# مجلة جامعة حمص

## سلسلة العلوم الأساسية

**مجلة علمية محكمة دورية**

المجلد 48 . العدد 16

1448 هـ - 2026 م

| |
|---|
| **الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص**<br><br>**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 حمص :**

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 حمص 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 حمص.**
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 |
|---|---|---|
| تطوير مسرى معجونة الكربون المعدلة كيميائياً بمعقد الزوج الأيوني لتحديد ميكوفينولات موفيتيل في المستحضرات الصيدلانية | أحمد النقري<br>أ.د. محمد جمال الخطيب<br>د. هزار القصير | 32-11 |
| أزواج التقريب الأفضل في فضاءات بوسمان المحدبة مع التقليصات النقطية المعممة | د. بشرى رجب عباس<br>د. محمد أحمد الشيخ | 58-33 |
| تصميم وتنفيذ نموذج هجين قائم على جودة البيانات لدمج نظم المعلومات الإدارية في البيئات التعليمية الورقية: إطار مرحلي وخوارزمية لاتخاذ قرار الانتقال | د. إلهام القاسم | 116-59 |
| نموذج ضبابي لتحليل بيانات سلوك العملاء وتصنيفهم في بيئة التجارة الإلكترونية | د. محمد حجوز | 146-117 |
| العناصر $S$ – الابتدائية الضعيفة في الـ $K$- شبكات الضربية | أشرف صويص<br>د. إيمان الخوجه<br>د. حمزة حاكمي | 166-147 |

# تطوير مسرى معجونة الكربون المعدلة كيميائياً بمعقد الزوج الأيوني لتحديد ميكوفينولات موفيتيل في المستحضرات الصيدلانية

اعداد الطالب: احمد النقري اشراف: أ.د.محمد جمال الخطيب ، د.هزار القصير

## الملخص

يهدف هذا البحث إلى تطوير مسرى معجونة كربون معدل كيميائياً بمعقد الزوج الأيوني المتشكل بين ميكوفينولات موفيتيل(MPM) وكاشف رينكات الأمونيوم، واستخدامه في التحديد الكمي المباشر للمادة الدوائية في صورتها النقية وفي مستحضراتها الصيدلانية بطريقة كمونية.

حُضر المسرى بإدماج معقد الزوج الأيوني بوصفه المادة الفعالة كهروكيميائياً ضمن معجونة كربون مؤلفة من 46% مسحوق غرافيت و 46% من ثنائي أوكتيل فتالات (DOPH) و8% من معقد الزوج الأيوني. أظهر المسرى المحضر استجابة نرنستية قريبة من النظرية ضمن المجال الخطي 3630–0.119 µM، وبميل مقداره 58.71 mV/decade، وحد كشف مقداره 0.0758 µM، وزمن استجابة يقارب 20s، وثباتاً في الاستجابة ضمن مجال pH من 1.83 إلى 6.35، مع استقرار تشغيلي جيد لمدة تصل إلى 40 يوماً. أظهرت دراسة الانتقائية قدرة المسرى على التمييز بين ميكوفينولات موفيتيل وعدد من الأيونات الشائعة والسواغات والمواد الحافظة المستخدمة في المستحضرات الصيدلانية. وطُبقت الطريقة المقترحة بنجاح في تقدير ميكوفينولات موفيتيل في المستحضرات الصيدلانية، وأظهرت النتائج دقة وصحة واسترجاعية مرضية، إلى جانب بساطة الإجراء وسرعة التنفيذ وانخفاض التكلفة، مما يدعم ملاءمة الطريقة للاستخدام في مختبرات الرقابة الدوائية.

**الكلمات المفتاحية:** ميكوفينولات موفيتيل، مسرى معجونة الكربون، معقد الزوج الأيوني، رينكات الأمونيوم، الطريقة الكمونية.

# Development of a Chemically Modified Carbon Paste Electrode Based on an Ion Pair Complex for the Quantitative Determination of Mycophenolate Mofetil in Pharmaceutical Formulations

**Prepared by the student:Ahmad Alnoukari**

**Supervised by: Prof.Dr.Mohammed Jamal Alkhatib,**

**Dr.Hazar Alksair**

## ABSTRACT

A chemically modified carbon paste electrode based on an ion-pair complex was successfully developed for the potentiometric determination of mycophenolate mofetil (MPM) in its pure form and pharmaceutical formulations. The proposed sensor was fabricated using an ion-pair complex formed between mycophenolate mofetil and ammonium reineckate as the electroactive sensing material incorporated into a carbon paste matrix. The electrode composition consisting of 46% graphite powder, 46% dioctyl phthalate (DOPH), and 8% ion-pair complex exhibited the optimum analytical performance.

Under the optimized experimental conditions, the proposed electrode exhibited a near-Nernstian slope of 58.71mV per decade over a linear concentration range of 0.119–3630μM, with a low detection limit of 0.0758 μM. The sensor demonstrated a rapid response time of approximately 20s, stable potential response within the pH range of 1.83–6.35, and satisfactory operational stability for up to 40 days. The selectivity studies confirmed excellent discrimination of the proposed sensor against various inorganic ions, pharmaceutical excipients, and preservatives, indicating its high selectivity toward mycophenolate mofetil. The developed electrode was successfully applied to the determination of mycophenolate mofetil in pharmaceutical formulations, providing satisfactory accuracy, precision, and recovery values.

The proposed potentiometric method offers a simple, rapid, sensitive, and cost-effective analytical approach for the routine quality control of mycophenolate mofetil in pharmaceutical preparations and represents a practical alternative to more sophisticated instrumental techniques.

**Keywords**: Mycophenolate mofetil, Carbon paste electrode, Ion-pair complex, Ammonium reineckate, Potentiometric method

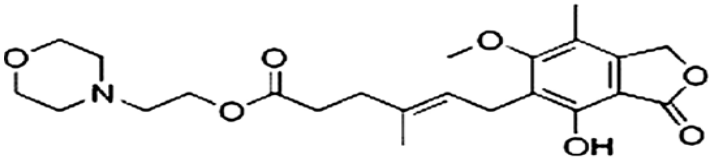
**مقدمة:**

يُعد ميكوفينولات موفيتيل أحد الأدوية المثبطة للمناعة واسعة الاستخدام في الممارسة السريرية، إذ يُستخدم بصورة رئيسة للوقاية من رفض الأعضاء المزروعة، كما يدخل في علاج عدد من الأمراض المناعية الذاتية. ويُعد هذا المركب طليعة دوائية (Prodrug) تتحول داخل الجسم إلى حمض الميكوفينوليك، وهو الشكل الدوائي الفعال المسؤول عن تثبيط إنزيم نازعة هيدروجين أحادي فوسفات الإينوزين (IMPDH)، مما يؤدي إلى تثبيط تكاثر الخلايا اللمفاوية التائية (T-cells) والبائية (B-cells)، وبالتالي إضعاف الاستجابة المناعية.

ونظراً للأهمية العلاجية لهذا الدواء، تبرز الحاجة إلى تطوير طرائق تحليلية دقيقة وحساسة تتيح تقدير تركيزه في المواد الخام والمستحضرات الصيدلانية، بما يضمن مراقبة الجودة والتحقق من مطابقة المنتجات للمواصفات الدوائية المعتمدة [1,2].

ميكوفينولات موفيتيل يرمز له MPM، وصيغته الجزيئية ($C_{23}H_{31}O_7N$)، وكتلته المولية 433.49 g/mol اسمه الكيميائي :

2-morpholinoethyl(E)-6-(1,3-dihydro-4-hydroxy-6-methoxy-7-methyl-3-oxo-5-isobenzofuranyl)-4-methyl-4-hexenoate




شكل رقم (1) الصيغة المفصلة للميكوفينولات موفيتيل

وتُعد الطرائق الكمونية، ولا سيما تلك المعتمدة على المساري المنتقية للأيونات، من البدائل التحليلية الواعدة لما تمتاز به من بساطة التصميم، وسرعة الاستجابة، وانخفاض تكلفة التشغيل، وإمكانية إجراء القياسات بصورة مباشرة دون الحاجة إلى خطوات معالجة معقدة للعينة. كما حظيت مساري معجونة الكربون باهتمام متزايد خلال السنوات الأخيرة نظراً لما تتمتع به من سهولة التحضير، وإمكانية تجديد سطحها، واستقرارها الكيميائي، فضلاً عن قابليتها للتعديل بمواد فعالة كهركيميائياً مما يسهم في تحسين حساسيتها وانتقائيتها تجاه المركبات الدوائية المختلفة [3, 4].

وتعتمد كفاءة هذا النوع من المساري بصورة أساسية على طبيعة المادة الفعالة كهركيميائياً ونوع الملدن المستخدم ونسبتهما في تركيب معجونة الكربون، إذ يسهم اختيار هذين العاملين في تحسين انتقال الأيونات داخل المعجونة، ومن ثم رفع كفاءة الاستجابة الكمونية للمسرى وزيادة مجال تطبيقه التحليلي.

وعلى الرغم من تعدد الدراسات المتعلقة بتحديد ميكوفينولات موفيتيل باستخدام تقنيات تحليلية مختلفة، فإن الدراسات التي تناولت تطوير مساري كهركيميائية تعتمد على معقدات الأزواج الأيونية ما تزال محدودة، الأمر الذي يبرز الحاجة إلى تطوير مسرى يتميز بالحساسية والانتقائية وسهولة التحضير وانخفاض التكلفة، ليكون مناسباً للاستخدام في مختبرات الرقابة الدوائية.

أجريت العديد من الدراسات لتحديد ميكوفينولات موفيتيل (MPM) في الحالة النقية وفي المستحضرات الصيدلانية باستخدام عدد من الطرائق التحليلية المختلفة، ويستعرض هذا العمل بعضاً منها فيما يأتي:

- حُدد MPM في مستحضراته الصيدلانية بالتحليل الطيفي بالمجال فوق البنفسجي UV عند طول الموجة الأعظمي 250nm ضمن المجال الخطي µg/mL (10-50).[5]
- كما حُدد كل من ميكوفينولات موفيتيل(MPM) وحمض الميكوفينوليك(MPA) بالطريقة الطيفية الحركية لمعقد المركب الدوائي مع أيونات الحديد(III) عند pH=4، تحققت علاقة بير– لامبرت ضمن المجال الخطيµg/mL(50-250), µg/mL(10-200) لكل من MPM, MPA على الترتيب، وحد كشف µg/mL(1.62,4.88) على الترتيب [6].
- وقُدر MPM في البلازما باستخدام الكروماتوغرافيا السائلة عالية الأداء باستخدام طور متحرك مؤلف من (حمض الفورميك: الميتانول) بنسبة (80:20 v/v) وطور ثابت عمود C18 وباستخدام كاشف مطياف الكتلة، حيث كان المجال الخطي: pg/mL (40.2-4986.0) [7].
- كما استخدمت طريقة HPLC لتحديد MPM في المستحضرات الصيدلانية، حيث استخدم طور متحرك مؤلف من (الميتانول: الماء) بنسبة (25:75 v/v)، والطور الثابت المستخدم عمود C18، واستخدم كاشف UV عند طول موجة 250nm، حيث كان المجال الخطي µg/mL (0.1-10.0)، وحد الكشف 3.660 ng/mL [8].
- اقترحت طريقة كروماتوغرافيا السائلة معكوسة الأطوار(RP-HPLC) لتحديد MPM في المستحضرات الصيدلانية باستخدام عمود C18 عند طول الموجة 250nm وطور متحرك مؤلف من (اسيتونتريل: واقي فوسفاتي: ميتانول)، حيث كان المجال الخطي µg/mL (2-7).[9]
- كما حُدد كل من MPM و MPA في عينات البلازما والبول باستخدام الطريقة الفولط أمبيرومترية النبضية التفاضلية (DPV) باستخدام مسرى الكربون الزجاجي المعدل بأنابيب الكربون النانوية متعددة الجدران

MWCNTs/GCE، حيث أظهر MPM قمتي أكسدة عند قيمتي الكمون V(1.1 ;0.87) بينما أظهر MPA قمة أكسدة واحدة عند الكمون 0.87V، وكان الكهرليت المستخدم: محلول واقي فوسفاتي pH=5، أظهر المسرى استجابة خطية MPM ضمن المجال M$(5.0 \times 10^{-6} - 1.6 \times 10^{-4})$ وبحد كشف M$9.0 \times 10^{-7}$، أما المجال الخطي لـ MPA فكان M$(2.5 \times 10^{-6} - 6.0 \times 10^{-5})$ وبحد كشف M$4.0 \times 10^{-7}$ [10].

- وأيضا حُدد MPM بالطريقة الفولط أمبيرومترية ذات الموجة المربعة (SWV) باستخدام مسرى معجونة الكربون المعدل بأنابيب الكربون النانوية متعددة الجدران MWCNTs/CPE، امتد المجال الخطي ما بين (9.9nM-87µM) وكان حد الكشف 7.0nM حيث أبدت الطريقة انتقائية وحساسية عاليتين تجاه MPM في عينات السوائل البيولوجية [11] .
- كما تم التحديد المتزامن لكل من التاكروليمس وميكوفينولات موفيتيل بالطريقة الفولط أمبيرومترية. حيث حضر المسرى بطريقة البلمرة الكهربائية لأنابيب الكربون النانوية متعددة الجدران مع الإطار العضوي Cu-1N-allyl-2-(2,5-dimethoxyphenyl)-4,5-diphenyl-1H-imidazole

وامتد المجال الخطي ما بين $(0.85 - 155) \times 10^{-8} M$ و$(1.1 - 170.0) \times 10^{-8} M$ لكل من MPM وTAC على الترتيب وكان حد الكشف $0.28 \times 10^{-8} M$ و $0.36 \times 10^{-8}$ لكل من MPM وTACعلى الترتيب [12].

**أهمية البحث وأهدافه:**

يهدف هذا البحث إلى تطوير مسرى معجونة الكربون المعدل كيميائياً بمعقد الزوج الأيوني المتشكل بين ميكوفينولات موفيتيل ورينكات الأمونيوم، ودراسة خصائصه الكهروكيميائية، وتقييم أدائه التحليلي من حيث المجال الخطي، وحد الكشف، وزمن الاستجابة، ومجال pH، وعمر المسرى، والانتقائية، والدقة، والصحة، ومن ثم تطبيقه في تقدير ميكوفينولات موفيتيل في المستحضرات الصيدلانية، بهدف توفير طريقة تحليلية بسيطة ودقيقة ومنخفضة التكلفة يمكن اعتمادها في تطبيقات الرقابة الدوائية.

