية على المجتمع والبيئة والهوية الثقافية.	رفض المخرجات التي تُخل بالتوازن الإنساني أو البيئي أو القيمي.	ضمان استدامة النموذج معرفيًا وأخلاقيًا على المدى الطويل.
القدرة على تنظيم المعرفة المتولدة	تصنيف نتائج النموذج وتحويلها إلى بيانات جديدة لتغذية الأجيال اللاحقة.	إعداد قاعدة بيانات نقدية حول النجاحات والإخفاقات التصميمية للنظام.	الحفاظ على الاستمرارية التطورية للنموذج وضمان انتقال المعرفة بين الأجيال.
المهارة في اتخاذ القرار النهائي	امتلاك الجرأة والقدرة على حسم الخيارات التصميمية في ضوء التحليل والنقد.	اختيار المسار الأمثل للمشروع والتصديق النهائي على الحل التصميمي.	بلورة النموذج في اتجاه ناضج ومتوازن معرفيًا وإنسانيًا.
الرؤية المستقبلية الاستشرافية	القدرة على التنبؤ باتجاهات التصميم المستقبلية بناء على نتائج النظام.	تحويل نتائج التقييم إلى رؤى تطويرية لأجيال الذكاء الصنعي القادمة.	تأسيس خط زمني تطوري للنموذج يربط بين الإدراك البشري والتقني.

4-3 مقارنة بين النموذج التبادلي PAIR والنموذج الاعتمادي HCAI-AD

يُشكّل هذا المحور **اللحظة الفلسفية والعلمية الأعمق في البحث**، إذ يضعنا أمام الفارق الجوهري بين **النموذج التبادلي (PAIR)** بوصفه تجسيدًا للتفاعل الإدراكي المتبادل بين الإنسان والآلة، و**النموذج الذكي المخصص للعملية التصميمية (HCAI–AD)** بوصفه تمظهرًا متطورًا لذكاء صنعي متمحور حول الإنسان، لا يعتمد على التفاعل المتكافئ بل على التوجيه والإشراف. كلا النموذجين ينتمي إلى نسق فكري واحد هدفه **تحقيق التكامل بين الإدراك الإنساني والإدراك الصنعي في مجال التصميم المعماري**، غير أن الاختلاف بينهما يكشف عن تحولين أساسيين في بنية الفهم والاشتغال داخل العملية التصميمية.

إن الفارق الجوهري بين النموذجين يتجسد في من **يمتلك زمام المبادرة داخل العملية التصميمية** . ففي حين يُتيح النموذج التبادلي **(PAIR)**، مسارًا تفاعليًا متوازنًا يعمل فيه الإنسان والآلة جنبًا إلى جنب في كافة المراحل – من الفكرة الأولى إلى التقييم النهائي – فإن النموذج الاعتمادي–**HCAI (AD)** يُسند **الجهد التنفيذي الأكبر للذكاء الصنعي**، ويحتفظ للإنسان بدور الإشراف والتقويم والتوجيه المعرفي. بكلمات أخرى، النموذج الأول يُعبّر عن «العمل المشترك»، بينما الثاني يُجسّد «التوجيه المتخصص». وفي حين يميل النموذج التبادلي إلى **توزيع الذكاء بين الطرفين**، يميل النموذج المخصص إلى **تمركز الذكاء داخل الآلة بإشراف الإنسان**.

وعليه، يمكن القول إن المقارنة بين النموذجين ليست مقارنة بين أسلوبين للتصميم فحسب، بل هي **مقارنة بين فلسفتين في فهم العلاقة بين الإنسان والآلة** .فالنموذج التبادلي يؤمن بأن المعرفة تتشكل من التفاعل بين العقول المختلفة، بينما يرى النموذج المخصص أن المعرفة يمكن أن تتطور داخل النظام ذاته شرط أن يبقى مرتبطًا بالبوصلة الإنسانية. في جوهرهما، كلاهما يؤكد أن الإدراك الإنساني والذكاء الصنعي لا يمكن فصلهما بعد الآن، وأن **مستقبل العمارة سيتحدد من خلال قدرة الفكر الإنساني على توجيه الآلة دون أن يفقد شراكته معها**.

جدول 14 المقارن بين النموذج التبادلي (PAIR)، و النموذج الاعتمادي (HCAI-AD) في العملية التصميمية المصدر(اعداد الباحث)

المحور التحليلي	النموذج التبادلي (PAIR)	النموذج الذكي المخصص-(HCAI AD)
1- طبيعة العلاقة بين الإنسان والآلة	علاقة تشاركية متبادلة قوامها التفاعل اللحظي المستمر بين الإدراكين الإنساني والصنعي.	علاقة إشرافية تربوية يوجّه فيها الإنسان النظام دون مشاركة متكافئة.
2- مركز اتخاذ القرار	مشترك؛ تُتخذ القرارات عبر تفاعل متبادل وتحليل مزدوج.	يميل إلى النظام الصنعي الذي يستند إلى بيانات ضخمة ويُشرف عليه المعماري.
3- طبيعة البيانات المستخدمة	بيانات إدراكية حسية ومعرفية آنية تُولد أثناء العملية التصميمية.	بيانات ضخمة ومنقحة مسبقًا تم إعدادها خلال مرحلة تصنيف المدخلات.
4- نوع الإدراك المتبادل	إدراك حيّ تفاعلي متغير في كل لحظة تصميمية.	إدراك مبرمج موجَّه ومضبوط ضمن حدود محددة مسبقًا.
5- دور المصمم المعماري	شريك فاعل ومتفاعل؛ يختبر ويكتشف بالتعاون مع النظام.	موجّه وناقد ومراقب؛ يحدد الأهداف ويقيّم النتائج النهائية.
6- نوع الخوارزميات المستخدمة	خوارزميات تعاونية (Collaborative AI)تسمح بالتعلّم اللحظي المشترك.	خوارزميات متخصصة (Deep HCAI)تعتمد على نماذج إدراك إنساني مبرمجة مسبقًا.
7- أسلوب التعلم	تفاعلي تجريبي يقوم على التغذية الراجعة المستمرة من الطرفين.	تعلّم عميق موجّه يستند إلى قواعد بيانات منقّحة مسبقًا.
8- ناتج العملية التصميمية	تصميم ذو هوية ديناميكية قابلة للتطور والتكيّف مع تغيّر المعطيات الإدراكية.	تصميم أكثر ثباتًا واتساقًا مع المعايير الإنسانية لكنه أقل قابلية للتفاعل المستمر.
9- نوع التواصل بين الطرفين	حواري تفاعلي مبني على تبادل المعنى والمعطى في الوقت ذاته.	توجيهي تعليمي من الإنسان نحو النظام، ثم تقييم عكسي من المخرجات إلى الإنسان.
10- البنية الفلسفية للنموذج	المعرفة تُبنى بالتفاعل والتجريب والتبادل المستمر.	المعرفة تُبنى بالتوجيه والتحكم الممنهج ضمن إطار إنساني قيمي.
11- العلاقة بالزمن والتطور	متغيرة ديناميكية؛ كل تجربة تصميمية تُعيد تشكيل النظام.	تراكمية؛ كل مشروع يُغذي ذاكرة النظام المستقبلية بشكل منهجي.
12- البعد القيمي والإنساني	قوي جدًا نتيجة الحضور الدائم للمصمم وتفاعله اللحظي.	مستقر لكنه أكثر تجريدًا؛ يعتمد على قواعد مسبقة للمعايير الإنسانية.
13- دور الخطأ والتجربة	الخطأ جزء أساسي من عملية التعلم، يُحتضن كمصدر لتطوير الإدراك.	يُراقَب الخطأ ويُعالج بصرامة لتقليل الانحراف في النتائج.
14- آلية اتخاذ القرار النهائي	جماعية تفاعلية تعتمد على الحوار الإدراكي المشترك.	فردية إشرافية تصدر من المصمم بعد تحليل النظام.
15- التكوين المعرفي للنموذج	شبكة تفاعلية حية تربط الإدراكين في بيئة تصميمية واحدة.	منظومة خوارزمية متخصصة ذات مرجعية إنسانية مهيكلة.

