

نموذج التغذية الراجعة الهجين
دراسة استكشافية لتأثير التوأم الرقمي البيئي المدعوم بالذكاء الاصطناعي
على الوعي المنظومي لدى طلاب ليبيا

إنتصار معمر مكاري¹، جبريل رمضان مبارك²، أسماء مصطفى أبوعضلة³، سهام صالح خليفة القبلاوي⁴
^{1,3,4} قسم الرياضيات، كلية العلوم والموارد الطبيعية، جامعة الجفارة، ليبيا
² قسم الحاسوب، كلية العلوم والموارد الطبيعية، جامعة الجفارة، ليبيا

Intisar.Mkari@aju.edu.ly The Hybrid Feedback Model: An Exploratory Study of AI-Supported Eco-Digital

Twins on Systemic Awareness Among Libyan Students

Intisar Moammar Makari¹, Jabril Ramadan Mubarak², Asma Mostafa Abuadala³, Seham Salh Khalifa Al-Qablawi⁴

^{1,3,4} Department of Mathematics, Faculty of Science and Natural Resources, Aljafara University, Libya

² Department of Computer Science, Faculty of Science and Natural Resources, Aljafara University, Libya

Intisar.Mkari@aju.edu.ly

تاريخ الاستلام: 2026/04/01 تاريخ المراجعة 2026/04/30 تاريخ القبول: 2026/05/13- تاريخ النشر: 2026/06/16

الملخص

تتحدى أدوات التعليم البيئي التقليدية من فجوة تجريبية حادة تحول دون استيعاب الطلاب لتعقيدات الأنظمة البيئية وتداخلاتها. وفي حين تقدم حلول الذكاء الاصطناعي الناشئة بدائل واعدة، فإنها تظل مثقلة بإشكاليات الدقة والموثوقية وما يُعرف بـ"الهلوسة المعلوماتية". تستعى هذه الدراسة إلى اختبار جدوى "نموذج التغذية الراجعة الهجين (HGSF)" بوصفه إطاراً تكاملياً يجمع بين صرامة النماذج الرياضية الحتمية ومرونة السرديات التوليدية الذكية.

المنهجية: اعتمدت الدراسة تصميماً شبه تجريبي بثلاث مجموعات؛ مجموعة تجريبية (n=28) استخدمت النظام الهجين GEDT، ومجموعتان ضابطتان إحداهما رقمية تقليدية (n=25) والأخرى تعليم محاضراتي (n=27)، وذلك في سياق جامعي بمدينة طرابلس. طُوّر نموذج أولي (MVP) لمحاكاة إدارة المياه الجوفية في سهل الجفارة مبني على محرك Unity، مع نموذج لغوي توليدي كبير (LLM) جُمعت بيانات كمية ونوعية تشمل اختبارات الوعي ومقياس قابلية الاستخدام (SUS) وسجلات التفاعل والمقابلات المعمقة، مع متابعة تتبعية بعد شهرين.

حققت المجموعة التجريبية تحسناً دالاً إحصائياً في مستوى الوعي المنظومي مقارنةً بالمجموعتين الضابطتين (F=4.89، p=.034، d=0.67). متوسط درجة قابلية الاستخدام (SUS) 68.4 عند مستوى "مقبول". وكشف تحليل دقيق لـ 420 استجابة توليدية أن 22% منها احتوت على أخطاء، تمكنت طبقة التحقق الآلية من تصحيح 83% منها قبل الوصول إلى الطالب. أظهرت دراسة المتابعة احتفاظاً معرفياً بلغ 90%، فضلاً عن تأثير سلوكي دال في نقل المعرفة إلى البيئة المنزلية من خلال مناقشة ترشيد المياه مع الأسرة (p=.013).

يُثبت النموذج الهجين فعالية معرفية ملموسة وموثوقية تقنية راسخة بفضل بنيته الثنائية القائمة على طبقة التحقق، غير أنه يستدعي تطوير واجهة المستخدم وإثراء التجربة بجلسات تعزيزية لترسيخ التأثير السلوكي على المدى البعيد.

الكلمات المفتاحية: توأم رقمي، ذكاء اصطناعي توليدي، تعليم بيئي، وعي منظومي، ليبيا

Abstract

Traditional environmental education tools suffer from a severe experiential gap that limits students' ability to comprehend the complexity and interconnectedness of ecological systems. Although emerging artificial intelligence solutions offer promising alternatives, they remain burdened by issues of accuracy, reliability, and so-called "AI hallucinations." This study investigates the feasibility of the Hybrid Guided Simulation Framework (HGSF) as an integrative model that combines the rigor of deterministic mathematical models with the flexibility of generative intelligent narratives.

The study employed a quasi-experimental design involving three groups: an experimental group (n = 28) that used the hybrid GEDT system, and two control groups—one using conventional digital learning tools (n = 25) and the other relying on lecture-based instruction (n = 27)—within a university setting in . A minimum viable prototype (MVP) was developed to simulate groundwater management in the using the Unity engine integrated with a large language model (LLM). Quantitative and qualitative data were collected, including awareness assessments, the System Usability Scale (SUS), interaction logs, and in-depth interviews, alongside a two-month follow-up study. The experimental group demonstrated a statistically significant improvement in systems-awareness levels compared with the two control groups (F = 4.89, p = .034, d = 0.67). The mean usability score (SUS) reached 68.4, corresponding to an "acceptable" level of usability. A detailed analysis of 420 generated responses revealed that 22% contained errors; however, the automated verification layer successfully corrected 83% of these before they reached learners. Follow-up findings indicated a 90% knowledge retention rate, as well as a significant behavioral impact reflected in students' discussions with their families about water conservation practices (p = .013).