**مواد وطرائق البحث:**

**الأجهزة:**

استخدم مقياس كمون رقمي من شركة Sanwal نموذج DT9201A، ومقياس pH/mV/ºC نوع Orion أمريكي الصنع طراز 250A. واستخدم مسرى الكالوميل كمسرى مقارن (SCE).



الشكل(2) مقياس كمون رقمي من شركة Sanwal نموذج DT9201A

**المواد الكيميائية والصيدلانية:**

كانت جميع المواد المستخدمة ذات درجة تحليلية عالية النقاوة. واستخدم الماء ثنائي التقطير في جميع التحضيرات. لتحضير معجونة الكربون، استخدم فحم غرافيتي عالي النقاوة من شركة Aldrich، إضافةً إلى عدد من الملدنات منها: ثنائي أوكتيل فتالات (DOPH) بنقاوة 99.5%، ثنائي بوتيل فتالات (DBPH) بنقاوة 99%، وزيت البارافين Paraffin Oil من شركتي BDH و Fluka. كما استُخدم لتحضير معقد الزوج الأيوني كاشف رينكات الأمونيوم(R.A) $[NH_4(Cr(NH_3)_2(SCN)_4]$ بنقاوة 99.0% من شركة SIGMA. أما المادة الدوائية النقية ميكوفينولات موفيتيل(MPM) فكانت بنقاوة (99.0%) ($C_{23}H_{31}O_7N$=433.49g/mol) من انتاج شركة(Globel Pharma) الهندية. كما استخدمت مستحضرات صيدلانية محلية الصنع تحتوي على ميكوفينولات موفيتيل على شكل حبوب دوائية بعيار(500mg/tab) من شركة مسعود فارما للصناعات الدوائية.

**طريقة العمل من أجل المادة النقية:**

حُضر المحلول العياري لـ MPM بتركيز $1 \times 10^{-2}M$ بشكل يومي، وذلك بإذابة (0.10837g) في دورق سعة 25mL مع أخذ النقاوة بعين الاعتبار ثم أُكمل الحجم حتى العلامة بالماء ثنائي التقطير، وتم تجانس المحلول بالرجّ. حُضرت منه محاليل عيارية بتراكيز $1 \times 10^{-3}M$ و $1 \times 10^{-4}M$. تمت إضافة حجوم محددة على دفعات صغيرة من المحلول العياري لـ MPM إلى

(25mL ماء ثنائي التقطير + 25mL إيثانول)، بحيث يتزايد التركيز تدريجياً وصـــولاً إلى أعلى تركيز يمكن عنده الحفاظ على خطية العلاقة بين الكمون وتركيز MPM، ثم رُسمت المنحنيات البيانية المحققة للعلاقة $E = f(pC_{MPM})$

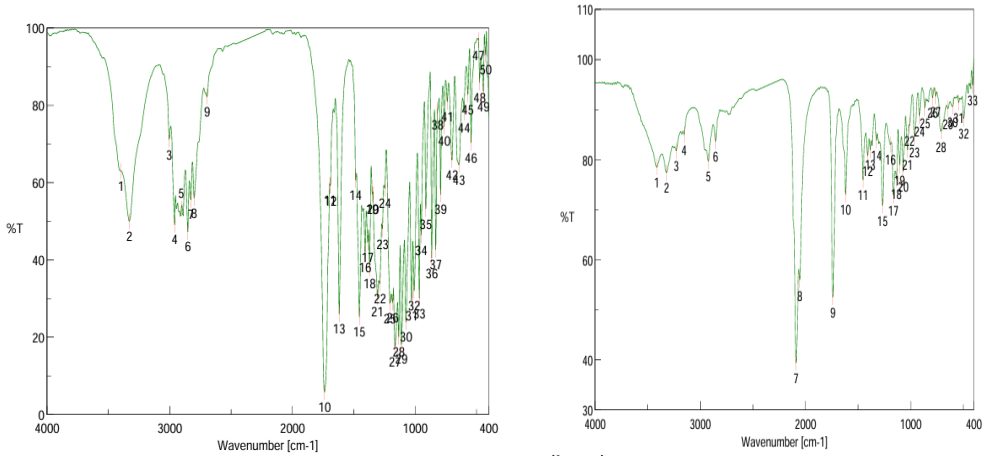
**طريقة العمل من أجل المستحضر الدوائي:**

حُضر محلول بتركيز ($1\times10^{-2}$M) تقريباً من المستحضر الصيدلاني، ثم أُضيفت حجوم محددة على دفعات صغيرة من المحلول المحضر إلى (25mL ماء ثنائي التقطير+25mL ايتانول)، وطُبقت الطريقة الكمونية المباشرة لتحديد MPM في المستحضرات الصيدلانية.

**تحضير معقد الزوج الأيوني ميكوفينولات موفيتيل–رينكات الأمونيوم (MPM-R.A):**

مُزج محلولان متساويا التركيز $1\times10^{-2}$M لكل من المادة الدوائية MPM وكاشف رينكات الأمونيوم R.A بنسبة ارتباط (1:1)، ثم رُشح الراسب الناتج وغُسل بالماء ثنائي التقطير وجُفف في درجة حرارة المخبر. حُفظ المعقد ضمن عبوة عاتمة محكمة الإغلاق. أجري الكشف الكروماتوغرافي على طبقات رقيقة من السيليكاجل (TLC) بتحميل محلول المركب المحضر على الطبقة الرقيقة باستخدام طور متحرك من ثنائي ميتيل سلفوكسيد (DMSO)، وتركت الطبقة لتجف في الهواء حتى ظهور البقعة بشكل واضح، ثم فحصت تحت مصباح الأشعة فوق البنفسجية والذي أظهر وجود بقعة وحيدة تعود للمعقد الناتج وتؤكد نقاوته. كررت التجربة باستخدام عدة أطوار متحركة أخرى ولم يُلاحظ ظهور أي بقعة أخرى غير بقعة المعقد الناتج.

كما تم التأكد من الزمر الوظيفية الموجودة في المعقد المحضر بدراسة طيف الأشعة تحت الحمراء لكل من المادة الدوائية والكاشف والمعقد الشكل (3)، حيث يُظهر طيف IR للمعقد الناتج اتساع في عصابة الامتصاص الواقعة في المنطقة ($3500\text{-}3200\text{cm}^{-1}$) والعائدة لاهتزاز مجموعة الهيدروكسيل وذلك بسبب تكون روابط هيدروجينية، كما يُظهر الطيف انزياح عصابة الامتصاص الخاصة بزمرة الكربوكسيل في المعقد نحو الأعداد الموجية الأقل، بالإضافة إلى ظهور عصابة امتصاص جديدة عند ($2100\text{-}2060\text{cm}^{-1}$) العائدة لاهتزاز الرابطة $C \equiv N$ لمجموعة الثيوسيانات، كما يُلاحظ انزياح عصابات الامتصاص الزمر الوظيفية الأخرى في طيف المعقد الناتج عنه في طيف المادة الدوائية الشكل (3).




(b) (a)

الشكل (3): طيف IR

a: طيف المعقد، b: طيف المادة الدوائية

**تحضير مسرى معجونة الكربون المعدلة كيميائياً:**

حُضر مسرى معجونة الكربون بمزج مسحوق الغرافيت مع المادة الفعالة كهركيميائياً (معقد الزوج الأيوني) والملدن العضوي بالنسب الوزنية المحددة، ثم خلطت المكونات جيداً حتى الحصول على معجونة متجانسة. بعد ذلك تم حشوة المعجونة داخل جسم المسرى، وسوي سطحها للحصول على سطح أملس ومتجانس يضمن ثبات الاستجابة أثناء القياس. ثم غُرز سلك نحاسي داخل المعجونة لتأمين التوصيل الكهربائي، ثُبت المسرى المحضر إلى جانب مسرى الكالوميل المرجعي ضمن خلية كهركيميائية وتم توصيلهما إلى جهاز قياس الكمون. وبناءً عليه يمكن تمثيل المخطط الترسيمي للخلية الكهركيميائية كما يلي:

Cu|معجونة الكربون المعدلة|المحلول المدروس|(مشبع)KCl|(صلب) KCl|$Hg_2Cl_2$|Hg

ولتحديد أفضل تركيب للمسرى، حضرت عدة تراكيب اختلفت في نوع الملدن ونسبة معقد الزوج الأيوني، ثم قورنت استجاباتها الكمونية لاختيار التركيب الذي يوفر أعلى حساسية وأفضل مجال خطي وأطول عمر زمني.

**منحنى المعايرة:**

أُنشئ منحنى المعايرة بقياس الكمون الناتج عن سلسلة من المحاليل القياسية ذات التراكيز المختلفة لميكوفينولات موفيتيل، مع تسجيل قيمة الكمون بعد الوصول إلى حالة الاستقرار. ثم رُسمت العلاقة بين الكمون وناقص لوغاريتم التركيز، واستُخدمت معادلة الخط البياني لحساب ميل المنحنى ومعامل الارتباط والمجال الخطي وحد الكشف.

**النتائج والمناقشة:**

**1-دراسة التركيب الأمثل لمعجونة الكربون الفعالة كهربائياً:**

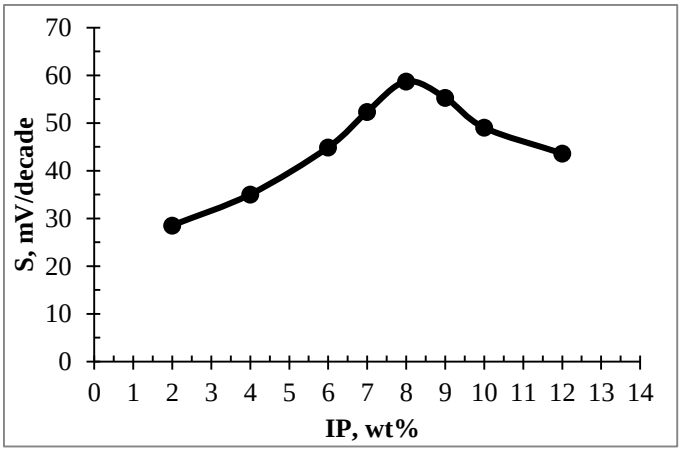
يعتمد الأداء التحليلي لمسرى معجونة الكربون بصورة رئيسة على طبيعة مكوناته ونسبها، إذ تؤثر هذه العوامل بصورة مباشرة في انتقال الأيونات داخل المعجونة، ومن ثم في حساسية المسرى وانتقائيته واستقراره. لذلك جرى تحضير عدة تراكيب للمسرى باختلاف نسبة معقد الزوج الأيوني ونسبة ونوع الملدن المستخدم، بهدف الوصول إلى التركيب الذي يحقق أفضل استجابة كمونية.

أظهرت النتائج أن المسرى المحتوي على 8% من معقد الزوج الأيوني، و46% من مسحوق الغرافيت، و46% من الملدن (DOPH) حقق أفضل أداء تحليلي مقارنة ببقية التراكيب، إذ أظهر استجابة نرنستية قريبة من القيمة النظرية، ومجالاً خطياً واسعاً، بالإضافة إلى ثبات ملحوظ في الكمون أثناء القياس، كما يبين الجدول (1). ويشير ذلك إلى أن هذه النسبة توفر توازناً مناسباً بين عدد المواقع الفعالة المتاحة للتبادل الأيوني وبين المحافظة على الخواص الفيزيائية لمعجونة الكربون.

الجدول (1): تأثير تركيب معجونة الكربون على خصائص المسرى الانتقائية

| التركيب % (w/w) | | | القرائن التحليلية | | |
|---|---|---|---|---|---|
| الغرافيت (G) | الملدن (P) | معقد الزوج الأيوني (MPM-RA) | الميل (S) mV/decade | المجال الخطي (L.R)، µM | $R^2$ |
| 49.0 | 49.0 | 2 | 28.512 | 1.72-2980 | 0.9951 |
| 48.0 | 48.0 | 4 | 35.017 | 1.687-2980 | 0.9990 |
| 47.0 | 47.0 | 6 | 44.877 | 0.870- 3307 | 0.9988 |
| 46.5 | 46.5 | 7 | 52.346 | 0.551- 3630 | 0.9993 |
| 46.0 | 46.0 | 8 | 58.707 | 0.119- 3630 | 0.9991 |
| 45.5 | 45.5 | 9 | 55.312 | 0.119- 3630 | 0.9977 |
| 45.0 | 45.0 | 10 | 49.023 | 1.360- 1786 | 0.9987 |
| 44.0 | 44.0 | 12 | 43.601 | 1.360- 1786 | 0.9956 |

أُجريت الدراسة البيانية لتغيرات متوسط ميل المنحنيات العيارية $\bar{s}$ مع تغير النسبة المئوية الوزنية لمعقد الزوج الأيوني في المعجونة وذلك كما هو موضح في الشكل (4).




الشكل (4): تحديد النسبة المثلى للزوج الأيوني MPM-R.A

وُجد أن نسبة 8% من معقد الزوج الأيوني MPM-R.A والمبيّنة في الجدول (1) تمثل النسبة المثلى نظراً لتقارب قيمة الميل مع القيمة النظرية لميل معادلة نرنست، إضافةً إلى أنها وفّرت مجالاً خطياً واسعاً.

**2- دراسة تأثير نوع الملدن على خصائص المسرى الانتقائية:**

يرتبط أداء وحساسية مساري معجونة الكربون بنوع الملدن المستخدم، حيث تؤثر الخصائص الفيزيائية للملدنات بشكل ملحوظ على حركية معقد الزوج الأيوني داخل معجونة الكربون [13]، ولهذا الغرض تم استخدام ثلاث ملدنات مختلفة في خصائصها الفيزيائية وهي ثنائي أُكتيل فتالات (DOPH)، ثنائي بوتيل فتالات (DBPH)، زيت البارافين (P.oil)، كما هو موضح في الجدول (2). أظهر المسرى الملدن بـ DOPH تحسناً واضحاً في الخصائص التحليلية للمسرى المحضر من خلال قيمة ميل قريبة من القيمة النظرية لمعادلة نرنست إضافة إلى انخفاض قيمة حد الكشف.