16- الأثر على العملية التعليمية المعمارية	يحاكي تجربة التعليم التشاركي بين أستاذ وطالب في مختبر حي.	يمثل منهج التعليم المبرمج الموجه للذكاء الصنعي.
17- النتيجة النهائية للتصميم	تصميم ذو طابع تجريبي تفاعلي متجدد يحفز وعي المستخدم.	تصميم متكامل ومستقر يعكس نضج الخوارزميات واستيعابها للبعد الإنساني.
18- العلاقة بالمستخدم النهائي	المستخدم يُدمج في العملية عبر محاكاة تفاعلية حقيقية.	المستخدم يُمثَّل بالبيانات والنماذج السلوكية المحفوظة مسبقًا.
19- قابلية النموذج للتطور الذاتي	عالية جدًا عبر التجريب اللحظي والتغذية الراجعة المستمرة.	منتظمة عبر مراحل محددة من التقييم والتحديث الدوري.
20- الهدف المعرفي النهائي	تحقيق إدراك مزدوج يجمع الحس البشري والمنطق الخوارزمي في وحدة تصميمية واحدة.	بناء ذكاء صنعي إنساني قادر على استيعاب المنطق البشري في اتخاذ القرار التصميمي.

من خلال المقارنة يظهر أن النموذج التبادلي (PAIR)، يمثّل مرحلة الإدراك المشترك، **حيث يُخلق المعنى من الحوار المستمر بين الإنسان والآلة، بينما النموذج الاعتمادي (HCAI–AD) يمثّل** مرحلة الإدراك الموجَّه، **حيث ينتقل الذكاء الصنعي من التعلم بالمشاركة إلى** التصميم بالاستقلال الموجَّه.**هذا الانتقال هو** الجوهر الحقيقي للعلاقة التبادلية بين الإدراكين الإنساني والصنعي في العملية التصميمية، **وهو** هدف البحث المركزي **:الوصول إلى منظومة معرفية تصميمية لا تُقصي الإنسان ولا تُقيّد الذكاء الصنعي، بل تجعلهما يعملان في تناغم متكامل نحو خلق عمارة تمتلك عقلًا وفهمًا ومعنى.**

5-4 منهجية القياس والتحليل التقييمي

تتطلّب دراسة العلاقة التبادلية بين الإدراك الإنساني والذكاء الصنعي في التصميم المعماري تبنّي منهجية قياس وتحليل قادرة على التعامل مع تعقيد هذه العلاقة وتعدّد مستوياتها. فالممارسات المعاصرة التي تدّعي دمج الذكاء الصنعي في العملية التصميمية لا تنتمي إلى مستوى واحد من النضج أو العمق، كما أن حضور الإدراك الإنساني داخلها يتفاوت من استخدام أداتي محدود إلى مشاركة معرفية أكثر تعقيدًا. وعليه، فإن اعتماد مسطرة قياس أحادية المستوى قد يؤدي إلى نتائج تبسيطية لا تعكس الفروق الجوهرية بين هذه الحالات، أو إلى خلط منهجي بين حالات غير متكافئة من حيث الأساس النظري أو المعرفي.

انطلاقًا من ذلك، يعتمد البحث منهجية قياس وتحليل تقييمي متدرّجة تقوم على تجزئة مسطرة القياس إلى مستويين مترابطين: مستوى أولي، ومستوى ثانوي. ولا تهدف هذه التجزئة إلى الفصل بين مرحلتين غير متكافئتين في الأهمية، بل إلى تنظيم عملية التقييم بصورة تسمح بالانتقال المنهجي من التحقق الأساسي إلى التحليل المعمّق، وفق منطق تصاعدي يراعي طبيعة الظاهرة المدروسة وحدودها الواقعية.

تُستخدم مسطرة القياس الأولية بوصفها أداة تحقق منهجية تهدف إلى تحديد أهلية الحالة المدروسة للدخول في نطاق التحليل التقييمي المتقدم. ويُقصد بالأهلية هنا توافر الحد الأدنى من الشروط النظرية التي تجعل من الحالة موضوعًا صالحًا لدراسة العلاقة التبادلية، وفي مقدمتها: وجود ذكاء صنعي فاعل داخل العملية التصميمية، حضور إدراك إنساني ذي دور تفسيري أو توجيهي، وقيام شكل من أشكال التفاعل بين الطرفين يتجاوز الاستخدام الأداتي البحت. وبهذا المعنى، لا تعمل المسطرة الأولية بوصفها أداة للحكم على جودة التصميم أو نجاحه، بل بوصفها آلية فرز معرفي تستبعد الحالات التي لا تحقق أساسًا مفهوم الدمج الذي يتناوله البحث.

أما مسطرة القياس الثانوية، فتُستخدم لتحليل الحالات التي تثبت أهليتها المنهجية عبر المسطرة الأولية، وتنتقل معها عملية التقييم من مستوى التحقق إلى مستوى الفحص التفصيلي للعمق الإدراكي والمعرفي.