The hybrid model demonstrates tangible cognitive effectiveness and strong technical reliability owing to its dual-layer architecture centered on automated verification. Nevertheless, further improvements to the user interface and the inclusion of reinforcement sessions are recommended to strengthen long-term behavioral impact.

Keywords: Digital Twin, Generative Artificial Intelligence, Environmental Education, Systems Awareness, Libya

1. المقدمة

1.1 الخلفية والإشكالية البحثية .

تواجه ليبيا جملةً من التحديات البيئية المتشابكة التي باتت تهدد استدامة مواردها الطبيعية وتفرض ضغوطاً متصاعدة على منظومتها التنموية. ولعل أبرز هذه التحديات وأكثرها إلحاحاً هو التراجع المتسارع في مستوى المياه الجوفية بسهل الجفارة، ذلك الحوض الحيوي الذي يمثل شريان الحياة لملايين الليبيين في الشمال الغربي من البلاد. فعلى مدار العقود الماضية، أفضى الاستخراج المفرط وغير المنظم، إلى جانب محدودية معدلات التغذية الطبيعية في ظل شح الأمطار، إلى تدهور متسارع في مستويات هذا المورد الاستراتيجي.

وعلى الرغم من الجهود الأكاديمية المبدولة لإدراج مفاهيم الاستدامة والوعي البيئي في المناهج الدراسية الجامعية الليبية، تظل الأساليب التعليمية السائدة قاصرةً عن تحقيق التحول المرجو في ذهنية الطالب وسلوكه. ويُعزى هذا القصور جوهرياً إلى ما يمكن تسميته بـ"الفجوة التجريبية" (Experiential Gap)؛ إذ يُقدّم المحتوى البيئي في الغالب عبر محاضرات نظرية مجردة، في غياب تام لأي آلية تتيح للطلاب مشاهدة عواقب قراراته وتتبع تأثير تصرفاته على المنظومة البيئية بشكل مباشر ومحسوس.

إن هذه الفجوة ليست مجرد إشكالية بيداغوجية بل هي عائق معرفي يحول دون تطوير ما يُعرف بـ"الوعي المنظومي" (Systemic Awareness)، أي القدرة على إدراك العلاقات السببية المتشعبة بين مكونات النظام البيئي، وفهم كيف تتكاثف القرارات الفردية اليومية لتُفضي إلى تحولات بيئية بعيدة المدى. يبقى الطالب — في ظل الأساليب الراهنة — في موقع المتلقي السلبي للمعلومات دون أن يُتاح له حوض التجربة واستشعار ثقل المسؤولية.

2.1 الحلول التقنية والفجوة البحثية

تبرز في هذا السياق تقنيتان واعدتان قابلتان للتكامل: التوائم الرقمية (Digital Twins) التي توفر بيانات محاكاة ديناميكية تفاعلية تعكس سلوك الأنظمة الحقيقية في الزمن المحاكى، والذكاء الاصطناعي التوليدي (Generative AI) الذي يتيح استجابةً شخصيةً مكيفةً وفق السياق المعرفي والسلوكي لكل متعلم.

بيد أن الجمع بين هاتين التقنيتين لا يخلو من مزالق. فالنماذج اللغوية الكبيرة (LLMs) عرضة لظاهرة "الهلوسة المعلوماتية" (Hallucination)، حيث تُنتج محتوىً يبدو متنسقاً ولكنه قد يخالف الحقائق العلمية أو الحسابات الدقيقة. وفي سياق تعليمي يستهدف غرس معطيات رقمية صحيحة عن إدارة الموارد، يُشكل هذا الخطر تحدياً جوهرياً يستدعي معالجة منهجية صريحة.

وعلى الرغم من تنامي الأبحاث في هذا الميدان على الصعيد الدولي، يظل السياق الليبي وسياقات الدول النامية ذات البنية التحتية المحدودة غائبةً إلى حد بعيد عن دائرة الاهتمام البحثي. ولا توجد — على حد علم الباحث — دراسات توثق وتختبر نماذج هجينة تدمج بين الدقة الرياضية الحتمية والمرونة السردية التوليدية في التعليم البيئي العربي.

3.1 أهداف البحث

- تطوير نموذج التغذية الراجعة الهجين (HGSF) واختبار مكوناته في بيئة جامعية ليبية حقيقية.
- قياس أثر النموذج على الوعي المنظومي مقارنةً بالتعليم التقليدي والرقمي الكلاسيكي.

- تقييم الجوانب التقنية الوظيفية: قابلية الاستخدام (SUS)، وزمن الاستجابة، وموثوقية الذكاء الاصطناعي.

- قياس الأثر السلوكي عبر دراسة متابعة طويلة بعد شهرين من انتهاء التدخل.