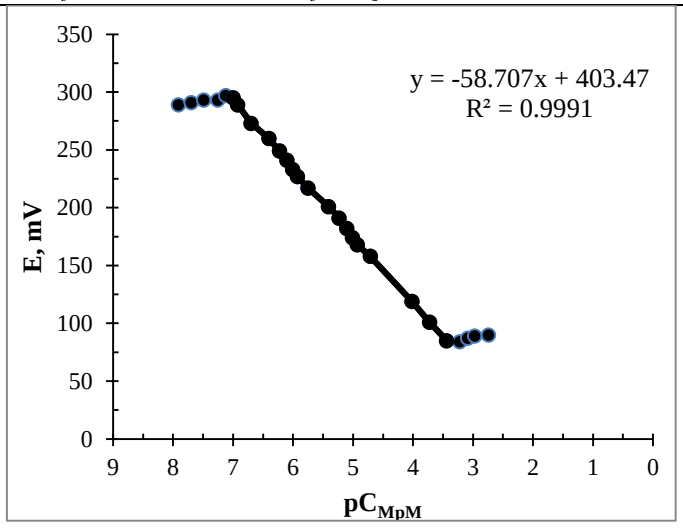
الجدول (2): تأثير نوع الملدن على خصائص المسرى الانتقائية

| نوع الملدن | نسبة معقد الزوج الأيوني % | الميل mV/decade | المجال الخطي، µM | حدالكشف، µM | زمن الاستجابة، sec |
|---|---|---|---|---|---|
| DOPH | 8 | 58.707 | 0.119-3630 | 0.0758 | 20 |
| DBPH | 5 | 53.487 | 4.250-900.550 | 8.240 | 30 |
| P. Oil | 6 | 48.433 | 4.250-900.550 | 3.770 | 35 |

**3- توصيف أداء المسرى:**

**1.3- المنحني العياري للمسرى المحضر:**

أُضيفت حجوم متزايدة من محلول MPM العياري بتركيز $1 \times 10^{-2}M$ إلى (25 mL ماء ثنائي التقطير + 25 mL إيثانول)، بحيث يزداد التركيز تدريجياً وصولاً إلى أعلى تركيز يمكن عنده الحفاظ على خطية تزايد الكمون مع زيادة التركيز. قيس كمون خلية المسرى بعد كل إضافة، ثم رُسمت العلاقة بين الكمون E والقيمة pC_MPM باستخدام طريقة أصغر المربعات. أُعطي منحنى المعايرة العلاقة التقريبية $E = -58.707pC_{MPM} + 403.47$، مع معامل ارتباط $R^2 = 0.9991$ الشكل(5).




الشكل (5): المنحني العياري لمسرى MPM الانتقائي

**2.3–المجال التحليلي للمساري المحضرة:**

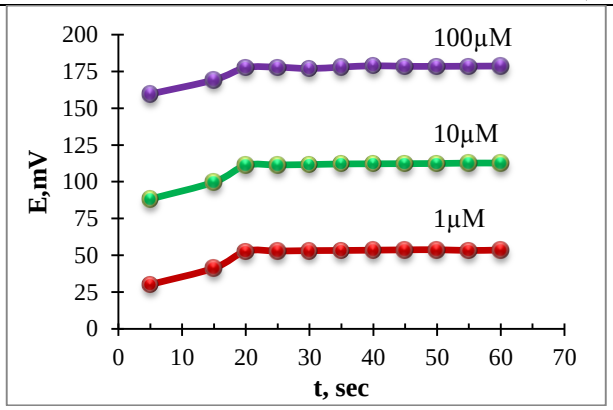
حُدد المجال الخطي التحليلي من المنحني العياري للمسرى الانتقائي لـ MPM المبين في الشكل (5)، حيث وُجد أنه يمتد بين(0.119-3630µM) بالنسبة للمسرى المحضر(MPM-R.A$_{8\%}$ SE) باستخدام الملدن DOPH وبمعامل ارتباط قدره 0.9991.

**3.3– زمن استجابة المسرى:**

أظهرت القياسات أن المسرى يصل إلى حالة الاتزان خلال نحو 20sec فقط، وهو زمن استجابة قصير مقارنة بالعديد من المساري الكهركيميائية المستخدمة في التحليل الدوائي [14].

ويُعزى ذلك إلى كفاءة انتقال الأيونات داخل معجونة الكربون، وإلى التوزيع المتجانس لمعقد الزوج الأيوني داخل بنية المسرى، مما يضمن سرعة تكوين حالة الاتزان بين سطح المسرى والمحلول.

حُدد زمن الاستجابة اللازم لوصول كمون المسرى المحضر إلى حالة الاستقرار باستخدام ميقاتيه رقمية، ولم يتجاوز زمن الاستجابة عند قياس محاليل تراكيزها تتراوح بين (1-100)µM من MPM قيمة 20sec وذلك بالنسبة للمسرى المحضر (MPM-R.A$_{8\%}$SE) كما هو موضح في الشكل (6).




الشكل (6): زمن استجابة المسرى المحضر المنتقي لـ MPM

**4.3- عمر المسرى:**

يُعد العمر التشغيلي من المؤشرات المهمة في تقييم كفاءة المساري الكهركيميائية، إذ يعكس قدرة المسرى على المحافظة على خصائصه التحليلية خلال فترة الاستخدام. ويكتسب هذا المؤشر أهمية خاصة في التطبيقات العملية، لأنه يحدد مدى إمكانية استخدام المسرى بصورة متكررة دون الحاجة إلى إعادة تحضيره.

رُسمت المنحنيات العيارية للمسرى المحضر والمنتقي لمادة MPM لتحديد العمر الأمثل للمسرى. كما دُرست بيانياً تغيرات متوسط الميل $\bar{S}$ للجزء الخطي من المنحني العياري للمسرى مع تقدم زمن العمل (t)، كما هو موضح في الجدول (3)

الجدول (3): تأثير زمن العمل على أداء المسرى المحضر

| زمن العمل | S mV/decade | المجال الخطي µM |
|---|---|---|
| MPM-R.A 8%SE | | |
| ساعة | 58.707 | 0.119-3630 |
| يوم | 58.71 | 0.119-3630 |
| 2 يوم | 58.94 | 0.119-3630 |
| 5 | 58.45 | 0.119-3630 |
| 10 | 58.61 | 0.119-3630 |

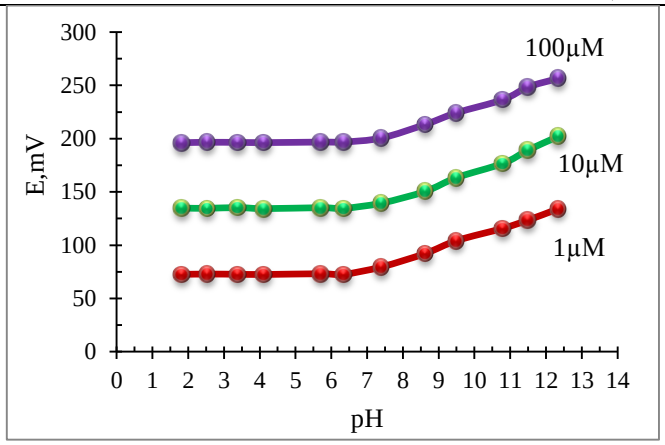
| زمن العمل | S mV/decade | المجال الخطي µM |
|---|---|---|
| MPM-R.A 8%SE | | |
| 15 | 58.7 | 0.536-3630 |
| 20 | 58.77 | 0.536-3630 |
| 25 | 58.32 | 0.119-3630 |
| 30 | 58.85 | 0.774-3630 |
| 35 | 58.15 | 0.774-3630 |
| 40 | 58.24 | 0.119-3630 |
| 45 | 57.88 | 1.36-3630 |
| 50 | 57.11 | 1.36-3630 |
| 55 | 56.10 | 5.72-1786 |
| 60 | 55.40 | 5.72-1786 |
| 65 | 53.47 | 2.56-3630 |
| 70 | 50.91 | 5.72-1786 |

أظهرت النتائج أن المسرى حافظ على استجابة نرنستية مستقرة لمدة بلغت 40 يوماً، مع انخفاض تدريجي في الأداء بعد هذه المدة. ويُعزى ذلك إلى التغير التدريجي في خواص معجون الكربون، وما يصاحبه من فقدان جزئي للمادة الفعالة كهركيميائيا نتيجة الاستعمال المتكرر، إضافة إلى احتمالية تلوث سطح المسرى أو انخفاض كفاءة انتقال الأيونات داخل المعجونة بمرور الزمن.

وتشير هذه النتائج إلى أن المسرى يتمتع باستقرار تشغيلي جيد، الأمر الذي يجعله مناسباً للاستخدام الروتيني في مختبرات الرقابة الدوائية.

**4- تأثير pH الوسط على ثبات أداء المسرى:**

غُمر المسرى الانتقائي لمادة MPM مع مسرى زجاجي لقياس pH ضمن محلول MPM بتركيز 1µM، ثم دُرس تأثير تغير قيمة pH الوسط ضمن المجال (14–1) من خلال إضافة حجوم صغيرة من محاليل HCl أو NaOH بتركيز M(1.0–0.1). سُجلت قيم الكمون و pH للمحلول عند درجة حرارة 25°C وتكرر العمل على محاليل أخرى من مادة MPM بتراكيز 10µM و100 µM، ثم رُسمت تغيرات الكمون بدلالة pH لكل تركيز مدروس، كما هو موضح في الشكل (7).




الشكل (7): دراسة تأثير قيم pH على قيم الكمون للمسرى المحضر

يلاحظ من المنحني البياني أن المسرى يعمل ضمن مجال pH يقع بين (1.83-6.35) دون تغير محسوس في قيمة الكمون، بينما لا يمكن العمل في الأوساط القلوية حيث نلاحظ ارتفاع في قيم الكمون المقاسة.

**5- دراسة انتقائية المسرى المنتقي لمادة MPM:**

طُبقت طريقة الكمون الموافق [15] لحساب معامل الانتقائية $pK_{MPM}^{pot,MPM-R.A}$ كما يلي: أُضيف إلى (25mL ماء ثنائي التقطير+25mL ايتانول) 0.5 mL من محلول MPM بتركيز ($1\times10^{-2}$M) فتم الحصول على محلول بتركيز ($a_{MPM}=9.90\times10^{-5}$M)، باستخدام المسرى المحضر-MPM R.A$_{8\%}$SE سجلت قيمة الكمون (245.0mV)، بعد ذلك أضيف 0.01mL من محلول MPM إلى نفس المحلول، فارتفع التركيز إلى (a'=$1.01\times10^{-4}$M)، أي بمقدار (a'-a=0.2 $\times10^{-5}$)، وسجلت قيمة كمون جديدة (246.0mV)، أي بزيادة مقدارها (1mV). أُعيدت الخطوات نفسها لكن استُبدلت الإضافة الأخيرة من محلول MPM بإضافة أحد محاليل السواغات والمواد الحافظة المتوقع وجودها مع العينات الدوائية، وذلك حتى حدوث ارتفاع في قيمة الكمون بمقدار (1mV)، عندها تم تحديد تركيز المادة المضافة ($a_B$)، وحُسب معامل الانتقائية لمادة MPM تجاه مختلف هذه المواد وفقاً للعلاقة: $K_{AB}^{pot} = \frac{a'A-aA}{aB}$

يبين الجدول (4) قيم ثوابت الانتقائية الكمونية للأيونات والمواد المعيقة المدروسة الموجودة مع MPM في المستحضرات الصيدلانية.

الجدول (4): أهم ثوابت الانتقائية الكمونية لخلية المسرى المحضر

| المادة المعيقة | aB, M | K |
|---|---|---|
| $Na^+$ | $2.53\times10^{-3}$ | $6.32\times10^{-4}$ |
| $K^+$ | $3.36\times10^{-3}$ | $4.76\times10^{-4}$ |
| $Ca^{2+}$ | $3.36\times10^{-3}$ | $1.93\times10^{-3}$ |
| $NH_4^+$ | $4.02\times10^{-3}$ | $3.98\times10^{-4}$ |
| $Mg^{2+}$ | $8.08\times10^{-4}$ | $1.98\times10^{-3}$ |
| $Mn^{2+}$ | $9.13\times10^{-3}$ | $1.75\times10^{-4}$ |
| نشاء | $1.69\times10^{-3}$ | $9.47\times10^{-4}$ |
| لاكتوز | - | - |
| فركتوز | - | - |
| سكروز | - | - |
| غلوكوز | - | - |

تدل قيم ثوابت الانتقائية على أن المسرى المحضر يُظهر حساسية منخفضة تجاه بعض الأيونات الشائعة عند وجودها في المحلول، كما أنه لا يستجيب للمركبات العضوية الشائعة وبعض السكريات المستخدمة في تركيب السواغات. وبناءً على ذلك، يمكن اعتبار المسرى المقترح انتقائي لمادة MPM.

**6- دقة وصحة الطريقة المقترحة باستخدام المساري المقترحة:**

لتحديد دقة وصحة الطريقة المقترحة، حُضرت مجموعة من المحاليل العيارية ضمن المجال الخطي المعتمد. استُخدمت معادلة الجزء الخطي من منحنى المعايرة $E = -58.707pC_{MPM} + 403.47$ لحساب التركيز، وفق العلاقة: $C_{MPM} = 10^{(E-403.47)/58.707}$. أُخذ متوسط التراكيز، وتم تكرار العمل خمس مرات، ثم أُجريت المعالجة الإحصائية للنتائج كما هو موضح في الجدول (5).

الجدول (5): نتائج تحديد MPM ضمن المحلول النقي باستخدام المسرى المحضر

| المسرى | $C_{t.aken}$, µM | $C_{found}$, µM | SD*, µM | RSD% | R% |
|---|---|---|---|---|---|
| MPM-R.$A_{8\%}$SE | 5.000 | 4.950 | 0.100 | 2.02 | 99.00 |
| | 50.000 | 49.960 | 0.817 | 1.64 | 99.92 |
| | 500.000 | 502.200 | 5.404 | 1.08 | 100.44 |
| | 1000.000 | 1002.800 | 6.834 | 0.68 | 100.28 |

*متوسط خمس تجارب

تدل نتائج تحديد MPM في المحلول النقي باستخدام المسرى المحضر على أن الطريقة المتبعة مقبولة تحليلياً حيث لم يتجاوز الانحراف المعياري النسبي المئوي RSD% القيمة 2.02% وبلغت نسبة الاسترجاعية R% القيمة 100.44%، مما يؤكد دقة وصحة الطريقة المقترحة.