تستند هذه المنهجية المتدرّجة في القياس إلى المنطلقات النظرية التي طُرحت في الفصول الثلاثة. فالفصل الأول وفّر الأساس اللازم لتحديد مستويات تدخل الذكاء الصنعي وتقنياته المختلفة داخل العملية التصميمية، بينما أسّس الفصل الثاني لإطار إدراكي يتيح تحليل دور الإنسان بوصفه مفسّرًا ومنظّمًا للمعنى، لا مجرد مستخدم للأداة. أما الفصل الثالث، فقد قدّم نموذجي PAIR و HCAIبوصفهما مرجعيتين تحليليتين تُحددان طبيعة العلاقة الممكنة بين الطرفين، سواء بوصفها علاقة تشاركية تبادلية أو علاقة اعتمادية إشرافية.

في ضوء ذلك، تُعدّ تجزئة مسطرة القياس إلى مستوى أولي ومستوى ثانوي إجراءً منهجيًا يهدف إلى الحفاظ على الصرامة العلمية في التقييم، وتجنّب التعميم غير الدقيق، وضمان انسجام التحليل مع طبيعة البحث وأهدافه. كما تسمح هذه المنهجية بتقديم قراءة أكثر واقعية للمشهد المعاصر لاستخدام الذكاء الصنعي في العمارة، من خلال الاعتراف بتفاوت مستويات النضج دون إسقاط أحكام قاطعة أو اختزالية. وبهذا الإطار، يمهّد هذا العنوان الفرعي للانتقال إلى صياغة مساطر القياس الرئيسة والثانوية، بوصفها أدوات تحليلية مشتقة مباشرة من المتن النظري للبحث، وقابلة للتطبيق على حالات مختلفة ضمن حدود منهجية واضحة.

المصدر: إعداد الباحث بالاعتماد على الإطار النظري للفصول الأول والثاني والثالث.

في التالي جدول يوضح محددات القياس والتقييم من اعداد الباحث

جدول 15 المنهج التحليلي التقييمي المخصص لدراسة العلاقة التبادلية بين الإدراك الإنساني

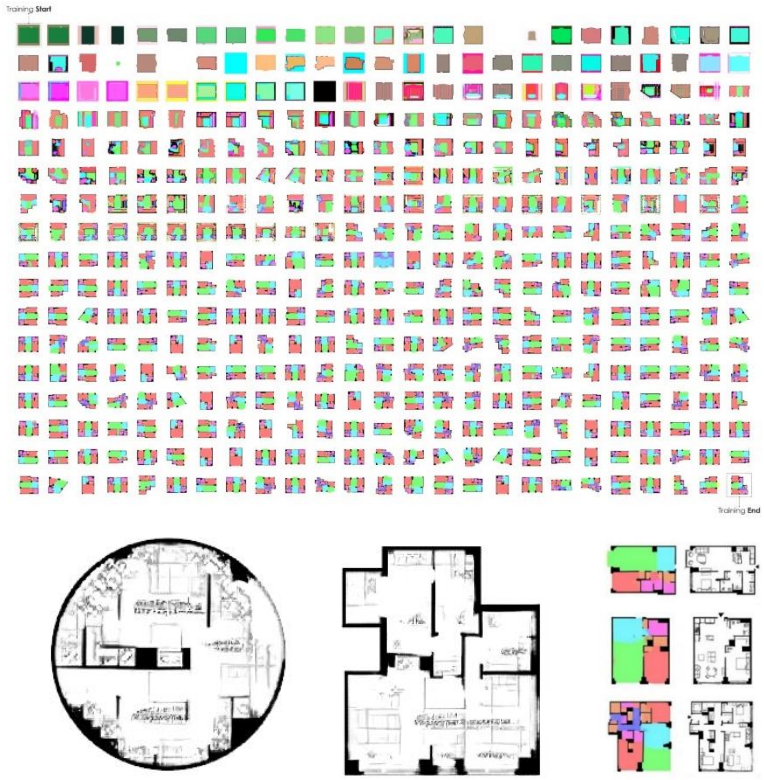
	المحور	مؤشرات القياس	مستوى التحقق				التوصيف العام	
A	توصيف الحالة	الاسم/العنوان					تصنيف غير تقييمي تحديد السياق ضبط الادعاء فصل الادعاء عن التحقق	
		ماهية المثال	بحث ☐	أداة ☐	منصة ☐	مشروع ☐		
		نطاق الاستخدام	أكاديمي ☐	مهني ☐	تجاري ☐	تجريبي ☐		
		مستوى ادعاء الدمج	مفاهيمي ☐	تخطيطي ☐	تفصيلي ☐	تنفيذي ☐ / تقييمي ☐		
		طبيعة استخدام AI	دعم تصميمي ☐	دمج إدراكي ☐	تبادلية ☐	اعتمادية ☐		
							نسبة التحقق	المخرجات التحليلية
B	القياس المبدئي	مستوى تدخل الذكاء الصنعي	نقاش ☐	صور ☐	تحليل ☐	توليد ☐	—	توصيف التدخل
		وظيفة الذكاء الصنعي	أداة ☐	مساعد ☐	شريك تحليل ☐	مشارك تصميمي ☐	—	توصيف الدور
			غير محقق		ضعيف	متوسط / محقق		
		وجود ذكاء صنعي فعلي	☐		☐	☐ / ☐	—	أهلية التحليل
		وجود إدراك إنساني تفسيري	☐		☐	☐ / ☐	—	فاعلية المصمم
		دور المصمم في توجيه المخرجات	☐		☐	☐ / ☐	—	طبيعة القيادة
		تجاوز الاستخدام الأداتي	☐		☐	☐ / ☐	—	اختبار التشاركية
		تحقق حد أدنى من PAIR	☐		☐	☐ / ☐	—	صلاحية التبادلية
		تحقق حد أدنى من HCAI	☐		☐	☐ / ☐	—	صلاحية الاعتمادية
B′	قرار مرحلي	أهلية الانتقال للقياس العميق	≥ 40% من المرحلة B				النسبة من 100%	مؤهل / غير مؤهل
C	القياس العميق	نوع الإدراك المتحقق	حسي ☐	وظيفي ☐	معرفي ☐	ثقافي ☐ / تركيبي ☐	نسبة التحقق	نسبة التوافق مع المحور المبدئي	تفكيك إدراكي
			غير محقق		ضعيف	متوسط / محقق			
		نوع تقنية الذكاء الصنعي وملاءمتها	☐		☐	☐			صلاحية التقنية
		قابلية تفسير المخرجات	☐		☐	☐			شفافية القرار
		إدراك الفراغ	☐		☐	☐			عمق فراغي
		إدارة الثابت والمتغير	☐		☐	☐			ضبط التحول
		عمق العلاقة التبادلية	☐		☐	☐			نضج العلاقة
		تحقق مبادئ PAIR	☐		☐	☐			تبادلية ناضجة
		تحقق مبادئ HCAI	☐		☐	☐			اعتمادية واعية
		الأبعاد الأخلاقية والمسؤولية	☐		☐	☐			ضبط أخلاقي
		مواءمة المخرجات مع المستخدم والسياق	☐		☐	☐			صلاحية سياقية
		وعي المصمم بذاته وبحدود الأداة	☐		☐	☐			وعي نقدي
							من 100%	من 100%	
D	الحكم النهائي	مؤشر التبادلية (PAIR Index)	منخفض ☐		متوسط ☐	مرتفع ☐	—		توصيف نوعي مدعوم
		مؤشر الاعتمادية الواعية (HCAI Index)	ضعيف ☐		جزئي ☐	متكامل ☐	—		توصيف إشرافي
		مؤشر الدمج الإدراكي الكلي	منخفض ☐		متوسط ☐	مرتفع ☐	—		مستوى الدمج
		المسافة بين الادعاء والتحقق (%)	منخفضة ☐		متوسطة ☐	مرتفعة ☐	—		كشف الفجوة
		الدلالة البحثية النهائية					—		استخلاص معرفي