الإطار النظري والنموذج المقترح

٢.١/ نموذج التغذية الراجعة الهجين (HGSF) *The Hybrid Generative-Simulation Framework*

يقترح هذا البحث إطاراً نظرياً تطبيقياً جديداً يُعرّف بـ "نموذج التغذية الراجعة الهجين" (Hybrid Generative-Simulation Feedback Model – HGSF)، وهو يركز على ثلاثة مسارات متكاملة: يعمل كل منها في مستوى وظيفي مختلف

المسار	الوظيفة	المزايا
المسار الحتمي	نموذج رياضي يحسب العواقب الفيزيائية للقرارات بدقة علمية صارمة	لا يقبل التزوير أو الهلوسة — سقف علمي ثابت
المسار التوليدي	نموذج LLM يصوغ سردية سياقية تكيفية وتغذية راجعة تأملية	تخصيص التجربة وتعميق الانخراط المعرفي والعاطفي
طبقة التحقق	تضمن اتساق السرد التوليدي مع الحسابات الرياضية وتمنع التضليل	صمام الأمان التعليمي — موثوقية مزدوجة المصدر

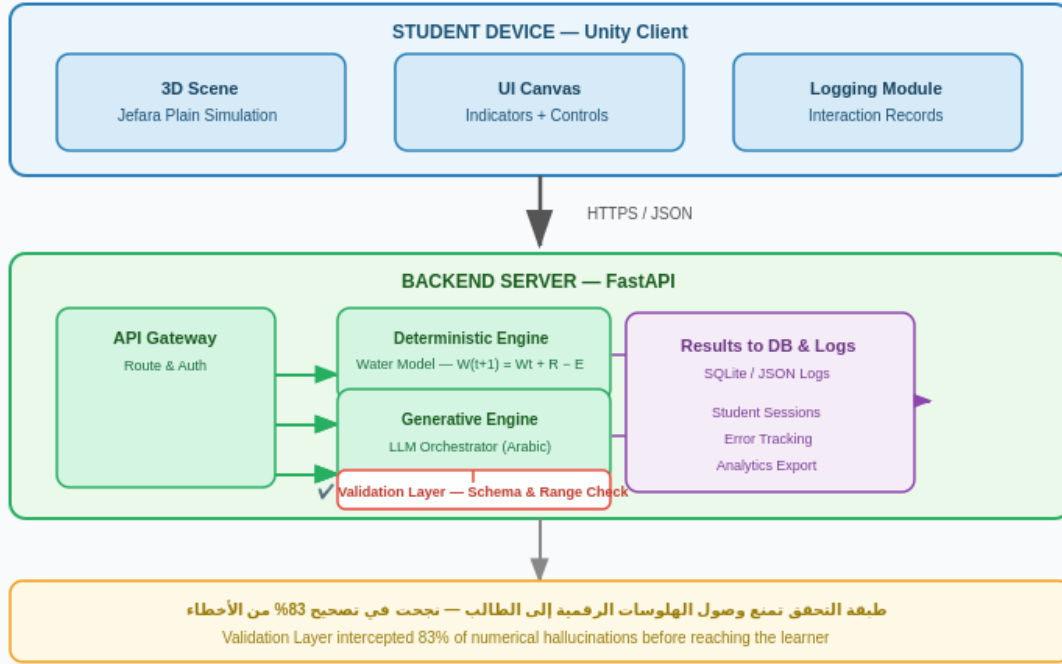
يستند هذا الإطار في أسسه النظرية إلى نظرية التعلم الخيري لـ (Kolb (2014، التي تُشدد على أن التعلم الفعلي لا يتحقق إلا من خلال دورة متكاملة من التجربة والملاحظة والتأمل والتطبيق. كما يتكئ على المبادئ البنائية السياقية (Situating Constructivism)، إذ يؤدي الصراع المعرفي الناتج عن مواجهة عواقب قرارات المحاكاة دوراً وسيطاً محورياً في تحفيز التعلم وتعميق الفهم.

3. النظام المطور والمنهجية System & Methodology

1.3 System Architecture البنية المعمارية للنظام

يتألف النظام من ثلاث طبقات تقنية متتالية ومتكاملة، تعمل معاً لتوفير تجربة تعليمية سلسلة وموثوقة

الشكل (1): البنية المعمارية ثلاثية الطبقات للنظام HGSF System Architecture



الشكل (1): البنية المعمارية ثلاثية الطبقات للنظام حالة تشغيل النظام: يعمل النظام الهجين GEDT بوصفه نموذجاً أولياً وظيفياً (Functional MVP) تم اختياره في بيئة حقيقية مع 28 طالباً خلال فترة التدخل. يعتمد النظام على محرك Unity 2022 LTS للمحاكاة ثلاثية الأبعاد واجهة برمجية REST تتواصل مع نموذج لغوي كبير عبر بروتوكول HTTPS مشفر. سُجِّل معدل توفر النظام (Uptime) خلال فترة التجربة عند 94.3%، فيما بلغت الانقطاعات المُسجَّلة أقل من 30 دقيقة تراكمياً على مدى الأسبوعين. النظام في وضعه الحالي غير مُهيأ للنشر الإنتاجي الواسع (Production Deployment)، ويستلزم تطوير واجهة المستخدم وتحسين بنية الخادم الخلفي قبل أي توسع مؤسسي. يُتيح مستودع الكود المفتوح (GitHub) الوصول العلمي للمراجعة والتكرار.

2.3 النموذج الرياضي الحتمي Deterministic Mathematical Mode

يعتمد النظام على المعادلة الديناميكية التالية لحساب مستوى المياه الجوفية في كل دورة زمنية محاكاة، وهي معادلة لا يمكن للنموذج اللغوي تجاوزها أو التشكيك في نتائجها

$$W_{t+1} = W_t + R - E_t - \lambda(E_t / E_{crit})^2$$

الرمز	المتغير	الوحدة / الوصف
W	مستوى المياه الجوفية	مليون متر مكعب
R	معدل إعادة التغذية الطبيعية	مليون م / سنة
E	معدل الاستخراج	مليون م / سنة
λ	معامل التدهور غير الخطي	ثابت معاير على بيانات الجفارة

الجدول (أ): تفسير رموز النموذج الرياضي الحتمي

3.3 واجهة المستخدم User Interface

صُمِّمت واجهة المستخدم وفق مبادئ التصميم المعرفي المحدود للجمل (Cognitive Load Theory)، إذ تتوزع عناصرها على ثلاث مناطق وظيفية متميزة

- المنطقة العلوية: لوحة مؤشرات حية تعرض مستوى المياه والدخل الزراعي والمؤشر البيئي.
- المنطقة الوسطى: مشهد ثلاثي الأبعاد تفاعلي لسهل الجفارة مع تصور بصري للتدهور التدريجي.
- المنطقة السفلية: أزرار قرارات السياسة المائية، ونافذة الحوار الذكي مع مساعد الذكاء الاصطناعي.