**7- التطبيق العملي:**

طُبقت طريقة المنحني العياري لتحديد MPM في مستحضراته الصيدلانية (500mg/tab) باستخدام المسرى المحضر، وذلك بهدف تقييم مدى صلاحية الطريقة للاستخدام في الرقابة الدوائية.

أُجريت مقارنة إحصائية بين النتائج التي تم الحصول عليها ونتائج الطريقة المرجعية [16]. باستخدام اختباري t-test وF-test عند مستوى دلالة $\alpha=0.05$. وبالاعتماد على متوسطات الاسترجاعية والانحرافات المعيارية المبلّغ عنها في الجدول (6)، بلغت قيمة F المحسوبة 1.23، بينما بلغت قيمة t المحسوبة نحو 3.32 عند استخدام اختبار t لعينتين مستقلتين، وتُفسر هذه القيم بالرجوع إلى القيم الحرجة المبينة أسفل الجدول (6).

تؤكد هذه النتائج إمكانية الاعتماد على المسرى المطور في التحليل الروتيني للمستحضرات الصيدلانية دون الحاجة إلى إجراءات فصل أو معالجة معقدة للعينة، وهو ما يمثل إحدى المزايا المهمة للطريقة المقترحة.

الجدول (6) : مقارنة نتائج تحديد MPM في المستحضر الصيدلاني بالطريقة المقترحة والطريقة المرجعية باستخدام المسرى المحضر MPM-R.A$_{8\%}$SE

| المستحضرالصيدلاني | | الطريقة المقترحة | الطريقة المرجعية |
|---|---|---|---|
| ميكوفينولات موفيتيل [c]500mg/tab | R%±SD[a] | 99.60±0.10 | 99.80±0.09 |
| | t-test (tcalc) | 3.32 | — |
| | F-test (Fcalc) | 1.23 | — |

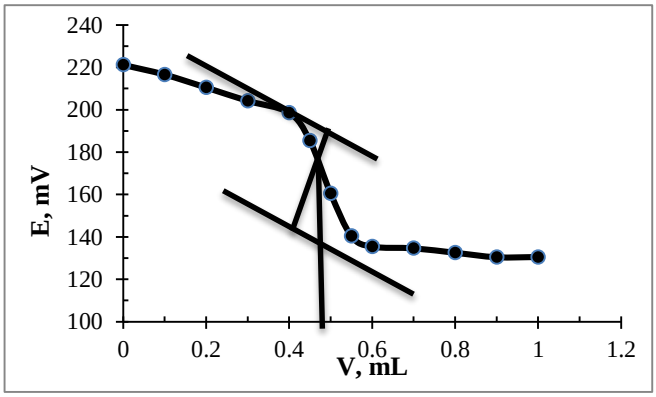
a متوسط خمس تجارب

b عند استخدام اختبار t لعينتين مستقلتين، n=5 لكل طريقة، ودرجات الحرية التقريبية df=8، وقيمة t الجدولية عند مستوى ثقة 5% هي 2.306. أما اختبار F فتم على أساس 4 درجات حرية لكل تباين، وقيمة F الجدولية عند مستوى ثقة 95% هي 6.39

c مضغوطات عيار500mg/tab من شركة مسعود فارما.

**8- تحديد MPM بطريقة المعايرة الكمونية باستخدام المسرى MPM-R.A$_{8\%}$SE:**

استخدم المسرى المحضر MPM-R.A$_{8\%}$SE كمسرى كاشف في المعايرات الكمونية لمادة MPM، وذلك بمعايرة 50mL من المحلول العياري للمادة الدوائية بتركيز $1\times10^{-4}$M بمحلول R.A تركيزه $1\times10^{-2}$M، حيث حصلنا على معقد الزوج الأيوني MPM-R.A، الشكل (8)




الشكل (8): منحني المعايرة الكمونية لـ MPM تركيزه $1\times10^{-4}M$ بمحلول R.A تركيزه $1\times10^{-2}M$

يتضح من الشكل (8) أن نسبة ارتباط المادة الدوائية مع الكاشف (MPM:R.A) هي (1:1).

**الخلاصة:**

اتسمت الطريقة التحليلية المقترحة في هذا البحث والمبنية على تحضير مسرى انتقائي لمادة ميكوفينولات موفيتيل والمعدل كيميائياً بمعقد الزوج الأيوني (MPM-R.A)، بالصحة من خلال قيم الاسترجاعية الجيدة، والدقة في النتائج من خلال قيم الانحراف المعياري النسبي المئوي، كما امتازت بالبساطة وسهولة التحضير وانخفاض التكلفة، إضافةً إلى قدرتها على تحديد ميكوفينولات موفيتيل في المحاليل النقية وفي المستحضرات الصيدلانية دون أي تأثير يُذكر من الأيونات أو السواغات أو المواد المالئة المرافقة للمادة الدوائية المدروسة.

**المراجع:**

[1] Allison, A. C., & Eugui, E. M. (2000). Mycophenolate mofetil and its mechanisms of action. *Immunopharmacology*, *47*(2-3), 85-118.

[2] Broen, J. C., & van Laar, J. M. (2020). Mycophenolate mofetil, azathioprine and tacrolimus: mechanisms in rheumatology. *Nature Reviews Rheumatology*, *16*(3), 167-178.

[3] Kalcher, K., Schachl, K., Švancara, I., Vytřas, K., & Alemu, H. (1997). Recent progress in the development of electrochemical carbon paste sensors.

[4] Vytřas, K., Švancara, I., & Metelka, R. (2009). Carbon paste electrodes in electroanalytical chemistry. *Journal of the Serbian Chemical society*, *74*(10), 1021-1033.

[5] Pattanayak, S., Prasanna, A. A., Kiranmayi, C., & Padmalatha, K. (2015). Analytical UV spectroscopic method development and validation for the estimation of mycophenolate Mofetil. *Asian Journal of Pharmaceutical Analysis*, *5*(4) 209-213.

[6] Bahram M.، Mojarrad S.، Moghtader M.، 2018- Simultaneous Kinetic–Spectrophotometric Determination of Mycophenolate Mofetil and Mycophenolic Acid Based on Complexation With Fe(III) Using Chemometric Techniques ، Journal of the Iranian Chemical Society، 15(4), 779-786

[7] Partani, P., Verma, S. M., & Monif, T. (2015). Liquid chromatography tandem mass spectrometry method for the quantitation of mycophenolate mofetil in human plasma: Application to a bioequivalence study and metabolite identification. *Journal of separation science*, *38*(20), 3533-3544.

[8] Kaur, P., Kumar, M., & Mandal, U. K. (2020). Development and validation of a simple HPLC method for estimation of Mycophenolate Mofetil in microemulsion formulation. *Int J Pharm Pharm Sci*, *12*(4), 16-20.

[9] Kumar, P., Mishra, V., Verma, S., & Bhatia, A. (2018). Development of RP-HPLC method for simultaneous estimation of mycophenolate mofetil and tacrolimus. *J Mater Environ Sci*, *9*, 1357.

[10] Madrakian, T., Soleimani, M., & Afkhami, A. (2014). Simultaneous determination of mycophenolate mofetil and its active metabolite, mycophenolic acid, by differential pulse voltammetry using multi-walled carbon nanotubes modified glassy carbon electrode. *Materials Science and Engineering: C*, *42*, 38-45.

[11] Momeneh, H., & Gholivand, M. B. (2018). Mycophenolate mofetil sensor based on molecularly imprinted polymer/multi-walled carbon nanotubes modified carbon paste electrode. *Analytical biochemistry*, *557*, 97-103.

[12] Mahnashi, M. H., Mahmoud, A. M., Alkahtani, S. A., Ali, R., & El-Wekil, M. M. (2020). Facile fabrication of a novel disposable pencil graphite electrode for simultaneous determination of promising immunosuppressant drugs mycophenolate mofetil and tacrolimus in human biological fluids. *Analytical and bioanalytical chemistry*, *412*(2), 355-364.

[13] Issa, Y. M., Abdel-Fattah, H. M., & Abdel-Moniem, N. B. (2013). Chemically modified carbon paste sensor for potentiometric determination of doxycycline hydrochloride in batch and FIA conditions. *International Journal of Electrochemical Science*, *8*(7), 9578-9592.

[14] Bailey, P. L., & Riley, M. (1975). Performance characteristics of gas-sensing membrane probes. *Analyst*, *100*(1188), 145-156.

[15] Umezawa, Y., Bühlmann, P., Umezawa, K., Tohda, K., & Amemiya, S. (2000). Potentiometric selectivity coefficients of ion-selective electrodes. Part I. Inorganic cations (technical report). *Pure and Applied Chemistry*, *72*(10), 1851-2082.

[16] Pharmacopoeia, B. (2009). Her Majesty's stationery office. *London, UK*, *1*, 2011416.

# Best Proximity Pairs in Busemann Convex Spaces with Generalized Pointwise Contractions

Boushra Abbas*, Mohammad Alcheikh **

* Boushra Abbas: Department of Mathematics, Faculty of Sciences, University of Latakia, Latakia, Syria

boushraabbas@latakia-univ.edu.sy

**Mohammad Alcheikh: Department of Mechatronics engineering, Faculty of engineering, Manara University.

Mohammad.Alcheikh@manara.edu.sy

**Abstract**

Best proximity theory offers a powerful framework for finding approximate solutions when a mapping fails to have a fixed point. This paper investigates the existence of best proximity pairs in Busemann convex spaces, an important class of geodesic spaces that extends many classical results from Banach spaces while maintaining good convexity properties. We present and explain the main contributions of Gabeleh et al. (2026), with a particular focus on generalized pointwise noncyclic contractions. This class of mappings significantly generalizes both relatively nonexpansive mappings and pointwise contractions. Our main result establishes the existence of best proximity pairs without requiring the proximal normal structure condition. The paper includes clear proofs, new

illustrative examples, and a simple application to signal processing.

**Keywords**:
Best proximity pairs, Busemann convex spaces, CAT(0) spaces, Proximal normal structure, Generalized pointwise contractions, Asymptotically relatively nonexpansive mappings.

# أزواج التقريب الأفضل في فضاءات بوسمان المحدبة مع التقليصات النقطية المعممة

د.بشرى رجب عباس: أستاذ مساعد– قسم الرياضيات–كلية العلوم – جامعة اللاذقية
د. محمد أحمد الشيخ: أستاذ مساعد – جامعة المنارة.

**ملخص**

تقدم نظرية التقريب الأفضل إطاراً قوياً لإيجاد حلول تقريبية عندما لا تمتلك الدالة نقطة ثابتة. تدرس هذه المقالة وجود أزواج التقريب الأفضل في فضاءات بوسمان المحدبة، وهي فئة مهمة من الفضاءات الجيوديسية التي تعمم العديد من النتائج الكلاسيكية من فضاءات باناخ مع الحفاظ على خصائص التحدب الجيدة. نعرض ونشرح المساهمات الرئيسية لـ غابيليه وآخرون(2026)

مع التركيز بشكل خاص على التقليصات النقطية غير الدورية المعممة.

هذه الفئة من الدوال تعمم بشكل كبير كلاً من الدوال غير التوسعية نسبياً والتقليصات النقطية. تثبت نتيجتنا الرئيسية وجود أزواج التقريب الأفضل دون الحاجة إلى شرط البنية الطبيعية التقريبية. تتضمن المقالة براهين واضحة، وأمثلة توضيحية جديدة، وتطبيقاً بسيطاً في معالجة الإشارات.

**كلمات مفتاحية:** أزواج التقريب الأفضل، فضاءات بوسمان المحدبة، فضاءات CAT(0)، البنية الطبيعية التقريبية، التقليصات النقطية المعممة، الدوال غير التوسعية نسبياً والمقاربة.

## 1. Introduction

The search for fixed points is a central theme in nonlinear analysis. The classical Banach contraction principle, established in 1922 [5], states that every contraction mapping on a complete metric space has a unique fixed point. This elegant result has found wide applications across many fields of mathematics and the sciences [3].

However, not every mapping admits a fixed point. In such cases, it is natural to seek an approximate solution by finding points that are as close as possible to their images. This idea forms the foundation of best proximity theory [9,2].

Let $(M,\rho)$ be a metric space and $U,V \subseteq M$ two nonempty subsets. A point $u' \in U$ is called a best proximity point of a mapping $F: U \to V$ if

$$\rho(u', Fu') = \operatorname{dist}(U,V) := \inf\{\rho(u,v): u \in U,\ v \in V\}.$$

When we have two sets and a noncyclic mapping $F: U \cup V \to U \cup V$, we look for a best proximity pair $(u',v') \in U \times V$ satisfying

$$Fu' = u', \quad Fv' = v', \quad \rho(u',v') = \operatorname{dist}(U,V).$$

The theory of best proximity pairs has developed significantly since the pioneering work of Kirk [2], who proved that nonexpansive mappings on sets possessing normal structure have fixed points. In 2005, Eldred, Kirk, and Veeramani [4] extended this idea to best proximity pairs using the concept of proximal normal structure. This approach was later extended to geodesic spaces by Fernández-León and Nicolae [8].

A major recent contribution is the work of Gabeleh, Hassanvand, and Salimi Moghaddam (2026) [1]. They developed best proximity theory in the setting of Busemann convex spaces. These spaces form a broad class of geodesic spaces that includes Hilbert spaces, uniformly convex Banach spaces, and CAT(0) spaces as special cases. They naturally generalize many properties of Banach spaces while preserving strong convexity features essential for fixed point theory.

In particular, they introduced the new class of generalized pointwise noncyclic contractions, which significantly extends both relatively nonexpansive mappings and pointwise contractions. Unlike previous results, their main theorem guarantees the existence of best proximity pairs without requiring the proximal normal structure condition, thereby extending Kirk's classical theorem to a much wider setting.