والذكاء الصنعي في عملية التصميم المعماري المصدر (عمل الباحث)

5- تحليل الأمثلة

5-1 المثال الأول AI + Architecture 2019

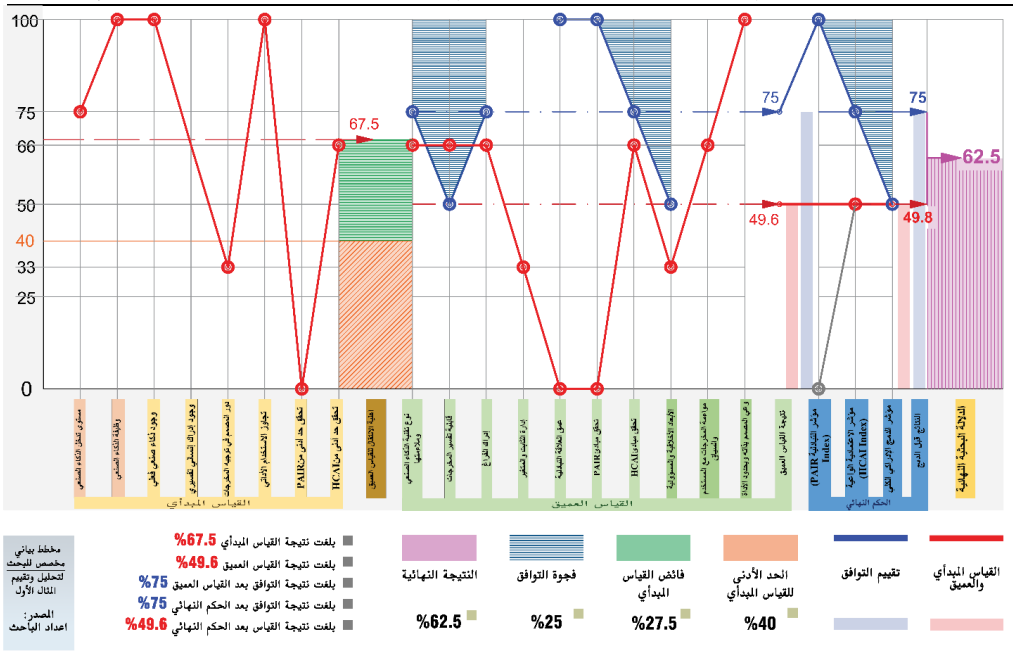
بحث أكاديمي يقدّم إطارًا نظريًا وتطبيقيًا لاستخدام تقنيات الذكاء الصنعي، ولا سيما الشبكات التوليدية، في توليد المخططات المعمارية ضمن عملية تصميم تشاركية بين المصمم والنظام الصنعي.



الشكل 1 أمثلة تطبيقية على المثال الأول المصدر AI + Architecture *2019*

جدول 16 تقييم المثال الأول بناء على محددات التقييم (اعداد الباحث)

	المحور	مؤشرات القياس	مستوى التحقق				التوصيف العام	
A	توصيف الحالة	الاسم/العنوان	2019 AI + Architecture				بحث أكاديمي يقدّم إطارًا نظريًا وتطبيقيًا لاستخدام تقنيات الذكاء الصنعي، ولا سيما الشبكات التوليدية، في توليد المخططات المعمارية ضمن عملية تصميم تشاركية بين المصمم والنظام الصنعي.	
		ماهية المثال	بحث ■	أداة □	منصة □	مشروع □		
		نطاق الاستخدام	أكاديمي ■	مهني □	تجاري □	تجريبي ■		
		مستوى ادعاء الدمج	مفاهيمي □	تخطيطي □	تفصيلي ■	تنفيذي ■	تقييمي □	
		طبيعة استخدام AI	دعم تصميمي ■	دمج إدراكي ■	تبادلية □	اعتمادية □		
							نسبة التحقق	المخرجات التحليلية
B	القياس الميداني	مستوى تدخل الذكاء الصنعي	نقش □	صور □	تحليل ■	توليد ■	%75	توصيف التدخل
		وظيفة الذكاء الصنعي	أداة □	مساعد □	شريك تحليل □	مشارك تصميمي ■	%100	توصيف الدور
			غير محقق		ضعيف	متوسط	محقق	
		وجود ذكاء صنعي فعلي	□		□	□	■	%100 أهلية التحليل
		وجود إدراك إنسقي تفسيري	□		□	■	□	%66 فاعلية المصمم
		دور المصمم في توجيه المخرجات	□		■	□	□	%33 طبيعة القيادة
		تجاوز الاستخدام الأداتي	□		□	□	■	%100 اختبار التشاركية
		تحقق حد أدنى من PAIR	■		□	□	□	%0 صلاحية التبادلية
		تحقق حد أدنى من HCAI	□		□	■	□	%66 صلاحية الاعتمادية
B′	قرار مرحلي	أهلية الانتقال للقياس العميق	B من المرحلة ≥ 40%					%67.5 مؤهل
							نسبة التحقق	نسبة التوافق مع المحور الميداني %25 - %0 %100 - %50	تفكيك إدراكي
C	القياس العميق	نوع الإدراك المتحقق	حسي □	وظيفي ■	معرفي ■	ثقافي □	تركيبي □	
			غير محقق		ضعيف	متوسط	محقق	
		نوع تقنية الذكاء الصنعي وملاءمتها	□		□	■	□	%66	%75 صلاحية التقنية
		قابلية تفسير المخرجات	□		□	■	□	%66	%50 شفافية القرار
		إدراك الفراغ	□		□	■	□	%66	%75 عمق فراغي
		إدارة الثابت والمتغير	□		■	□	□	%33	- ضبط التحول
		عمق العلاقة التبادلية	■		□	□	□	%0	%100 نضج العلاقة
		تحقق مبادئ PAIR	■		□	□	□	%0	%100 تبادلية ناضجة
		تحقق مبادئ HCAI	□		□	■	□	%66	%75 اعتمادية واعية
		الأبعاد الأخلاقية والمسؤولية	□		■	□	□	%33	%50 ضبط أخلاقي
		مواءمة المخرجات مع المستخدم والسياق	□		□	■	□	%66	- صلاحية سياقية
		وعي المصمم بذاته وبحدود الأداة	□		□	□	■	%100	- وعي نقدي
		المجموع						%49.6	%75
D	الحكم النهائي	مؤشر التبادلية (PAIR Index)	منخفض ■		متوسط □	مرتفع □		%0 يستبعد	%100 توصيف نوعي مدعوم
		مؤشر الاعتمادية الواعية (HCAI Index)	ضعيف □		جزئي ■	متكامل □		%50	%75 توصيف إشرافي
		مؤشر الدمج الإدراكي الكلي	منخفض □		متوسط ■	مرتفع □		%50	%50 مستوى الدمج
		المسافة بين الادعاء والتحقق (%)	منخفضة □		متوسطة ■	مرتفعة □		%49.8	%75 كشف الفجوة
		الدلالة البحثية النهائية	يحقق المثال هدف البحث بشكل جزئي وفق نموذج HCAI					%62.4	استخلاص معرفي