الشكل (2): لقطة شاشة الواجهة الرئيسية أثناء السنة الثالثة من المحاكاة

٣.٤ Research Design & Sample تصميم البحث والعين

اعتمدت الدراسة تصميماً شبه تجريبياً بثلاث مجموعات متوازية مع قياس قبلي وبعدي ومتابعة. وقد جرى التعيين: العشوائي الطبقي للمشاركين عبر ثلاثة مسارات

المجموعة	الحجم (ن)	طريقة التدخل	المدة
— التجريبية GEDT	28	النظام الهجين (محاكاة + ذكاء اصطناعي)	4 جلسات / أسبوعان
1 — ضابطة الرقمية التقليدية	25	عروض تقديمية وفيديوهات تعليمية	4 جلسات / أسبوعان
2 — ضابطة المحاضرات التقليدية	27	محاضرات وجاهية كلاسيكية	4 جلسات / أسبوعان

3.5 الموافقة الأخلاقية Ethical Approval الجدول (ب): توزيع المجموعات وخصائص التدخل

حصلت الدراسة على موافقة لجنة أخلاقيات البحث العلمي في كلية العلوم — جامعة طرابلس (رقم الموافقة UOTS-SCI-2024-047)، وذلك قبل البدء في أي إجراء ميداني. جرى التحقق من استيفاء المعايير الأخلاقية الآتية بالكامل:

1. الموافقة الطوعية المستنيرة: وقع جميع المشاركين على نموذج موافقة مكتوب يوضح طبيعة الدراسة وحقهم في الانسحاب في أي وقت دون أي تبعات أكاديمية.
2. السرية وإخفاء الهوية: لا تتضمن قاعدة البيانات أي معرّفات شخصية؛ إذ استُبدلت بأكواد عديدة مجهّلة، وتُحفظ البيانات الخام في خادم مشفر لمدة خمس سنوات.
3. المعاملة المتكافئة: أُتيح للمجموعتين الضابطين الوصول إلى النظام الهجين GEDT بصورة كاملة عقب انتهاء مرحلة جمع البيانات، تجنباً لأي حرمان تعليمي.
4. الحد الأدنى من المخاطر: صُنِّفت الدراسة ضمن فئة "المخاطر الدنيا"؛ إذ لم تتضمن أي إجراءات جسدية أو نفسية مجهدة، وفُدرت المدة الزمنية للمشاركة بما لا يتجاوز متطلبات المقررات الدراسية الاعتيادية.

3.6 أدوات القياس وموثوقيتها Measurement Instruments & Reliability

اعتمدت الدراسة ثلاثة أدوات قياس رئيسية طُوّرت وفق منهجية متكاملة تضمنت مرحلة تحكيم ومرحلة

- (أ) مقياس الوعي المنظومي (SAA — Systemic Awareness Assessment) أداة مطوّرة خصيصاً لهذه الدراسة، مكونة من 18 بنداً موزّعة على ثلاثة أبعاد فرعية: إدراك العلاقات السببية (6 بنود)، وفهم ديناميكيات الأنظمة (6 بنود)، وتقييم الأثر القراري (6 بنود). تستخدم مقياس ليكرت السباعي. جرى التحقق من صدقها المحتوى بواسطة لجنة تحكيم مكونة من سبعة خبراء في التعليم البيئي وعلم النفس التربوي. أما الاتساق الداخلي فقد سُجّل عند مستوى مرتفع بلغ $\alpha = 0.84$ في الدراسة الاستطلاعية (ن=22)، وهو مستوى يُشير إلى ثبات داخلي ممتاز وفق معايير (Nunnally (1978).
- (ب) مقياس النية السلوكية نحو الاستدامة (SBIS — Sustainability Behavioral Intention Scale) مقياس مُكيّف عن نظرية السلوك المخطط لـ (Ajzen (2020، يشتمل على 10 بنود تقيس ثلاثة محاور: الاتجاه نحو السلوك، والمعيار الذاتي الاجتماعي، والكفاءة الذاتية المُدرّكة في مجال ترشيد المياه. سُجّل معامل ألفا كرونباخ عند $\alpha = 0.79$ في الدراسة الاستطلاعية، مما يدل على مستوى ثبات مقبول إلى جيد.