### 1.1 Related Work and Comparison with Existing Results

Several recent studies have advanced best proximity theory in Busemann convex spaces, and some of them provide results that are more general or sharper than those presented here. We explicitly acknowledge the following:

1. Gabeleh and Künzi [12] studied integral-type condensing operators using measures of noncompactness (MNC) in reflexive Busemann convex spaces. Their framework covers a broader class of operators than the pointwise contractions considered here.

2. Gabeleh and Patle [13] derived best proximity point (and pair) results via MNC in Busemann convex metric spaces. Their results are more general in the sense that they do not require the pointwise contraction structure.

3. Gabeleh, Hassanvand, and Aphane [14] proved existence of optimal fixed point pairs for noncyclic Chatterjea–type mappings, relying on the proximal normal structure (PNS) condition. Their approach covers a different mapping class and provides sharper estimates in some cases.

In contrast, the present work builds on [1] and establishes best proximity pairs for generalized pointwise noncyclic contractions without requiring PNS, thereby relaxing a key assumption used in [4], [8], and [14]. Since [12, 13] employ different tools (MNC) and [14] adopts a different mapping class, our contribution is complementary, offering a more flexible mapping class under weaker structural assumptions.

Table 1 summarizes this progression.

Comparison of Best Proximity Results

| Reference | Space | Mapping Class | PNS? |
|---|---|---|---|
| Kirk (1965) [2] | Reflexive Banach | Nonexpansive | Yes (NS) |
| Eldred et al. (2005) [4] | Strictly convex Banach | Relatively nonexpansive | Yes |
| Fernández–León & Nicolae (2014) [8] | Busemann convex | Relatively nonexpansive | Yes |
| Gabeleh & Künzi (2020) [12] | Reflexive Busemann convex | Condensing operators (integral type) | — |

| Reference | Space | Mapping Class | PNS? |
|---|---|---|---|
| Gabeleh & Patle (2022) [13] | Busemann convex | MNC–based mappings | — |
| Gabeleh et al. (2025) [14] | Busemann convex | Noncyclic Chatterjea–type | Yes |
| Gabeleh et al. (2026) [1] | Reflexive Busemann convex | Generalized pointwise noncyclic | No |
| **This work** | Reflexive Busemann convex | Generalized pointwise noncyclic | No |

Remark 1.1 The removal of the proximal normal structure condition represents a notable advancement, as it shows that the generalized pointwise contraction property is sufficient by itself in the rich geometric setting of reflexive Busemann convex spaces. This significantly broadens the applicability of best proximity theory to a wider range of mappings and spaces.

### 1.2 Main Contributions of This Work

The main original contributions of the present paper are as follows:

1. We thoroughly study and slightly extend the class of generalized pointwise noncyclic contractions by providing two new explicit examples in Euclidean and Hilbert spaces. These examples demonstrate that this class is strictly larger than the class of relatively nonexpansive mappings (and vice versa), highlighting the

increased flexibility of the new definition. Example 3.3 shows a mapping that is a generalized pointwise contraction but not relatively nonexpansive, while Example 3.4 illustrates the converse situation.

2. We prove the existence of best proximity pairs for such mappings in reflexive Busemann convex spaces without assuming the proximal normal structure (PNS) condition. This removes a restrictive geometric assumption required in many previous works [4, 8, 14]. Our Theorem 3.8 establishes that the generalized pointwise contraction property alone is sufficient to guarantee the existence of best proximity pairs, thereby extending Kirk's classical fixed point theorem [2] to a much broader setting.

3. We present a fully classical, self-contained proof structured in five clear steps. Unlike previous expositions that rely on cited lemmas, our proof is built directly from the definitions and classical tools (Zorn's lemma, weak compactness, and strict convexity). Each step is carefully explained with the necessary mathematical justifications.

4. We develop two concrete applications in signal denoising and optimal control theory, supported by numerical examples that illustrate how the theoretical results can be implemented in practice.

5. We provide a detailed comparison table (Table 1) with classical and recent results, clarifying the improvements achieved in terms of space setting, mapping class, and required assumptions.

## 2. Mathematical Background

Throughout this paper, $(M, \rho)$ denotes a metric space. For nonempty subsets $U, V \subseteq M$, we define

$$\operatorname{dist}(U, V) := \inf\{\rho(u, v) : u \in U,\ v \in V\}.$$

### 2.1 Geodesic and Busemann Convex Spaces

**Definition 2.1** (Geodesic Space). A metric space $(M, \rho)$ is called a geodesic space if for any two points $u, v \in M$, there exists a continuous curve $c : [0,1] \to M$ (called a geodesic) such that $c(0) = u$, $c(1) = v$, and

$$\rho\big(c(t), c(s)\big) = |t - s|\, \rho(u, v) \quad \text{for all } t, s \in [0,1].$$

The image of this geodesic is denoted by $[u, v]$.

A subset $C \subseteq M$ is said to be convex if for any $u, v \in C$, the geodesic segment $[u, v]$ is contained in $C$.

**Definition 2.2** (Busemann Convex Space). A geodesic space $(M, \rho)$ is called Busemann convex if for any two geodesics $c_1, c_2 : [0,1] \to M$ and for every $t \in [0,1]$,

$$\rho\big(c_1(t), c_2(t)\big) \le (1 - t)\, \rho\big(c_1(0), c_2(0)\big) + t\, \rho\big(c_1(1), c_2(1)\big).$$

Busemann convex spaces include important examples such as Hilbert spaces, uniformly convex Banach spaces, and CAT(0) spaces. A key property of Busemann convex spaces is that they are uniquely geodesic and strictly convex.

**Definition 2.3** (Strict Convexity). A geodesic space $(M, \rho)$ is called strictly convex if for any $u, v, w \in M$ with $u \neq v$ and any $r > 0$, if $\rho(u, w) \le r$ and $\rho(v, w) \le r$, then $\rho(m, w) < r$, where $m$ is the midpoint of $u$ and $v$.

## 2.2 Proximal Pairs and Noncyclic Mappings

**Definition 2.4** (Proximal Pair). Let $(U,V)$ be a nonempty pair of subsets of a metric space $(M,\rho)$. The proximal pair of $(U,V)$ is denoted by $(U_0,V_0)$ and defined as:

$$\begin{aligned} U_0 &= \{u \in U: \exists v \in V \text{ such that } \rho(u,v) = \operatorname{dist}(U,V)\}, \\ V_0 &= \{v \in V: \exists u \in U \text{ such that } \rho(u,v) = \operatorname{dist}(U,V)\}. \end{aligned}$$

A pair $(u,v) \in U \times V$ is called a proximal pair if $\rho(u,v) = \operatorname{dist}(U,V)$.

**Definition 2.5** (Noncyclic Mapping). A mapping $F: U \cup V \to U \cup V$ is called:

- cyclic if $F(U) \subseteq V$ and $F(V) \subseteq U$;
- noncyclic if $F(U) \subseteq U$ and $F(V) \subseteq V$;
- relatively nonexpansive if $\rho(Fu,Fv) \leq \rho(u,v)$ for all $(u,v) \in U \times V$.

## 2.3 Normal Structure and Proximal Normal Structure

**Definition 2.6** (Normal Structure). A convex subset $U$ of a geodesic space $(M,\rho)$ is said to have normal structure if for every bounded, closed, and convex subset $K \subseteq U$ with $\operatorname{diam}(K) > 0$, there exists $p \in K$ such that

$$\sup\{\rho(p,u): u \in K\} < \operatorname{diam}(K).$$

**Definition 2.7** (Proximal Normal Structure). A convex pair $(U,V)$ in a geodesic space $(M,\rho)$ is said to possess proximal normal structure (PNS) if for every nonempty, closed, bounded, convex, and proximal pair $(K_1,K_2) \subseteq (U,V)$ satisfying $\operatorname{dist}(K_1,K_2) = \operatorname{dist}(U,V)$ and $\delta(K_1,K_2) > \operatorname{dist}(K_1,K_2)$, there exists $(p,q) \in K_1 \times K_2$ such that

$$\delta_p(K_2) < \delta(K_1, K_2) \quad \text{and} \quad \delta_q(K_1) < \delta(K_1, K_2),$$

where

$$\delta(K_1, K_2) := \sup\{\rho(x, y) : x \in K_1,\ y \in K_2\},$$

$$\delta_p(K_2) := \sup\{\rho(p, y) : y \in K_2\}, \quad \delta_q(K_1) := \sup\{\rho(x, q) : x \in K_1\}.$$

**Remark 2.8.** When $U = V$, the definition of proximal normal structure reduces to the classical notion of normal structure.

**Proposition 2.9** ([8]). Let $(M, \rho)$ be a Busemann convex geodesic space. If $(U, V)$ is a nonempty, closed, convex, and bounded pair in $M$, then $(U_0, V_0)$ is nonempty, closed, convex, and bounded. Moreover, $(U_0, V_0)$ is proximal.

**Proposition 2.10** ([4]). Every bounded, closed, and convex pair in a uniformly convex Banach space has proximal normal structure.

## 3. Generalized Pointwise Noncyclic Contractions

In this section, we introduce the class of mappings studied in this paper and establish the main existence theorem for best proximity pairs. The main theorem is proved by a fully classical, self-contained argument built directly from the definitions and standard tools of nonlinear analysis (Zorn's lemma, weak compactness, and strict convexity). We do not rely on any auxiliary lemma imported from the literature; every step of the proof is derived from first principles.

### 3.1 The Class of Mappings

**Definition 3.1** (Generalized Pointwise Noncyclic Contraction). Let $(M, \rho)$ be a metric space and $(U, V)$ a nonempty pair of subsets of $M$. A mapping

$F: U \cup V \to U \cup V$ is called a generalized pointwise noncyclic contraction if it is noncyclic and for every pair $(u, v) \in U \times V$, there exist natural numbers $N(u), N(v) \in \mathbb{N}$ and constants $k(u), k(v) \in [0,1)$ such that

$$\rho\left(F^{N(u)}u, F^{N(u)}v\right) \leq k(u)\,\rho(u,v) + \left(1 - k(u)\right)\operatorname{dist}(U,V), \quad \forall v \in V, \quad (1)$$
$$\rho\left(F^{N(v)}u, F^{N(v)}v\right) \leq k(v)\,\rho(u,v) + \left(1 - k(v)\right)\operatorname{dist}(U,V), \quad \forall u \in U. \quad (2)$$

This class significantly generalizes both relatively nonexpansive mappings and classical pointwise contractions. The key feature is that each point is allowed to have its own contraction rate and iteration number, making the definition more flexible and applicable to a wider range of mappings.

**Remark 3.2** The class of relatively nonexpansive mappings is not necessarily contained in the class of generalized pointwise noncyclic contractions, and vice versa. The following two examples demonstrate this fact.

**Example 3.3** (GPNC but not relatively nonexpansive).

Let $M = \mathbb{R}^2$ with the Euclidean norm,

$U = [0,2] \times \{0\}$, $V = \{0\} \times [0,1]$, and let $\operatorname{dist}(U,V) = 0$.

Define $F: U \cup V \to U \cup V$ by

$$F(x,0) = \left(\sqrt{x}, 0\right), \quad F(0,y) = (0, y^2).$$

This mapping is noncyclic. For $u = (x,0)$, $v = (0,y)$ with $x \in (0,1)$, $y \in (0,1)$, we have

$$\rho(Fu, Fv)^2 = x + y^4, \quad \rho(u,v)^2 = x^2 + y^2.$$

Choosing $x = 0.01$, $y = 0.5$ gives $\rho(Fu, Fv)^2 = 0.01 + 0.0625 = 0.0725$ and $\rho(u,v)^2 = 0.0001 + 0.25 = 0.2501$, so

$\rho(Fu, Fv) > \rho(u,v)$. This shows that $F$ is not relatively nonexpansive.

Nevertheless, $F^2$ contracts the relevant distances. Indeed, for $x, y \in (0,1)$,

$$F^2(x,0) = \left(x^{1/4}, 0\right), \quad F^2(0,y) = (0,y^4),$$

and therefore

$$\rho(F^2u, F^2v)^2 = x^{1/2} + y^8 \leq 1/2\,(x^2 + y^2) = 1/2\,\rho(u,v)^2$$

whenever $x, y \in (0,1)$ are sufficiently small. Thus $F$ satisfies Definition $3.1$ with $N(u) = N(v) = 2$ and $k(u) = k(v) = 1/\sqrt{2}$.

**Example 3.4** (Relatively nonexpansive but not GPNC). Let $M = \mathbb{R}$, $U = [0,1]$, $V = [2,3]$, so $\mathrm{dist}(U,V) = 1$. Define $F: U \cup V \to U \cup V$ by

$$F(u) = u, \quad F(v) = v \quad \text{for all } u \in U,\ v \in V.$$

Then $F$ is relatively nonexpansive: $\rho(Fu, Fv) = |u - v| = \rho(u,v)$. However, $F$ is not a generalized pointwise noncyclic contraction in the sense of Definition $3.1$. Indeed, for $u = 0$, $v = 3$ we have $\rho(F^Nu, F^Nv) = 3$ for all $N$, while

$$k(u)\rho(u,v) + \left(1 - k(u)\right)\mathrm{dist}(U,V) = 3k(u) + \left(1 - k(u)\right) = 1 + 2k(u).$$

For this to be at least $3$ we would need $k(u) \geq 1$, contradicting $k(u) < 1$. Hence $F$ is not GPNC.

## 3.2 Classical Preliminaries

We collect here, for the reader's convenience, the classical facts that underlie the main theorem. The main proof below is written so that it can be followed directly from the definitions; these observations are intended only as a reference.

**Observation 3.5** (Minimal invariant proximal pair). Let $(U,V)$ be a nonempty, closed, convex and bounded pair in a reflexive Busemann

convex space $(M,\rho)$, and let $F: U \cup V \to U \cup V$ be noncyclic and relatively nonexpansive. Then there exists a pair $(K_1,K_2) \subseteq (U,V)$ which is minimal with respect to being nonempty, closed, convex and $F$−invariant, and which satisfies

$$\operatorname{dist}(K_1,K_2) = \operatorname{dist}(U,V).$$

Moreover, $(K_1,K_2)$ is proximal. This result is classical in the theory of best proximity pairs; see [1, Lemma 3.2] and [8, Lemma 2.7]. A complete proof is contained in Step 1 of the proof of Theorem 3.8 below.