الشكل 2 مخطط بياني لتحليل المثال الأول بناء على محددات التقييم و التحليل (اعداد الباحث)

- **النتيجة التحليلية للمثال الأول**

تظهر نتيجة تحليل المثال الاول بناء على المحددات المستخلصة من البحث الى انه لا يحقق هدف البحث بشكل كامل بل بشكل جزئي وفق نموذج HCAI-AD الاعتمادي كما يظهر التحليل نسبه تحقق الادعاء الموجود ضمن المثال وهي 75% بالمقارنة مع محددات القياس المستخلصة من البحث كما تظهر نتيجة القياس 49.8% ان المثال يحقق بطريقه متوسطة المحددات الأساسية للبحث

يحقق البحث نموذجًا اعتماديًا واعيًا وفقHCAI ، ولا يحقق نموذجًا تبادليًا إدراكيًا وفقPAIR ، وهو بذلك يقدّم حالة بحثية صالحة لتحليل الفروق البنيوية بين نمطي العلاقة، لا للحكم بتفوق أحدهما على الآخر.

2-5 المثال الثاني: منصات توليد الصور المعمارية بالذكاء الصنعي **(ميد جيرني – نانو بنانا..)**

يُشير هذا المثال إلى مجموعة من المنصات الرقمية المعاصرة التي تعتمد على تقنيات الذكاء الصنعي التوليدي، ولا سيما نماذج تحويل النص إلى صورة أو الصورة إلى صورة، لإنتاج تمثيلات بصرية لمشاريع معمارية استنادًا إلى أوصاف نصية، صور مرجعية، أو معايير شكلية عامة. وتُستخدم هذه المنصات في الغالب ضمن المراحل المفاهيمية أو التمثيلية من العملية التصميمية، بهدف استكشاف الأفكار الشكلية، أو توليد تصوّرات بصرية سريعة للمشاريع.

من حيث الماهية، تندرج هذه الحالة ضمن فئة **المنصات الرقمية** ذات الطابع التقني، ويتراوح نطاق استخدامها بين التجريبي والمهني، مع حضور واسع في السياقات التجارية والإعلامية. ولا تُقدَّم هذه المنصات بوصفها أدوات تخطيط معماري مكتملة، بل بوصفها أنظمة توليد بصري تركز على الصورة واللغة الشكلية أكثر من تركيزها على المنطق الفراغي أو التنظيم الوظيفي للمشروع.



الشكل 3 مناظير هندسية توضيحية مولدة بالذكاء الصنعي لمكتبة عامة بناء على وصف متكامل المصدر (اعداد الباحث)

- تمثل هذه المحاولات الأربع الموضحة في الصور لتوليد مشاريع متكاملة ضمن نموذج ذكاء صنعي تم تدريبه على مدى عام متواصل من قبل الباحث وفق نمط تدريب (HCAI-AD) برفع العديد من الملفات و الأنماط والاعمال – تمثل تطورا تقنيا ملحوظا حيث اصبح بالإمكان توليد أفكار متعددة دون وصف متكامل بمجرد توجيه عدة أوامر مدروسة لتوصل الى مرحلة توليد مشاريع متكاملة بما يتضمن دراسة المناخ واختيار المواد ففي المثال المرفق تم توليد اربع اقتراحات مختلفة لمشاريع متعددة الاستخدامات في بيئة صحراوية .



بالإضافة الى ذلك قام النموذج بالالتزام بالشروط المحددة الى حد ما والتزم بالمعالجات الحرارية المبدئية دونما توجيه مرحلي تفصيلي واستمر بالعمل الى ان وصل الى مراحل تقديم العمل بتنسيق متكامل.

في المقابل لوحظت عدة أخطاء من ناحية التصميم والتوزيع الحركي على حساب جودة عالية بالإخراج المعماري.

تبرز أهمية هذا التطور الهائل في نماذج الذكاء الصنعي في اختزال زمن العمل وفي كثافة الأفكار وفي طرح مواد مستدامة وفي اقتراح خيارات متعددة للتوزيع الوظيفي.

المصدر: عمل الباحث

في هذه المحاولة تم توليد مقترحين مع الفرش والاظهار بشكل كامل بناء على معطيات محددة لطابق في بناء سكني مساحة البلاطة 160 متر مربع والمحددات تم ارفاقها في صورة مع الشرح والطلب بطريقة محددة.

مع الاخذ بالعلم ان المقترحين الذين تم توليدهما مختلفين فأحدهما شقة واحدة والأخر شقتين متساويتين من ناحية المساحة بالإضافة الى ذلك تجدر الإشارة ان هذا العمل واقعي وضمن شروط شديدة التحديد ورغم ذلك نجح نموذج الذكاء الصنعي المدرب مسبقا من قبل الباحث بالعمل ضمن اقل حد ممكن من الأخطاء التصميمية العامة.التزم النموذج بالأساسيات التصميمية دونما الحاجة الى توجيهه بأدق التفاصيل واستطاع توليد مخططات مقبولة حتى من ناحية استخدام المنور العادي **والمنور النصفي الذي يعتبر تحديا تكتيكيا حاسما حول هذه المحاولة الى قفزة نوعية من ناحية توليد المساقط السكنية الدقيقة كما** تمت مقارنة الابعاد لتتوضح بانها صحيحة بنسبة 100%. المصدر (عمل الباحث)