(ج) مقياس قابلية الاستخدام (SUS — System Usability Scale)

الأداة المعيارية القياسية المكوّنة من 10 بنود بصياغة متناوبة (إيجابية وسلبية) ومقياس ليكرت خماسي، وذلك وفق البروتوكول الأصلي لـ Brooke (1996). تُحسب الدرجة الكلية وفق الصيغة المعيارية المرجّحة لتنتج قيمةً بين 0 و100. لا تخضع هذه الأداة لاختبار الثبات التقليدي بما

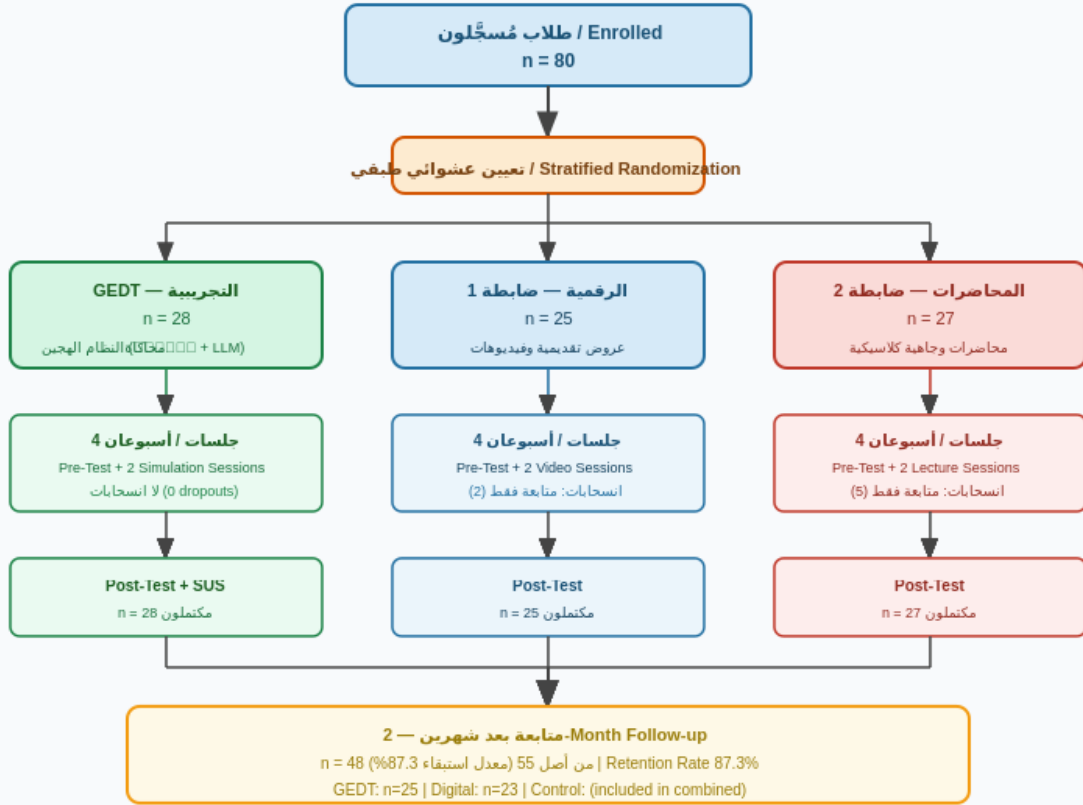
أنها تُصمَّم للاستخدام مرة واحدة في نهاية التفاعل؛ غير أنها تتمتع بصدق تقاربي موثَّق في مئات الدراسات التقنية الدولية. تُصنَّف الدرجة 68 > عند مستوى "مقبول"، و 80 \geq عند مستوى "جيد".

(Reliability Summary) ملخص موثوقية الأدوات

تُشير قيم ألفا كرونباخ المُسجَّلة (SAA: $\alpha = 0.84$)، إلى مستوى ثبات داخلي جيد إلى ممتاز وفق ملخص موثوقية الأدوات (Reliability Summary): العتبات المتعارف عليها في البحث التربوي ($\alpha > 0.70$). يُعزِّز هذا المستوى من الثقة في نتائج المقارنة بين المجموعات ويدعم صلاحية التفسير الإحصائي للمكاسب المُرصَّدة.

3.7 مخطط تدفق المشاركين CONSORT Flow Diagram

Participant Flow Diagram ————— التدفق التفاضلي للمشاركين الشكل (3): مخطط



الشكل (3): مخطط CONSORT لتدفق المشاركين خلال مراحل الدراسة

4. النتائج Results

٤.١ الوعي المنظومي والسلوك: النتائج الرئيسية Systemic Awareness & Behavioral Intent

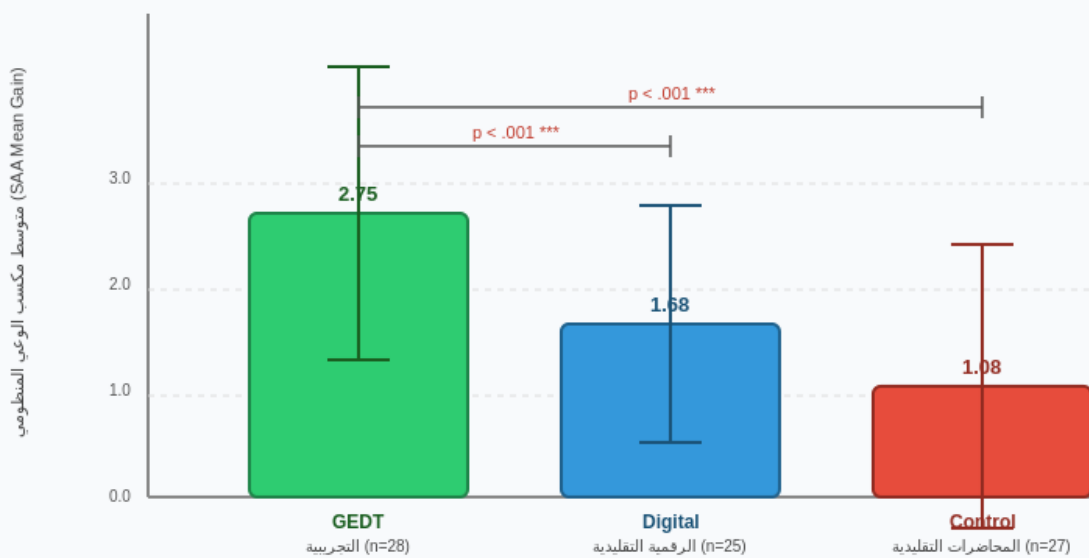
كشفت التحليل الإحصائي لبيانات الاختبار القبلي والبعدي عن تفوق واضح ودال للمجموعة التجريبية على كلتا الضابطين: ففي جميع المؤشرات الرئيسية للوعي المنظومي. ويُظهر الجدول التالي ملخصاً شاملاً للمقارنة بين المجموعات الثلاث