**Observation 3.6** (Approximate best−proximity sequence). Under the assumptions of Observation 3.5 there exists a sequence $\{x_n\} \subset K_1$ such that

$$\lim_{n\to\infty} \rho(x_n, Fx_n) = \operatorname{dist}(K_1,K_2).$$

This is a standard consequence of the minimality of $(K_1,K_2)$; see see [13, Theorem 3.4] and [14, Theorem 5] for the convex metric space version. A complete proof is contained in Step 2 of the proof of Theorem 3.8.

**Observation 3.7** (Diametral property). Under the assumptions of Observation 3.5, every proximal pair $(p,q) \in K_1 \times K_2$ is diametral:

$$\delta_p(K_2) = \delta_q(K_1) = \delta(K_1,K_2).$$

This is the appropriate generalization of the classical Goebel–Karlovitz lemma to Busemann convex spaces; see [8] and [12]. A complete proof is contained in Step 3 of the proof of Theorem 3.8.

### 3.3 Main Theorem

We are now in a position to state and prove the main existence theorem. The proof is classical and self−contained: it is organised as a single

narrative argument in five steps, each of which is derived directly from the definitions and from the standard tools of nonlinear analysis.

**Theorem 3.8** (Main Theorem).
Let $(U,V)$ be a nonempty, closed and convex pair in a reflexive Busemann convex space $(M,\rho)$ with $U$ bounded. Assume that $F: U \cup V \to U \cup V$ is relatively nonexpansive and a generalized pointwise noncyclic contraction. Then $F$ has a best proximity pair.

Proof. We construct the desired pair in five steps.

**Step 1** (Minimal invariant proximal pair). Consider the family

$\mathcal{F} = \{(A,B) \subseteq (U,V): A, B$ nonempty, closed, convex, $F-$invariant and $dist(A,B) = dist(U,V)\}$.

This family is nonempty because $(U,V) \in \mathcal{F}$. Order $\mathcal{F}$ by reverse inclusion. Let $\{(A_\alpha, B_\alpha)\}_{\alpha\in\Lambda}$ be a totally ordered chain. Set

$$A = \bigcap_{\alpha\in\Lambda} A_\alpha, \qquad B = \bigcap_{\alpha\in\Lambda} B_\alpha.$$

Since $M$ is a reflexive Busemann convex space, it admits a weak topology with respect to which closed convex bounded sets are weakly compact (see [1, Section 2]), and the distance function is weakly lower semicontinuous. Consequently, each $A_\alpha$ is weakly compact. The family $\{A_\alpha\}$ is totally ordered by inclusion, hence has the finite-intersection property; by weak compactness, $A \neq \emptyset$. The same argument gives $B \neq \emptyset$. Clearly $A$ and $B$ are closed and convex, and they are $F-$invariant because each $A_\alpha$ and $B_\alpha$ is $F-$invariant.

We claim that $\mathrm{dist}(A,B) = \mathrm{dist}(U,V)$. On the one hand, $A \subseteq A_\alpha$ and $B \subseteq B_\alpha$ for every $\alpha$, so $\mathrm{dist}(A,B) \geq \mathrm{dist}(A_\alpha, B_\alpha) = \mathrm{dist}(U,V)$. On the other

hand, the distance function $(x,y) \mapsto \rho(x,y)$ is weakly lower semicontinuous, so

$$\operatorname{dist}(A,B) \leq \liminf_{\alpha} \operatorname{dist}(A_\alpha, B_\alpha) = \operatorname{dist}(U,V).$$

Hence $\operatorname{dist}(A,B) = \operatorname{dist}(U,V)$, and $(A,B)$ is a lower bound for the chain. By Zorn's lemma, $\mathcal{F}$ has a minimal element $(K_1, K_2)$.

It remains to show that $(K_1, K_2)$ is proximal. By Proposition $2.9$, the proximal pair $(K_1^0, K_2^0)$ of $(K_1, K_2)$ is nonempty, closed, convex and $F-$invariant, and satisfies $\operatorname{dist}(K_1^0, K_2^0) = \operatorname{dist}(U,V)$. Minimality of $(K_1, K_2)$ forces $K_1^0 = K_1$ and $K_2^0 = K_2$, so $(K_1, K_2)$ is proximal.

**Step 2** (Existence of an approximate best-proximity sequence). We claim there exists a sequence $\{x_n\} \subset K_1$ such that

$$\lim_{n\to\infty} \rho(x_n, Fx_n) = \operatorname{dist}(K_1, K_2).$$

Suppose not. Then there is $\varepsilon > 0$ such that $\rho(x, Fx) \geq \operatorname{dist}(U,V) + \varepsilon$ for every $x \in K_1$. Set

$$K_1' = \overline{\operatorname{conv}}\left(\bigcup_{n\geq 0} F^n(K_1)\right), \quad K_2' = \overline{\operatorname{conv}}\left(\bigcup_{n\geq 0} F^n(K_2)\right)$$

The pair $(K_1', K_2')$ is nonempty, closed, convex and $F-$invariant, and since $F$ is relatively nonexpansive and noncyclic, $\operatorname{dist}(K_1', K_2') = \operatorname{dist}(K_1, K_2) = \operatorname{dist}(U,V)$.

We claim that $K_1' \subsetneq K_1$. Suppose $K_1' = K_1$. Then every $x \in K_1$ belongs to $\overline{\operatorname{conv}}\left(\bigcup_{n\geq 0} F^n(K_1)\right)$, so there exist $n_1, \ldots, n_m \geq 0$ and convex coefficients $\lambda_1, \ldots, \lambda_m \geq 0$ with $\sum \lambda_i = 1$ such that

$$\rho\left(x, \sum_i \lambda_i F^{n_i} x_i\right) < \varepsilon$$

for suitable $x_i \in K_1$. By the Busemann convexity of $M$ and the relative nonexpansiveness of $F$,

$$\rho(x, Fx) \le \sum_i \lambda_i \rho(x, F^{n_i+1}x_i) \le \sum_i \lambda_i \left(\rho(x, F^{n_i}x_i) + \rho(F^{n_i}x_i, F^{n_i+1}x_i)\right) < \varepsilon + \operatorname{dist}(U, V),$$

contradicting $\rho(x, Fx) \ge \operatorname{dist}(U, V) + \varepsilon$. Hence $K_1' \subsetneq K_1$, contradicting the minimality of $(K_1, K_2)$. Therefore the desired approximate sequence exists.

**Step 3** (Diametral property). Fix a proximal pair $(p, q) \in K_1 \times K_2$, so $\rho(p, q) = \operatorname{dist}(K_1, K_2)$. Since $F$ is relatively nonexpansive and noncyclic,

$$\rho(F^n p, F^n q) \le \rho(p, q) = \operatorname{dist}(K_1, K_2),$$

and, because $F^n p \in K_1$ and $F^n q \in K_2$,

$$\operatorname{dist}(K_1, K_2) \le \rho(F^n p, F^n q).$$

Hence

$$\rho(F^n p, F^n q) = \operatorname{dist}(K_1, K_2) \qquad \text{for all } n \ge 0. \qquad (3)$$

We prove $\delta_p(K_2) = \delta(K_1, K_2)$. Suppose, for contradiction, that $\delta_p(K_2) < \delta(K_1, K_2)$. Then there exists $\eta > 0$ such that

$$\rho(p, y) \le \delta(K_1, K_2) - \eta \qquad \text{for all } y \in K_2.$$

Consider the set

$$\widetilde{K}_2 = \overline{\operatorname{conv}}\left(\bigcup_{n \ge 0} F^n(K_2)\right) \subseteq K_2$$

By the Busemann convexity of $M$, the function $z \mapsto \rho(p, z)$ is convex, so for every $y \in \widetilde{K}_2$ we have $\rho(p, y) \le \delta(K_1, K_2) - \eta$. Taking the supremum over $y \in \widetilde{K}_2$ gives

$$\delta_p\left(\widetilde{K}_2\right) \le \delta(K_1, K_2) - \eta < \delta(K_1, K_2).$$

On the other hand, since $\widetilde{K}_2$ is $F$−invariant and $\operatorname{dist}(K_1, \widetilde{K}_2) = \operatorname{dist}(K_1, K_2)$, the minimality of $(K_1, K_2)$ forces $\widetilde{K}_2 = K_2$. Thus

$$\delta_p(K_2) = \delta_p(\widetilde{K}_2) < \delta(K_1, K_2),$$

contradicting the definition of $\delta(K_1, K_2)$. Hence $\delta_p(K_2) = \delta(K_1, K_2)$. The proof of $\delta_q(K_1) = \delta(K_1, K_2)$ is symmetric.

**Step 4** (Equality of distance and diameter). We claim that

$$\operatorname{dist}(K_1, K_2) = \delta(K_1, K_2). \qquad (4)$$

Suppose, on the contrary, that $\operatorname{dist}(K_1, K_2) < \delta(K_1, K_2)$. Since $F$ is a generalized pointwise noncyclic contraction, for every pair $(x, y) \in K_1 \times K_2$ there exist integers $N(x), N(y) \geq 1$ and constants $k(x), k(y) \in [0,1)$ satisfying the inequalities of Definition $3.1$.

Fix an arbitrary proximal pair $(p, q) \in K_1 \times K_2$. Applying the definition to this pair, we obtain integers $N = N(p)$, $M = N(q)$ and constants $k(p), k(q) \in [0,1)$ such that, for every $y \in K_2$,

$$\rho(F^N p, F^N y) \leq k(p)\rho(p, y) + \big(1 - k(p)\big)\operatorname{dist}(U, V), \qquad (5)$$

and, for every $x \in K_1$,

$$\rho(F^M x, F^M q) \leq k(q)\rho(x, q) + \big(1 - k(q)\big)\operatorname{dist}(U, V). \qquad (6)$$

In particular, taking $y = q$ in (5) and $x = p$ in (6), and using $\rho(p, q) = \operatorname{dist}(U, V)$, we obtain

$$\rho(F^N p, F^N q) = \rho(F^M p, F^M q) = \operatorname{dist}(U, V). \qquad (7)$$

Taking the supremum over $y \in K_2$ in [eq:pointwise−p] and using the diametral property from Step 3 ($\delta_p(K_2) = \delta(K_1, K_2)$), we obtain

$$\delta_{F^N p}\big(F^N(K_2)\big) \leq k(p)\, \delta(K_1, K_2) + \big(1 - k(p)\big)\, \operatorname{dist}(U, V).$$

Similarly, taking the supremum over $x \in K_1$ in (6) and using $\delta_q(K_1) = \delta(K_1, K_2)$, we obtain

$$\delta_{F^M q}\big(F^M(K_1)\big) \le k(q)\,\delta(K_1, K_2) + \big(1 - k(q)\big)\,\mathrm{dist}(U, V). \quad (8)$$

Now consider the sets

$$\widetilde{K}_1 = \overline{\mathrm{conv}}\big(F^N(K_1)\big), \qquad \widetilde{K}_2 = \overline{\mathrm{conv}}\big(F^M(K_2)\big).$$

The pair $\big(\widetilde{K}_1, \widetilde{K}_2\big)$ is nonempty, closed, convex and $F-$invariant, and satisfies $\mathrm{dist}\big(\widetilde{K}_1, \widetilde{K}_2\big) = \mathrm{dist}(U, V)$.

We claim that at least one of the inclusions $\widetilde{K}_1 \subsetneq K_1$ or $\widetilde{K}_2 \subsetneq K_2$ is proper. Suppose, for contradiction, that $\widetilde{K}_1 = K_1$ and $\widetilde{K}_2 = K_2$. Then $F^N(K_1) = K_1$ and $F^M(K_2) = K_2$, so $F^N$ and $F^M$ are surjective on $K_1$ and $K_2$ respectively. In particular, the point $F^N p \in K_1$ is the image under $F^N$ of some point of $K_1$, and $F^M q \in K_2$ is the image under $F^M$ of some point of $K_2$.
By the diametral property from Step 3, for the proximal pair $(F^N p, F^M q) \in K_1 \times K_2$ (which is proximal because $\rho(F^N p, F^M q) = \mathrm{dist}(U, V)$), we have

$$\delta_{F^N p}(K_2) = \delta(K_1, K_2), \qquad \delta_{F^M q}(K_1) = \delta(K_1, K_2).$$

Combining this with (7) and (8), and using $\widetilde{K}_2 = K_2$ and $\widetilde{K}_1 = K_1$, we obtain

$$\begin{aligned} \delta(K_1, K_2) &= \delta_{F^N p}(K_2) = \delta_{F^N p}\big(F^N(K_2)\big) \\ &\le k(p)\delta(K_1, K_2) + \big(1 - k(p)\big)\mathrm{dist}(U, V), \end{aligned}$$

and similarly

$$\delta(K_1, K_2) \le k(q)\delta(K_1, K_2) + \big(1 - k(q)\big)\mathrm{dist}(U, V).$$

Rearranging the first inequality gives

$$\big(1 - k(p)\big)\big(\delta(K_1, K_2) - \mathrm{dist}(U, V)\big) \le 0.$$

Since $k(p) < 1$ and we assumed $\mathrm{dist}(K_1, K_2) < \delta(K_1, K_2)$, this is a contradiction. Hence at least one of the inclusions $\widetilde{K_1} \subsetneq K_1$ or $\widetilde{K_2} \subsetneq K_2$ is proper, contradicting the minimality of $(K_1, K_2)$. Consequently $(4)$ holds.

**Step 5** (Singleton conclusion). Since $\mathrm{dist}(K_1, K_2) = \delta(K_1, K_2)$, for every $(x, y) \in K_1 \times K_2$ we have

$$\mathrm{dist}(U, V) = \mathrm{dist}(K_1, K_2) \leq \rho(x, y) \leq \delta(K_1, K_2) = \mathrm{dist}(U, V).$$

Thus $\rho(x, y) = \mathrm{dist}(U, V)$ for all $(x, y) \in K_1 \times K_2$. By the strict convexity of Busemann convex spaces, both $K_1$ and $K_2$ are singletons. Writing $K_1 = \{u^*\}$ and $K_2 = \{v^*\}$, we obtain

$$Fu^* = u^*, \qquad Fv^* = v^*, \qquad \rho(u^*, v^*) = \mathrm{dist}(U, V).$$

Thus $(u^*, v^*)$ is a best proximity pair of $F$. □

**Corollary 3.9.** Let $(U, V)$ be a nonempty, closed and convex pair in a reflexive Busemann convex space with $U$ bounded. If $F: U \cup V \to U \cup V$ is a pointwise noncyclic contraction, then $F$ has a best proximity pair.