الشكل 4 المعطى الأساسي في عملية التوليد



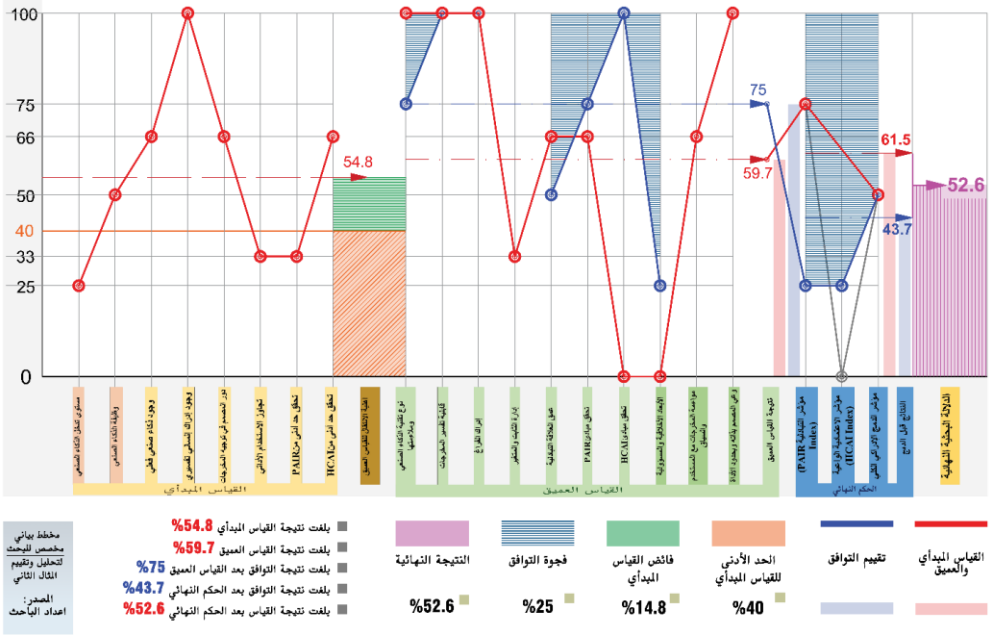
الشكل 5 المسقط المقترح الثاني شقتين للسكن



الشكل 6 المسقط لمقترح الاول شقة سكنية

جدول 17 تقييم المثال الثاني بناء على محددات التقييم (اعداد الباحث)

	المحور	مؤشرات القياس	مستوى التحقق						التوصيف العام	
A	توصيف الحالة	الاسم/العنوان	منصات توليد الصور المعمارية بالذكاء الصنعي						مجموعة من المنصات الرقمية المعاصرة التي تعتمد على تقنيات الذكاء الصنعي التوليدي، ولا سيما نماذج تحويل النص إلى صورة أو الصورة إلى صورة، لإنتاج تمثيلات بصرية لمشاريع معمارية استنادًا إلى أوصاف نصية، صور مرجعية، أو معايير شكلية عامة.	
		ماهية المثال	بحث ☐	أداة ■	منصة ■	مشروع ☐				
		نطاق الاستخدام	أكاديمي ☐	مهني ■	تجاري ■	تجريبي ☐				
		مستوى ادعاء الدمج	مفاهيمي ■	تخطيطي ■	تفصيلي ■	تنفيذي ☐	تقييمي ☐			
		طبيعة استخدام AI	دعم تصميمي ■	دمج إدراكي ☐	تبادلية ■		اعتمادية ■			
									نسبة التحقق	المخرجات التحليلية
B	القياس المبدئي	مستوى تدخل الذكاء الصنعي	نقاش ☐	صور ■	تحليل ☐	توليد ☐			%25	توصيف التدخل
		وظيفة الذكاء الصنعي	أداة ■	مساعد ■	شريك تحليل ☐	مشارك تصميمي ☐			%50	توصيف الدور
			غير محقق		ضعيف	متوسط	محقق			
		وجود ذكاء صنعي فعلي	☐		☐	■	☐		%66	أهلية التحليل
		وجود إدراك إنساني تفسيري	☐		☐	☐	■		%100	فاعلية المصمم
		دور المصمم في توجيه المخرجات	☐		☐	■	☐		%66	طبيعة القيادة
		تجاوز الاستخدام الأداتي	☐		■	☐	☐		%33	اختبار التشاركية
		تحقق حد أدنى من PAIR	☐		■	☐	☐		%33	صلاحية التبادلية
		تحقق حد أدنى من HCAI	☐		☐	■	☐		%66	صلاحية الاعتمادية
B'	قرار مرحلي	أهلية الانتقال للقياس العميق	B من المرحلة ≥ 40%						%54.8	مؤهل
									نسبة التحقق	نسبة التوافق مع المحور المبدئي (%25 - 0، %100 - %50)	تفكيك إدراكي
C	القياس العميق	نوع الإدراك المتحقق	حسي ☐	وظيفي ☐	معرفي ☐	ثقافي ☐	تركيبي ■			
			غير محقق		ضعيف	متوسط	محقق			
		نوع تقنية الذكاء الصنعي وملاءمتها	☐		☐	☐	■		%100	%75	صلاحية التقنية
		قابلية تفسير المخرجات	☐		☐	☐	■		%100	%100	شفافية القرار
		إدراك الفراغ	☐		☐	☐	■		%100	%100	عمق فراغي
		إدارة الثابت والمتغير	☐		■	☐	☐		%33	-	ضبط التحول
		عمق العلاقة التبادلية	☐		☐	■	☐		%66	%50	نضج العلاقة
		تحقق مبادئ PAIR	☐		☐	■	☐		%66	%75	تبادلية ناضجة
		تحقق مبادئ HCAI	■		☐	☐	☐		%0	%100	اعتمادية واعية
		الأبعاد الأخلاقية والمسؤولية	■		☐	☐	☐		%0	%25	ضبط أخلاقي
		مواءمة المخرجات مع المستخدم والسياق	☐		☐	■	☐		%66	-	صلاحية سياقية
		وعي المصمم بذاته وبحدود الأداة	☐		☐	■	☐		%66	-	وعي نقدي
		المجموع							%59.7	%75	
D	الحكم النهائي	مؤشر التبادلية (PAIR Index)	منخفض ☐			متوسط ☐	مرتفع ■		%75	%25	توصيف نوعي مدعوم
		مؤشر الاعتمادية الواعية (HCAI Index)	ضعيف ■			جزئي ☐	متكامل ☐		%0 يستبعد	%25	توصيف إشرافي
		مؤشر الدمج الإدراكي الكلي	منخفض ☐			متوسط ■	مرتفع ☐		%50	%50	مستوى الدمج
		المسافة بين الادعاء والتحقق (%)	منخفضة ☐			متوسطة ☐	مرتفعة ☐		%61.5	%43.7	كشف الفجوة
		الدلالة البحثية النهائية	يحقق المثال هدف البحث بشكل جزئي وفق نموذج PAIR						%52.6		استخلاص معرفي



الشكل 7 مخطط بياني لتحليل المثال الثاني بناء على محددات التقييم و التحليل (اعداد الباحث)

- **النتيجة التحليلية للمثال الثاني**

تشير نتائج مسطرة القياس إلى أن هذا المثال يحقق **نسبة تحقق كلية مقدارها 52.6%**، وهي نسبة دالّة على حضور تقني فعّال للذكاء الصنعي في إنتاج المخرجات البصرية، لكنها تكشف في الوقت ذاته عن **ضعف بنيوي في دمج الإدراك الإنساني ضمن العملية التصميمية** .تعكس هذه النسبة نمط استخدام واسع الانتشار، لكنه محدود العمق من حيث البنية الإدراكية والمنهجية.