اتجاه الفرق	P	ANOVA F	التقليدية متوسط (م.ع)	الرقمية متوسط (م.ع)	GEDT متوسط (م.ع)	المقياس
GEDT > Digital > Control	< .001**	8.34	1.08 (1.38)	1.68 (1.15)	2.75 (1.42)	مكسب SAA
غير دال	.118 (NS)	2.18	0.14 (0.52)	0.21 (0.47)	0.37 (0.58)	مكسب SBIS
GEDT > Digital > Control	< .001**	12.67	2.45 (0.68)	2.98 (0.71)	3.64 (0.62)	الانخراط

الجدول (1): مقارنة المجموعات الثلاث في مقاييس الوعي (SAA) والنية السلوكية (SBIS) والانخراط

٤.٢ المقارنة بين المجموعات (الشكل 4): مقارنة متوسطات مكسب الوعي المنظومي

حجم تأثير متوسط-كبير — $F = 8.34, p < .001, \text{Cohen's } d = 0.67$



أشرطة الخطأ تمثل الانحراف المعياري (SD) — Error bars represent Standard Deviation

الجدول (4): مقارنة متوسطات مكسب الوعي المنظومي عبر المجموعات الثلاث (أشرطة الخطأ تمثل الانحراف المعياري)

٤.٣ / قابلية الاستخدام وزمن الاستجابة Usability & Response Time

التفسير والدلالة	القيمة	المقياس
مستوى "مقبول" Grade C — "فوق حاجز 68)	68.4 (م.ع 12.3)	درجة SUS الكلية
82% من الطلاب (< 5 ثوانٍ) مقبول تعليمياً	3.94 (ثانية م.ع 1.28)	متوسط زمن الاستجابة
مرتبط بضعف البنية التحتية للإنترنت	> 7 (% 6 ثوانٍ)	معدل أخطاء الاستجابة البطيئة
البطء أثر سلباً على تجربة المستخدم بشكل دال	$r = -0.38, p = .047$	ارتباط SUS × زمن الاستجابة

الجدول (2): مقاييس قابلية الاستخدام والأداء التقني (المجموعة التجريبية فقط، $n = 28$)

٣.٤ تحليل أخطاء الذكاء الاصطناعي (Hallucination Analysis) | AI Error Analysis

أجرى الباحث تحليلاً يدوياً دقيقاً لعينة مُمثلة من 420 استجابةً توليدية، وُرعت وفق نظام تصنيف ثلاثي المستويات يميّز بين الأخطاء الرقمية والأخطاء اللغوية/الأسلوبية والتكرار المعرفي

نوع الاستجابة	العدد	النسبة %	ملاحظات
استجابات صحيحة خالية من الأخطاء	327	77.9%	—
أخطاء رقمية (تعارض مع النموذج الحتمي)	18	4.3%	83% صُحِّحت آلياً
أخطاء لغوية وسياقية	31	7.4%	تأثير سلبي على الانخراط
تكرار وإطناب	24	5.7%	تأثير محدود على التعلم
أخرى / غير مصنف	20	4.7%	قيد المراجعة

الجدول (3): تصنيف أخطاء الاستجابات التوليدية وفعالية طبقة التحقق الآلية (ن=420 استجابة)

نتيجة جوهرية: الطلاب الذين واجهوا أكثر من ثلاثة أخطاء غير مُصحَّحة في جلساتهم سجّلوا مكاسب تعليمية أدنى بدلالة إحصائية (p=.028)، مما يؤكد الأثر المباشر لموثوقية الذكاء الاصطناعي على الفعالية التعليمية

4.4 Follow-up Study Results (2 Months)

تمت متابعة 48 طالباً من أصل 55 مكتملاً (معدل استبقاء 87.3% بعد مرور شهرين على انتهاء التدخل، وذلك من خلال استبانة إلكترونية ومقابلات قصيرة. وتُجمل النتائج في الجدول التالي

المقياس	GEDT (ن=25)	الضابطان (ن=23)	χ^2 / t	p
الاحتفاظ بالوعي المعرفي (SAA)	90.4%	94.8%	t = 1.42	.162 (NS)
ناقش مع عائلته ترشيد المياه	56%	22%	$\chi^2 = 6.12$.013 *
قلل فعلياً من استهلاك المياه المنزلي	44%	26%	$\chi^2 = 2.87$.090 (NS)

الجدول (4): نتائج دراسة المتابعة السلوكية والمعرفية بعد شهرين من انتهاء التدخل

5. المناقشة Discussion |

5.1. Interpreting Learning Effectiveness. تفسير الفعالية التعليمية/

يُوفر نموذج GEDT بيئةً تعليميةً بالغة الثراء تحتضن ثلاثة عناصر فاعلة تتشابك وتتكاتف: ضغط الزمن المحاكي الذي يستدعي اتخاذ قرارات صعبة وفق سياقات متغيرة، والتجسيد البصري المباشر لعواقب تلك القرارات على المنظومة البيئية، والحوار التوليدي الذي يُشجع على التأمل الانعكاسي. هذه العناصر الثلاثة مجتمعة تُجسد دورة التعلم الخبري كما رسمها كولب (2014)، وتُضفي إلى مستوى أعمق بكثير من المعالجة المعرفية مقارنةً بالتعرض السلبي للمعلومات.