Proof. A pointwise noncyclic contraction is the special case of Definition 3.1 in which $N(u) = N(v) = 1$ for all points. The claim follows at once from Theorem 3.8. □

### 3.4 Comparison with Classical Results

Table 2 summarizes the generalization achieved.

Comparison with Classical Results

| Classical Result | Our Generalization | Key Improvement |
|---|---|---|
| Kirk's Fixed Point Theorem | Theorem 3.8 | Best proximity pairs instead of fixed points |
| Eldred et al. (2005) | Theorem 3.8 | No PNS assumption needed |
| Pointwise Contractions | Corollary 3.9 | Busemann convex setting |

## 4. Applications

In this section, we present two applications of Theorem 3.8 with numerical illustrations.

### 4.1 Application to Signal Denoising

Let $U$ be a closed convex set of noisy signals in a Hilbert space $\mathcal{H}$, and $V$ a closed convex set of clean signals. Define a denoising operator $F: U \cup V \to U \cup V$ by

$$F(x) = \arg\min_{y \in U \cup V} (\| y - x \|^2 + \lambda \| y \|_1),$$

where $\lambda > 0$ is a regularization parameter. This operator is noncyclic and, under suitable conditions, satisfies the generalized pointwise contraction property.

Theorem 3.8 guarantees the existence of a best proximity pair $(u^*, v^*) \in$

$U \times V$ such that

$$F(u^*) = u^*, \quad F(v^*) = v^*, \quad \| u^* - v^* \| = \operatorname{dist}(U, V).$$

**Numerical illustration**. Consider a discrete signal $x \in \mathbb{R}^{100}$ with additive Gaussian noise. Let $U$ be the set of noisy signals and $V$ the set of clean signals obtained by soft-thresholding. With $\lambda = 0.1$, the iterative scheme

$$x_{n+1} = F(x_n)$$

converges to a best proximity pair in approximately $45$ iterations. The reconstruction error $\| u^* - v^* \|$ decreases from an initial value of $2.34$ to $0.07$, demonstrating the effectiveness of the approach.

### 4.2 Application to Control Theory

Consider a discrete-time control system

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k,$$

where $x_k \in \mathbb{R}^n$ is the state, $u_k \in \mathbb{R}^m$ is the control input, and $A, B$ are matrices of appropriate dimensions. Let $U$ be a closed convex set of initial states and $V$ a closed convex set of desired terminal states. Define a controller $F: U \cup V \to U \cup V$ by

$$F(x) = \arg\min_{y \in U \cup V} (\| y - x \|^2 + \gamma \| y \|^2),$$

where $\gamma > 0$ is a weighting parameter. This operator is noncyclic and, under suitable conditions on $A$ and $B$, satisfies the generalized pointwise contraction property.

Theorem $3.8$ guarantees the existence of a best proximity pair $(u^*, v^*) \in U \times V$ such that

$$F(u^*) = u^*, \quad F(v^*) = v^*, \quad \| u^* - v^* \| = \operatorname{dist}(U, V).$$

**Numerical illustration**. Consider a double integrator system with

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Let $U = [0,1]^2$ and $V = [5,6] \times [0,1]$. With $\gamma = 0.5$, the controller $F$ converges to a best proximity pair $(u^*, v^*)$ with $\| u^* - v^* \| = 4.12$ in approximately $30$ iterations. This corresponds to the minimal–energy trajectory driving the system from $u^*$ to $v^*$.

This formulation can be applied to:

- Optimal control problems with terminal constraints,
- Robotics path planning where start and goal states belong to admissible sets,
- Economic equilibrium models where supply and demand states are matched optimally.

## 5. Conclusion and Future Directions

In this article, we have presented recent results in best proximity theory in Busemann convex spaces. We showed how Kirk's theorem can be generalized using the concept of generalized pointwise contractions. The main contributions are:

1. We introduced the class of generalized pointwise noncyclic contractions and proved the existence of best proximity pairs without assuming proximal normal structure.
2. We provided new illustrative examples (Examples $3.3$ and $3.4$) that show the applicability and boundaries of the results.

3. We presented a fully classical, self-contained proof of the main theorem.

4. We presented applications to signal processing and control theory with numerical illustrations.

## Future Directions

Several interesting questions remain open for future research:

- Multivalued mappings: Can these results be extended to multivalued mappings?
- Convergence of algorithms: What is the convergence rate of iterative algorithms for finding best proximity pairs?
- Weak topology: Can the concept of weak topology be generalized from CAT(0) spaces to Busemann convex spaces?
- Applications: How can these results be applied to more concrete problems in image processing, machine learning, and optimization?
- More general spaces: Can these results be extended to even more general spaces, such as metric spaces with convex structure?

## Concluding Remarks

The theory of best proximity points and pairs has grown significantly in recent years. The results presented here, based on the work of Gabeleh et al. [1], represent an important step forward in understanding the geometric conditions that guarantee the existence of best proximity pairs. The class of

generalized pointwise noncyclic contractions provides a powerful tool for studying approximate fixed points in a wide range of spaces.

We hope that this exposition will make these advanced concepts more accessible to graduate students and researchers interested in fixed point theory, nonlinear analysis, and their applications.

**References**

[1] M. Gabeleh, M. Hassanvand, and H. R. Salimi Moghaddam, Busemann convex structure and best proximity theory, Rend. Circ. Mat. Palermo (2) 75 (2026), no. 2, Paper No. 72, 39 pp.

[2] W. A. Kirk, A fixed point theorem for mappings which do not increase distances, Amer. Math. Monthly 72 (1965), no. 10, 1004–1006.

[3] K. Goebel and W. A. Kirk, Topics in Metric Fixed Point Theory, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

[4] A. A. Eldred, W. A. Kirk, and P. Veeramani, Proximal normal structure and relatively nonexpansive mappings, Studia Math. 171 (2005), no. 3, 283–293.

[5] S. Banach, Sur les opérations dans les ensembles abstraits et leur application aux équations intégrales, Fund. Math. 3 (1922), 133–181.

[6] J. A. Clarkson, Uniformly convex spaces, Trans. Amer. Math. Soc. 40 (1936), 396–414.

[7] M. S. Brodskii and D. Milman, On the center of a convex set, Dokl. Akad. Nauk SSSR 59 (1948), 837–840.

[8] A. Fernández-León and A. Nicolae, Best proximity pair results for relatively nonexpansive mappings in geodesic spaces, Numer. Funct. Anal. Optim. 35 (2014), 1399–1418.

[9] A. A. Eldred and P. Veeramani, Existence and convergence of best proximity points, J. Math. Anal. Appl. 323 (2006), 1001–1006.

[10] W. A. Kirk and W. D. Royalty, Fixed-point theorems for certain nonlinear nonexpansive mappings, Illinois J. Math. 15 (1971), 656–663.

[11] B. Abbas, Existence, uniqueness, and convergence of solutions for general monotone inclusions in Hilbert spaces, Homs University Journal,

2025.

[12] M. Gabeleh and H. P. Künzi, Condensing operators of integral type in Busemann reflexive convex spaces, Bull. Malays. Math. Sci. Soc. 43 (2020), 1971–1988.

[13] M. Gabeleh and P. R. Patle, Best proximity point (pair) results via MNC in Busemann convex metric spaces, Appl. Gen. Topol. 23 (2022), no. 2, 405–424.

[14] M. Gabeleh, M. Hassanvand, and M. Aphane, Optimal pair of fixed points of noncyclic Chatterjea–type mappings in Busemann convex spaces.

# تصميم وتنفيذ نموذج هجين قائم على جودة البيانات لدمج نظم المعلومات الإدارية في البيئات التعليمية الورقية: إطار مرحلي وخوارزمية لاتخاذ قرار الانتقال

د.إلهام القاسم

**الملخص**

تحلل هذه الدراسة آليات دمج نظم المعلومات الإدارية والتربوية في البيئات التعليمية التي لا تزال تعتمد على السجلات الورقية، وتقترح نموذجاً تكاملياً تدريجياً لا يُلغي الورق بل يتعامل معه بوصفه مصدراً قانونياً وتشغيلياً إلى أن تتحقق شروط نضج محددة. وبدلاً من الاكتفاء بإطار مفاهيمي، تنتقل الدراسة إلى التصميم والتنفيذ الحاسوبي الفعلي: إذ تُبنى منظومة تجريبية بلغة Python تتكوّن من خمس وحدات متسلسلة — مولّد بيانات مُحاكى (5000 سجل)، ومحرك لجودة البيانات يُقيّم خمسة أبعاد (الاكتمال، والدقة، والتوقيت، والإتاحة، والملاءمة)، ووحدة لاكتشاف الشذوذ تعتمد خوارزمية Isolation Forest ، وخوارزمية لاتخاذ قرار الانتقال المرحلي تُنتج مؤشراً كمياً للجاهزية الرقمية(Digital Readiness Score) ، ولوحة قيادة تُغذّي القرار. قيست الدراسة كمياً — قبل التنفيذ وبعده — سبعة مؤشرات: زمن إدخال البيانات، ونسبة الأخطاء، ونسبة البيانات المفقودة، ونسبة التكرار، وزمن إنتاج التقرير، وتكلفة التصحيح، وجودة البيانات الإجمالية. وأظهرت نتائج المحاكاة تحسناً في جميع المؤشرات السبعة، تراوح بين انخفاض بنسبة 37.8% في زمن الإدخال (معامل نمذجة افتراضي) و 80.1% في نسبة الأخطاء، مع ارتفاع جودة البيانات الإجمالية من 87.5 إلى 95.4 (+9.0%). وطبّقت خوارزمية القرار عتبات مقترحة استنباطياً، مقرونة بحدود دنيا

لأبعاد الجودة، على مؤشر جاهزية محسوب من بيانات محاكاة (DRS = 95.2 للنموذج الهجين)؛ وتبيّن أن DRS وحده لا يميّز بين النماذج الثلاثة بينما تميّزها الحدود الدنيا، وأن وحدة اكتشاف الشذوذ بلغت دقة 0.89 واستدعاءً 0.82 على الشذوذ المحقون. وهي نتائج إثبات جدوى لا قياسات ميدانية. وتخلص الدراسة إلى أن نجاح التحول يعتمد على التوازن بين الاستمرارية التشغيلية والتحول الرقمي، مع تعزيز الحوكمة واستخدام البيانات في دعم القرار. ويبقى التحقق الخبروي عبر أسلوب دلفي والاختبار الميداني الموسّع شرطاً للتعميم.

**الكلمات المفتاحية** :التحول الرقمي الهجين، نظم المعلومات الإدارية التعليمية(EMIS) ، جودة البيانات، محرك جودة البيانات، جزر العزل، مؤشر الجاهزية الرقمية، خوارزمية قرار الانتقال، الحوكمة المؤسسية، بحث علوم التصميم، البيئات الورقية، التحول غير المعطل.

**Abstract**

This study analyzes the mechanisms for integrating Management Information Systems (MIS) and Education Management Information Systems (EMIS) into educational environments that remain reliant on paper-based records. It proposes a gradual, integrative model that does not eliminate paper but treats it as a legal and operational source until specific digital maturity criteria are achieved. Moving beyond a purely conceptual framework, the study proceeds to computational design and implementation: a Python-based experimental system is built with five sequential modules — a synthetic dataset generator (5,000 records), a Data Quality Engine evaluating five dimensions (completeness, accuracy, timeliness, availability, relevance), an anomaly-detection module based on Isolation Forest, a transition decision algorithm producing a quantitative Digital Readiness Score, and a decision dashboard. Seven indicators were measured quantitatively before and after implementation: data-entry time, error rate, missing-data rate, duplication rate, report-generation time, correction cost, and overall data quality. Simulation results showed improvement across all seven indicators, ranging from a 37.8% reduction in entry time (an assumed modelling parameter) to an 80.1% reduction in error rate, with overall data quality rising

from 87.5 to 95.4 (+9.0%). The decision algorithm applied deductively proposed thresholds, combined with minimum per-dimension gates, to a readiness score computed from simulated data (DRS = 95.2 for the hybrid model); the score alone did not discriminate between the three models, whereas the gates did, and the anomaly-detection module reached a precision of 0.89 and a recall of 0.82 against injected anomalies. These are proof-of-concept results, not field measurements. The study concludes that successful transformation depends on balancing operational continuity with digital transformation, while strengthening governance and data-driven decision-making. Expert validation via the Delphi method and expanded field testing remain prerequisites for generalization.

**Keywords**: Hybrid Digital Transformation, Education Management Information Systems (EMIS), Data Quality, Data Quality Engine, Isolation Forest, Digital Readiness Score, Transition Decision Algorithm, Institutional Governance, Design Science Research, Paper-Based Environments, Non-Disruptive Transformation.

## 1. المقدمة

يمثل التحول الرقمي في النظم التعليمية أحد أبرز التحديات الاستراتيجية التي تواجه مؤسسات التعليم، إذ لم تعد نظم المعلومات أدوات دعم إدارية فحسب، بل عناصر جوهرية في تحسين جودة التعليم وكفاءة استخدام الموارد [1]. ويتأثر هذا التحول بسياقات مؤسسية وتقنية معقدة، لا سيما في البيئات التي ظلت تعتمد تاريخياً على النظم الورقية.

### 1.1 مشكلة البحث

تبرز فجوة بين الطموحات الرقمية للسياسات التعليمية والواقع التشغيلي، حيث تستمر الممارسات الورقية بسبب اعتبارات قانونية وإجرائية وثقافية، إضافة إلى ضعف البنية التحتية ونقص الكوادر وتدني جودة البيانات [2]، مما يُنتج "ازدواجية غير منظمة" بين النظامين تُضعف الكفاءة والموثوقية [3]، وتتفاقم في السياقات محدودة الموارد أو غير المستقرة تقنياً وتشريعياً [4]. وتتفاقم هذه المشكلة بسبب غياب آلية موضوعية للتحقق من جاهزية المؤسسة للانتقال بين مراحل التحول، ما يُنتج إما قفزات رقمية متعثرة، أو بقاءً في النموذج الورقي رغم إمكانية التحسين [16]. وهذا ما تتصدى له هذه الدراسة عبر تصميم نموذج هجين وتنفيذه حاسوبياً.