بناءً على نتائج مسطرة القياس، يمكن توصيف منصات توليد الصور المعمارية بالذكاء الصنعي بوصفها أدوات قوية تقنيًا وضعيفة إدراكيًا .فهي تحقق قيمة عالية في التمثيل البصري والاستكشاف الشكلي، وتؤسس لنمط مشاركة أولي مع المصمم، لكنها لا تحقق دمجًا معرفيًا أو منهجيًا كافيًا داخل العملية التصميمية. وتتمثل أهم دلالاتها البحثية في كشف الفارق بين التشاركية المعلنة والاعتمادية الفعلية على النظام، ما يجعلها حالة مناسبة لتحليل حدود النموذج التبادلي PAIR

تكشف نتائج مسطرة التقييم أن منصات توليد المخططات المعمارية تلقائيًا تمثل **مرحلة متقدمة تقنيًا لكنها أحادية الاتجاه إدراكيًا** .فهي تتفوق على منصات توليد الصور في العمق الوظيفي والتأثير المباشر على القرار التصميمي، إلا أنها تُرسّخ نمطًا **اعتماديًا وفق نموذجHCAI** ، حيث يتحقق الإشراف والضبط، لكن تغيب التبادلية الإدراكية والمنهجية التي يتطلبها نموذجPAIR .

4-5 نتائج الدراسة التحليلية

تُظهر النتائج التحليلية المستخلصة من تطبيق محددات القياس أن دمج الذكاء الصنعي مع الإدراك الإنساني في العملية التصميمية المعمارية لا يتحقق بمجرد إدخال أداة ذكية أو اعتماد مخرجات توليدية، بل يتحقق عندما تُعاد صياغة العملية التصميمية بوصفها منظومة تفاعلية يُعاد فيها توزيع الأدوار المعرفية بين الإنسان والنظام وفق منطق محدد يضبط التبادل أو يضبط الاعتماد. وتكشف هذه النتائج أن جوهر الدمج لا يتحدد بقدرة النظام على الإنتاج، وإنما بقدرته على الاندماج داخل بنية القرار التصميمي بما يسمح للإدراك الإنساني أن يكون عنصرًا منشئًا للمعنى لا عنصرًا مُستهلكًا للنتائج.

بذلك، تُغلق مرحلة التحليل على نتيجة مفصلية: دمج الذكاء الصنعي والإدراك الإنساني في التصميم المعماري ليس هدفًا عام او مبهم، بل نموذجًا قابلًا للقياس والتشخيص. وقد أثبتت مسطرة القياس أن هذا الدمج يمكن تحديده بدقة من خلال مؤشرات تبيّن موقع الإدراك داخل الحلقة، وعمق العلاقة، وقابلية التفسير، وقدرة المنظومة على تحويل المخرجات إلى قرار تصميمي واعٍ. ومن هذا المنطلق، تصبح الصيغة العلمية التبادلية التي يستهدفها البحث قابلة للتمييز والتقييم، وتتحول من مفهوم نظري عام إلى إطار تحليلي يحدد أنماط العلاقة ويضبط شروط تحققها داخل العملية التصميمية المعمارية

6- النتائج والتوصيات:

النتائج العامة:

1) يتحدد مفهوم الذكاء الصنعي في العمارة بوصفه طيفًا وظيفيًا متعدد المستويات يبدأ من "الدعم الأداتي" وينتهي عند "المشاركة في بناء القرار التصميمي"، الأمر الذي يجعل

توصيف أي حالة مرهونًا بتحديد مستوى التدخل (نقاش/صور/تحليل/توليد) ووظيفته (أداة/مساعد/شريك/مشارك تصميمي) بدل الاكتفاء بتسمية عامة.

2) يتضح أن موقع المصمم داخل الحلقة هو المحدد الأول لطبيعة العلاقة؛ فحين يقتصر دوره على الانتقاء أو التحسين اللاحق تصبح العلاقة اعتمادًا مقنّعًا، وحين يصبح تفسيره وتوجيهه جزءًا تشغيليًا من التوليد تتشكل إمكانية التبادلية.

3) يعد النموذج التبادلي PAIR المبتكر في البحث والمخصص للبحث أحد أهم النتائج البحثية التي تحقق هدف البحث وفق التبادلية الفعالة.

4) يستطيع النموذج التبادلي PAIR المبتكر في البحث توظيف التشاركية بين نماذج الذكاء الصنعي واليات إدراك التصميم سواء لدى مستخدم الفراغ او لدى المصمم بشكل يحقق أعلى فاعلية ممكنة.

5) تتأكد قيمة النموذج التبادلي PAIR المبتكر خصيصا لهذا البحث بوصفه إطارًا يعزز "التبادلية الإدراكية" عندما تتحقق المشاركة أثناء التكوين، والتبادل أثناء التحول، والمنهجية أثناء الضبط، لا عند الاكتفاء بتسليم مخرجات متعددة للاختيار بينها.

6) يعد النموذج الإعتمادي HCAI–AD المبتكر في البحث والمخصص للبحث أحد أهم النتائج البحثية التي تحقق هدف البحث وفق نمط الاعتمادية الواعية.

7) يستطيع النموذج الإعتمادي HCAI–AD المبتكر في البحث توظيف الاعتمادية الواعية ويتضمن ذلك تدريب وتعليم نماذج الذكاء الصنعي من جهة وتطوير مهارات المصمم لمجاراة عمل النموذج.

8) تتأكد قيمة نموذج HCAI بوصفه إطارًا يلتقط "الاعتمادية الواعية" عندما يكون الإشراف والتوجيه والضبط جزءًا من تصميم العلاقة، بما يضمن بقاء المسؤولية المهنية والقرار النهائي ضمن نطاق إدراكي إنساني مضبوط.