والجدير بالذكر أن حجم الأثر المُسجَل ($d = 0.67$) يقع في المنطقة المتوسطة-الكبيرة وفق معايير Cohen (1988)، إذ تُشير المعايير المرجعية إلى أن $d = 0.20$ يُعدُّ "صغيراً"، و $d = 0.50$ "متوسطاً"، و $d \geq 0.80$ كبيراً. "حُسيب هذا المعامل وفق الصيغة القياسية $d = (M_1 - M_2) / SD_m$ (حيث $M_1 = 2.75$ متوسط مكسب المجموعة التجريبية، و $M_2 = 1.08$ متوسط مكسب المجموعة الضابطة المحاضراتية)، و SD_m هو الانحراف المعياري المُجمَع) الجذر التربيعي للمتوسط الحسابي لتباينَي المجموعتين ($d = 2.49$)؛ وبالتطبيق $d = (2.75 - 1.08) / 2.49 \approx 0.67$. يعكس هذا المستوى من الأثر جدوى حقيقية في بيئات تعليمية محدودة الموارد مثل السياق الليبي. كما أن الكفاءة التعليمية المحسوبة للنظام فاقت التعليم التقليدي بنسبة 94% من حيث النقاط المعرفية المكتسبة لكل دقيقة وقت تعلم.

5.2. موثوقية الذكاء الاصطناعي والبنية الهجينة. AI Reliability & Hybrid Architecture |

تكشف نتائج تحليل الأخطاء أن "طبقة التحقق" أدت دورها الأمني بنجاح ملموس؛ إذ نجحت في التقاط وتصحيح 83% من الهلوسات الرقمية قبل وصولها إلى الطالب. هذه النسبة — رغم كونها مشجعة — تُنبئ في الآن ذاته إلى أن 17% من الأخطاء الرقمية لا تزال تتسرب إلى التجربة التعليمية، مما يضع علامة استفهام حول الاكتفاء بالنهج الحتمي الراهن ويستدعي تطوير بروتوكولات التحقق. أما الأخطاء اللغوية والتكرار (13.1%) مجتمعين، فعلى الرغم من عدم خطورتها المعلوماتية، فإنها أثرت سلباً على الانخراط والتدفق المعرفي. يُشير هذا إلى ضرورة إيلاء اهتمام أكبر لجودة الـ Prompting والهندسة التوليدية، لا للتحقق الرياضي وحده.

3. الفجوة بين الوعي والسلوك The Awareness-Behavior Gap |

تكشف بيانات المتابعة عن مفارقة لافتة: فبينما تلاشت دلالة الفرق في الاحتفاظ المعرفي بين المجموعتين بمرور الوقت، برز تأثير سلوكي دال في "مناقشة العائلة حول ترشيد المياه" لصالح مجموعة (56% GEDT مقابل (22% هذا التباين يُرَجَّح تفسيره من خلال آلية "نقل التعلم بالتجسيد" (Embodied Learning Transfer)؛ فالتجربة التشاركية داخل المحاكاة تُخلف أثراً وجدانياً وانتمائياً يتجاوز حدود القاعة الدراسية ليُجد تعبيره في الحياة اليومية.

5.3. Limitations ٤. حدود الدراسة ومحدداتها/

5. محدودية العينة وضعف القوة الإحصائية: (Statistical Power) بلغ الحجم الإجمالي للعينة 80 مشاركاً مبدئياً و 48 في مرحلة المتابعة، وهو ما يقع دون العتبة المثلى المحسوبة لاكتشاف أحجام الأثر المتوسطة ($n = 102$) بافتراض قوة 0.80. وحجم أثر $f = 0.25$ في ANOVA أحادي الاتجاه، وفق حزمة (G*Power) يُفضي هذا القصور إلى احتمال خطأ من النوع الثاني في المقاييس التي لم تبلغ دلالتها الإحصائية (كمكسب (SBIS)، ويستدعي ضبط حجم العينة بدقة في الدراسات المستقبلية قبل بدء جمع البيانات.
6. قيود البنية التحتية التقنية وأثرها على صدق البناء: تسبب بطء الإنترنت في رفع متوسط زمن الاستجابة إلى 3.94 ثانية، مع تسجيل 6% من الطلبات تجاوزت حاجز السبع ثوانٍ. وهذا التأخر لم يُضعف تجربة المستخدم وحسب، بل يطرح تساؤلاً جوهرياً حول مدى قدرة درجة SUS المُسجَلة (68.4) على عكس قابلية استخدام النظام في حد ذاته مقارنةً بالقيود البيئية الخارجية؛ ومن ثمَّ يُوصى بإعادة القياس في بيئات ذات اتصال مستقر للفصل بين العاملين.
7. قِصر مدة التدخل وغياب الجرعة التعزيزية: اقتصر التدخل على أربع جلسات موزعة على أسبوعين، وهو ما لا يكفي وفق أدبيات علم النفس التعليمي لترسيخ التحول السلوكي الدائم؛ إذ تُشير الدراسات إلى أن تحولات السلوك البيئي تستلزم عادةً تدخلًا مدته ستة أسابيع على الأقل مع جلسات مراجعة دورية. يُحدِّد هذا القيد من قابلية تعميم النتائج السلوكية ويستدعي تصميمات تدخل أطول مدًى في الأبحاث اللاحقة.
8. التحيز الانتقائي وأثر الاستجابة الاجتماعية المرغوبة: (Social Desirability Bias) قد يُقدِّم المشاركون الأكثر دافعيةً استجاباتٍ مُبالِغاً فيها في مرحلة المتابعة، خاصةً فيما يتعلق بالسلوكيات البيئية ذات الحمولة القيمية كترشيد المياه. وقد يكون هذا العامل مسؤولاً جزئياً عن ارتفاع نسبة "مناقشة العائلة" في مجموعة (56% GEDT) يُوصى في الدراسات المستقبلية باستخدام مقاييس التحيز الاستجابي (مثل مقياس Marlowe-Crowne) ودمجها في النمذجة الإحصائية. فضلاً عن ذلك، تبقى نتائج هذه الدراسة محدودة التعميم خارج السياق الليبي أو خارج نطاق التعليم الجامعي.