9) يثبت التحليل أن PAIR و HCAI–AD ليسا درجات على سلم واحد، بل نمطان متكافئان يصفان شكلين مختلفين للعلاقة؛ لذا فإن نجاح أي حالة يُقاس بوضوح النمط المتحقق ودقته المنهجية، لا بمحاولة الجمع الكامل بين النمطين.

10) غالبية التطبيقات والمنصات المعاصرة ذات بنية تشاركية نظريًا، لكنها تُستخدم عمليًا ضمن نمط اعتمادي يُقصي الإدراك الإنساني من داخل الحلقة التصميمية.

11) التبادلية PAIR لا تتحقق إلا عند إدخال الإدراك الإنساني بوصفه عنصرًا تشغيليًا في توجيه، تفسير، وإعادة ضبط مسار التوليد قبل تثبيت النتائج.

12) الاعتمادية الواعية HCAI–AD تمثل نمطًا مشروعًا ومهمًا عندما يكون الذكاء الصنعي مولّدًا أساسيًا، ويحتفظ المصمم بدور الإشراف والضبط والمسؤولية.

13) لا يمكن تحقيق PAIR و HCAI–AD معًا بشكل كامل في الحالة الواحدة؛ إذ يمثل كل نموذج نمط علاقة مختلفًا يجب تشخيصه لا المفاضلة بينه.

التوصيات البحثية

1. **يوصي البحث بضرورة الانتقال من التعامل الأداتي مع الذكاء الصنعي إلى التعامل المنهجي معه**، عبر إعادة تصميم العملية التصميمية ذاتها بما يسمح بتموضع الذكاء الصنعي داخل بنية القرار المعماري، لا على هامشها، وبما يحفظ للإدراك الإنساني دوره التفسيري والقيادي.
2. **يؤكد البحث على أهمية اعتماد نماذج تفسيرية واضحة للعلاقة بين الإنسان والنظام**، وعدم الاكتفاء بالوصف العام للتشاركية؛ إذ يوصي بتبنّي نماذج مثل **PAIR** و**HCAI** بوصفها أطرًا متكافئة لتشخيص أنماط العلاقة، لا نماذج متنافسة أو متفاضلة، لكل منها مجال استخدامه المشروع وحدوده المنهجية.
3. **يوصي البحث بضرورة التمييز الصريح بين التبادلية والاعتمادية الواعية** داخل أي عملية تصميمية تستخدم الذكاء الصنعي، لما لذلك من أثر مباشر على توزيع المسؤولية، اتخاذ القرار، وحفظ الدور المهني للمصمم المعماري.

4. **يوصي البحث بتضمين قابلية التفسير بوصفها معيارًا إلزاميًا** في تقييم أي أداة أو منصة تصميمية تعتمد على الذكاء الصنعي، بحيث لا تُعتمد المخرجات غير القابلة للتفسير في القرارات المعمارية الجوهرية.
5. **يدعو البحث إلى إعادة النظر في مناهج تعليم العمارة**، عبر إدخال مفاهيم الذكاء الصنعي ضمن إطار إدراكي–تحليلي، لا ضمن إطار تقني بحت، بما يُمكّن الطلبة من فهم العلاقة بين التوليد، التفسير، والإدراك منذ المراحل التعليمية الأولى.
6. **يؤكد البحث على أهمية مواكبة تطور الذكاء الصنعي بوصفه واقعًا معرفيًا معاصرًا لا خيارًا تقنيًا عابرًا**، مع ضرورة تعميق البحث في الإدراك الإنساني لضمان ألا يؤدي هذا التطور إلى اختزال التصميم أو تهميش البعد الإنساني فيه.
7. **يؤكد البحث أن مستقبل التصميم المعماري الذكي لا يكمن في إحلال الذكاء الصنعي محل المصمم**، بل في بناء علاقة معرفية منضبطة تُعيد تعريف أدوار الطرفين، وتسمح بتطور متوازن يجمع بين قوة الحساب وعمق الإدراك الإنساني.

كما توصي هذه الدراسة بتأسيس مقاربة مؤسسية ومنهجية لعلاقة الذكاء الصنعي بالإدراك الإنساني في العمارة، تُعامل الذكاء الصنعي بوصفه شريكًا منهجيًا أو نظامًا معتمدًا واعيًا بحسب السياق، وتُبقي الإدراك الإنساني المرجعية العليا في تشكيل القرار المعماري ومعناه وإدخال نتائج هذه المقاربة في مناهج تعليم الهندسة المعمارية في كافة المراحل.

المراجع:

22. Sacks, O. (2015). *On the Move: A Life*. Knopf.
23. Holl, S. (2007). *Questions of Perception: Phenomenology of Architecture*. William Stout Publishers.
24. Shneiderman, B. (2020). Human-Centered Artificial Intelligence: Three Fresh Ideas. *AIS Transactions on Human-Computer Interaction*, 12(3), 109–124.

25. Hassabis, D., Kumaran, D., Summerfield, C., & Botvinick, M. (2017). Neuroscience-Inspired Artificial Intelligence. *Neuron*, 95(2), 245–258.
26. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep Learning. *Nature*, 521(7553), 436–444.
27. Lake, B. M., Ullman, T. D., Tenenbaum, J. B., & Gershman, S. J. (2017). Building Machines That Learn and Think Like People. *Behavioral and Brain Sciences*, 40, e253.
28. Damasio, A. (1999). *The Feeling of What Happens: Body and Emotion in the Making of Consciousness*. Harcourt.
29. Minsky, M. (1986). *The Society of Mind*. Simon & Schuster.
30. Kurzweil, R. (2005). *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*. Penguin Books.
31. Searle, J. R. (1980). Minds, Brains, and Programs. *Behavioral and Brain Sciences*, 3(3), 417–457.
32. Chalmers, D. (2010). *The Character of Consciousness*. Oxford University Press.
33. Boden, M. A. (2018). *Artificial Intelligence: A Very Short Introduction*. Oxford University Press.
34. Peters, T., & Peters, B. (2021). *Machine Hallucinations: Architecture and AI*. Architectural Design.
35. Oxman, N. (2010). Material-based Design Computation. *MIT Design Laboratory Papers*.

مراجع إضافية استخدمت ضمن الجداول والمقارنات:

- Norman, D. A. (2013). *The Design of Everyday Things*. Basic Books.
- Gattaca, A., & Byrne, K. (2022). Cognitive models in computational design thinking. *Journal of Architectural Research*, 27(2), 55–74.
- Eysenck, M. W. (2012). *Fundamentals of Cognition* (2nd ed.). Psychology Press.
- Hinton, G. (2022). *Understanding Deep Learning — A Guide for Humans*. University of Toronto Press.
- Coyne, R., & Snodgrass, A. (1995). *Design Reasoning: Computation, Cognition, and Collaboration*. Lawrence Erlbaum Associates.