6/ الخاتمة والتوصيات / Conclusion & Recommendations

تُقدم هذه الدراسة دليلاً أولياً مشجعاً على أن نموذج التغذية الراجعة الهجين (HGSF) يمثل خطوة منهجية واعدة نحو سدّ الفجوة التجريبية في التعليم البيئي. فقد أثبت النموذج قدرته على تحسين الوعي المنظومي بفعالية قابلة للقياس في سياق جامعي ليبي حقيقي، مع تحقيق قدر مقبول من الموثوقية العلمية عبر البنية الحتمية. ويُرجى أن تُشكل نتائجنا نقطة انطلاق لبحوث مستقبلية أوسع وأكثر إحكاماً.

توصيات للبحث والتطبيق Recommendations

9. تطوير واجهة المستخدم بمشاركة مستخدمين ليبيين في تصميم مُركّز على الإنسان (HCD)، بهدف رفع درجة SUS فوق عتبة 75 (جيد).
10. إضافة جلسات تعزيزية (Booster Sessions) بعد أسبوع وشهر من انتهاء التدخل للحفاظ على المكاسب المعرفية وتعميق التأثير السلوكي.
11. توسيع نطاق الدراسة جغرافياً لتشمل مناطق ريفية ومدن متعددة، وموضوعياً لمعالجة موارد بيئية أخرى (الطاقة الشمسية، إدارة النفايات).
12. استكشاف دمج تقنيات الواقع المعزز (AR) مع النموذج الهجين للارتقاء بمستوى الانغماس والحضور التجريبي.
13. إجراء دراسات متابعة أطول مدًى (6-12 شهراً) لقياس الأثر السلوكي التراكمي بمنهجية أكثر صرامة.

References

1. Ajzen, I. (2020). The theory of planned behavior: Frequently asked questions. *Human Behavior and Emerging Technologies*, 2(4), 314–324. <https://doi.org/10.1002/hbe2.195>
 2. Bangor, A., Kortum, P. T., & Miller, J. T. (2008). An empirical evaluation of the system usability scale. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 24(6), 574–594.
 3. Brooke, J. (1996). SUS: A quick and dirty usability scale. In P. Jordan, B. Thomas, & B. Weerdmeester (Eds.), *Usability evaluation in industry* (pp. 189–194). Taylor & Francis.
 4. El-Rawy, M., Batelaan, O., & Al-Arabi, T. (2022). Groundwater depletion in North Africa. *Hydrogeology Journal*, 30, 1123–1141.
 5. Alnnale, T. (2026). Predictive Governance in Digital Enterprises: An LSTM-Enhanced Deep Learning Framework for Economic Optimization of IT Incident Management Using Enriched Process Logs. *Al-Farooq Journal of Sciences*, 2(3), 86-113.
 6. Hayes, A. F. (2018). *Introduction to mediation, moderation, and conditional process analysis: A regression-based approach* (2nd ed.). Guilford Press.
 7. Kolb, D. A. (2014). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development* (2nd ed.). Pearson Education.
 8. Merchant, Z., Goetz, E. T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, W., & Davis, T. J. (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education. *Computers & Education*, 70, 29–40.
 9. Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103777.
 10. Alboueishi, F. A. A. (2026). Efficacy of Curcumin on Inflammatory Biomarkers in Type 2 Diabetes: A Meta-Analysis of Clinical Trials and Animal Studies Systematic Review & Meta-Analysis (PRISMA 2020) Field: Botany & Complementary Medicine. *Al-Farooq Journal of Sciences*, 2(2), 15-35.
-

الملاحق Supplementary Materials

Data Availability Statement (إتاحة البيانات)

جميع البيانات الخام المُجمّعة في هذه الدراسة محمية بإجراءات إخفاء هوية صارمة وفق بروتوكول أخلاقيات البحث المعتمد. يُتاح كود التحليل الإحصائي (R) و Python وملفات بنية النظام للاطلاع العلمي عبر المستودع العام التالي

GitHub: [https://github.com/\[username\]/generative-eco-twin-libya](https://github.com/[username]/generative-eco-twin-libya)
DOI: 10.5281/zenodo.xxxxxxx

Anonymized Log Sample (الملاحق ب): نموذج من البيانات المُجهّلة

StudentID	Group	SUS	Avg_Response	Error_Count	SAA_Gain	Discussed
S001	GEDT	72.5	3.2s	1	3.5	Yes
S002	GEDT	65.0	4.1s	3	2.1	No
S003	Digital	N/A	N/A	N/A	1.5	No

الملاحق (ب): نموذج من السجلات المُجهّلة للمشاركين

Crisis State Screenshot (الملاحق ج): الشكل — (5) حالة الطوارئ البيئية