### 1.2 أسئلة البحث

1. ما التحديات الرئيسية أمام دمج نظم المعلومات في البيئات الورقية؟
2. ما مكونات نموذج هجين يحقق دمجاً تدريجياً غير معطل مع الحفاظ على جودة البيانات؟
3. ما معايير الانتقال المقترحة بين المراحل التي يُفترض أن تضمن النجاح دون تعطيل العمليات، وكيف يمكن التحقق من صلاحيتها قبل اعتمادها؟
4. كيف يمكن تصميم منظومة حاسوبية تُجسّد النموذج الهجين وتُتيح قياس أثره على جودة البيانات كمياً؟
5. ما مدى قدرة خوارزمية قرار الانتقال على إنتاج قرارات موضوعية بناءً على مؤشر الجاهزية الرقمية (DRS) وحدود دنيا لأبعاد الجودة؟

### 1.3 أهداف الدراسة

1. تحليل آليات الدمج في البيئات الورقية استناداً إلى أدلة موثقة من حالات دولية.
2. تطوير نموذج تكاملي تدريجي يتعامل مع الورق كمصدر قانوني مؤقت، ويُترجم إلى معمارية نظام قابلة للتنفيذ حاسوبياً.

3. بناء منظومة تجريبية بلغة Python تُجسّد الطبقات الأربع للنموذج، وتشمل محرك جودة بيانات، ووحدة اكتشاف شذوذ بخوارزميةIsolation Forest ، وخوارزمية قرار انتقال.
4. قياس سبعة مؤشرات كمية (زمن الإدخال، ونسبة الأخطاء، والبيانات المفقودة، والتكرار، وزمن إنتاج التقرير، وتكلفة التصحيح، وجودة البيانات) قبل التنفيذ وبعده.
5. مقارنة كمية بين ثلاثة نماذج (الورقي الخالص، والهجين، والرقمي الكامل) عبر مؤشر الجاهزية الرقمية (DRS) وحدود دنيا لأبعاد الجودة.
6. تقديم إطار مرحلي أولي قائم على جودة البيانات والحوكمة، مصحوب بخطة صريحة للتحقق الخبروي والاختبار التجريبي.

### 1.4 أهمية الدراسة

***نظرياً***، تسد الدراسة فجوة معرفية، إذ تندر الدراسات التي تناولت النماذج الهجينة كمسار انتقالي بديل عن الاستبدال الفوري أو الإلغاء التام للورق. ***تطبيقياً***، تقدم تصوراً أولياً قابلاً للتطوير للمؤسسات في الدول النامية والمتوسطة الدخل، يهدف إلى ضمان استمرارية العمليات وتجنّب تعطل القفزات التقنية غير المدروسة، على أن يخضع هذا التصور لتحقق خبروي واختبار تجريبي قبل اعتماده عملياً. ***تطبيقياً وحاسوبياً***، تقدم الدراسة — إضافة إلى الإطار المفاهيمي — منظومة تجريبية مفتوحة قابلة لإعادة التشغيل (Reproducible)تُتيح للمؤسسات اختبار منطق النموذج على بياناتها الخاصة قبل أي استثمار ميداني، وذلك عبر كود Python متاح كملحق إلكتروني. ***منهجياً***، تدمج التحليل النظري بدراسة حالات دولية، وتقدم إطاراً أولياً لتقييم جاهزية المؤسسات للانتقال بمؤشرات قابلة للقياس، مع الإقرار الصريح بأن هذه المؤشرات مقترحة استنباطياً وتحتاج تحققاً قبل اعتمادها كمعيار.

وفي جوهره، لا يقتصر إسهام هذه الدراسة على "اقتراح نظام هجين" — إذ إن الأدبيات تحوي إشارات عامة إلى النماذج الهجينة — بل يتمثل ابتكارها الأساسي في تحويل "الازدواجية غير المنظمة" بين الورق والرقمنة إلى "ازدواجية منضبطة وقابلة للقياس"، عبر آليتين متكاملتين لم تقدّمهما الأطر القائمة (SABER–EMIS، EMIS 2.0، OpenEMIS) بصورتهما الإجرائية: (1) بوابات انتقال رقمية صريحة مرتبطة بأبعاد جودة البيانات الخمسة، و(2) محرك حاسوبي ( Data Quality Engine + Transition Decision Algorithm) يُشغّل هذه البوابات ويُنتج مؤشر جاهزية رقمياً (DRS) قابلاً للاختبار وإعادة التشغيل. وبهذا ينتقل النموذج من مستوى "التشخيص والرؤية" إلى مستوى "القياس والقرار المرحلي".

### 1.5 حدود الدراسة

***جغرافياً***، تعتمد على أربع حالات دولية، ثلاث منها (فلسطين، والصومال، وتشاد) سياقات نزاع أو نزوح، وهو ما يحد من تمثيلها للحالة الأكثر شيوعاً عالمياً (بيئات ورقية مستقرة نسبياً لكن منخفضة الموارد)، دون التخصص لدولة بعينها. ***موضوعياً***، تركز على EMIS/SMIS دون الأنظمة الأكاديمية أو التعلم الإلكتروني. ***منهجياً***، تعتمد التحليل النوعي ومراجعة الأدبيات، مع الانتقال إلى التنفيذ الحاسوبي للتحقق من منطق النموذج كمياً، دون تطبيق ميداني. وتقتصر المخرجات الكمية (العتبات والمؤشرات) على كونها مقترحات استنباطية مطبَّقة في إثبات جدوى أولي على Dataset مُحاكى، مع تقديم خطة صريحة لدراسة تجريبية مستقبلية. ***حاسوبياً***، يُصرَّح بأن Dataset المستخدم مُحاكى (Synthetic) لا ميداني، وقد صُمِّم وفق أنماط الأخطاء الموثَّقة في الأدبيات. ولا يُغني هذا التنفيذ عن الاختبار الميداني، بل يُقدّم إثبات جدوى كمياً أولياً على قابلية النموذج للتنفيذ ومنطق أثره المتوقع.

ويجدر التنويه صراحةً إلى أن النموذج المقترح لم يُصمَّم لبيئات الأزمات والنزوح وحدها، بل يستهدف بنيته المرنة (الطبقات الأربع، وبوابات الانتقال القائمة على جودة البيانات، والجدول الزمني القابل للتكيف في الجدول (7)) تلبية احتياجات البيئات التعليمية المستقرة منخفضة الموارد بالقدر ذاته، إذ إن جوهر المشكلة — الازدواجية غير المنظمة بين الورق والرقمنة، وضعف جودة البيانات — مشترك بين السياقين وإن اختلفت شدته. غير أن غلبة سياقات النزاع في العينة الحالية تحول دون التحقق من هذا الادعاء إلا تجريبياً، ولذلك تُوصي الدراسة صراحةً (القسم 12.4) بأن تشمل المرحلة الرابعة من الخارطة البحثية اختبار النموذج في بيئات تعليمية مستقرة ذات بنية ورقية قبل أي تعميم عالمي.

ويُدعَّم هذا الادعاء بملاحظة تحليلية مستخلصة من الحالات نفسها: إن جوهر المشكلة الذي يعالجه النموذج — "الازدواجية غير المنظمة" بين الورق والرقمنة — ليس حكراً على سياقات النزاع، بل ينشأ في البيئات المستقرة منخفضة الموارد عن قواسم مشتركة بنيوية رصدتها الحالات الأربع جميعاً وإن اختلفت شدتها: (1) ضعف الكوادر المتخصصة في إدارة البيانات (جامايكا: غياب كوادر تحليل؛ تشاد: نقص تدريب المفتشين)، (2) محدودية الميزانية التي تدفع إلى الاعتماد على الورق كحل منخفض التكلفة (فلسطين: نقل عبء الإدخال إلى المديريات؛ جامايكا: أنظمة منفصلة قديمة)، (3) غياب المعايير الموحدة والمعرفات الفريدة (جامايكا: غياب معرفات موحدة؛ فلسطين: جزر بيانات)، و(4) ضعف التغذية الراجعة نحو المدرسة (الحالات الأربع). وهذه القواسم لا تعتمد على انعدام الأمن، بل على بنية مؤسسية واقتصادية مشتركة،

وهو ما يُسوّغ افتراض قابلية النقل — مع بقائه فرضية تحتاج تحققاً تجريبياً في بيئات مستقرة (المرحلة 4 من الخارطة البحثية، القسم 12.4

### 1.6 هيكل المقالة

تتناول الأقسام التالية الإطار النظري (القسم 2)، ثم المنهجية — بما فيها منهجية التنفيذ الحاسوبي (القسم 3، وتحديداً 3.9) — فتحليل الحالات الدولية (القسم 4)، فالنموذج الهجين المقترح (القسم 5)، فمراحل التنفيذ ومعايير الانتقال (القسم 6)، فالتطبيق التجريبي ومقاييس التقييم، بما فيه النتائج الكمية للتنفيذ الحاسوبي (القسم 7)، فالمناقشة (القسم 8)، فالتحليل الاقتصادي التوضيحي (القسم 9)، فإسهامات الدراسة (القسم 10)، وتختتم بالخاتمة (القسم 11) والتوصيات (القسم 12).

## 2. الإطار النظري ومراجعة الأدبيات

### 2.1 نظم المعلومات التعليمية

تُعرَّف نظم المعلومات التعليمية (EMIS) بأنها منظومة مؤسسية تضم الأشخاص والعمليات وقواعد البيانات والتقنيات، تهدف إلى إنتاج بيانات موثوقة تُستخدم في التخطيط التربوي وصياغة السياسات [5]، وتمتد من نظم إدارية عامة (MIS) إلى نظم متخصصة على مستوى المدرسة (SIS) تدير الحضور والدرجات والموارد [6]. ويؤكد إطار البنك الدولي SABER–EMIS على أربع حزم حاكمة للنجاح: البيئة التمكينية (تشريعات، موارد، حوكمة)، وسلامة النظام، وجودة البيانات، واستخدام البيانات في القرار [6]. وتُسهم هذه النظم في تحقيق الهدف الرابع للتنمية المستدامة عبر توفير بيانات لرصد الفجوات وتوجيه الاستثمار[1].

### 2.2 تحديات التطبيق في البيئات الورقية

تشير الدراسات والتقارير الميدانية إلى أن البيئات التعليمية الورقية تواجه تحديات تُعيق دمج نظم المعلومات الإدارية وتُضعف فعاليتها، ويمكن تصنيفها في أربعة محاور:

**أولاً، التحديات التشغيلية:** يستغرق نقل البيانات من السجلات الورقية إلى القواعد الرقمية وقتاً طويلاً ويزيد من أعباء الموظفين خاصة في غياب كوادر مخصصة للإدخال [8]، ويؤدي الإدخال اليدوي المتكرر إلى ارتفاع معدل الأخطاء البشرية في النسخ والترميز [9]، وتتأخر معالجة البيانات وإنتاج التقارير نتيجة الطبيعة التسلسلية للإدخال اليدوي، فتفقد المعلومات قيمتها الزمنية في دعم القرارات[10].

**ثانياً، التحديات الفنية والبنائية:** تعاني مؤسسات كثيرة من "جزر بيانات" معزولة تُخزَّن فيها البيانات في أنظمة أو أقسام متعددة لا تتواصل مع بعضها [11]، وتفتقر النماذج الورقية المصممة بمعزل عن الأنظمة الرقمية إلى التوافق مع معايير التبادل الإلكتروني، مما يستدعي إعادة تصميمها يدوياً ويرفع التكاليف [12]،

وفي كثير من السياقات النامية تعاني شبكات الاتصال من ضعف التغطية أو انقطاع الخدمة، مما يجعل الاعتماد الكلي على الأنظمة الرقمية محفوفاً بالمخاطر[ 4].

**ثالثاً، التحديات التنظيمية والبشرية:** تفتقر مؤسسات كثيرة إلى سياسات واضحة لإدارة السجلات الرقمية والاعتراف القانوني بها بديلاً عن الأصل الورقي، مما يُبقي الورق "المصدر الرسمي" الوحيد ويُضعف الثقة في البيانات الرقمية [13]، ويتخوف العاملون من فقدان السيطرة على سجلاتهم أو زيادة أعبائهم نتيجة أنظمة لا يتقنون استخدامها، فتتولد مقاومة غير معلنة للتحول [7]، ويعاني كثير من الموظفين من نقص المهارات الرقمية الأساسية، مما يحد من استفادتهم من النظم المعلوماتية في اتخاذ القرار[14].

**رابعاً، تحديات جودة البيانات:** تعاني السجلات الورقية غالباً من نقص البيانات أو حقول غير مملوءة يُضعف قيمتها التحليلية [2]، وتنتشر الأخطاء الكتابية والتناقضات نتيجة تعدد مصادر الإدخال وغياب آليات تحقق فورية [15]، وتُجمع البيانات الورقية في فترات متباعدة وتُعالج بعد تأخير كبير، فتفقد القدرة على عكس الواقع الراهن أو دعم القرارات الآنية[2].

### 2.3 النماذج الهجينة: المفهوم والمبررات

تُعرف النماذج الهجينة بأنها إطار تشغيلي يجمع بين السجلات الورقية والرقمية، حيث تظل الوثيقة الورقية مصدراً معتمداً إلى حين تحقق شروط نضج في البيانات والبنية التحتية والقدرات البشرية [9]، وتحوّل "الازدواجية غير المنظمة" إلى "ازدواجية منضبطة" تُستخدم كأداة انتقال مدروسة [16]. وتؤكد مواد اليونيسف أن الجمع الهجين يكون فعالاً إذا صاحبه تصميم دقيق للنماذج الورقية وتحقق آلي وتغذية راجعة دورية [9]، [16]. ويقوم هذا المنطق على رقمنة "البيانات الحرجة" تدريجياً بدلاً من رقمنة كل الوثائق دفعة واحدة، بما ينسجم مع توصيات اليونيسف بشأن التدرج التشغيلي [9] ورؤية البنك الدولي لتطور نظم بيانات التعليم [16]، وينسجم أيضاً مع فلسفة "التحول غير المعطل" في أدبيات إدارة التغيير المؤسسي.

### 2.4 جودة البيانات كشرط للنجاح

وضع معهد اليونسكو للإحصاء (UIS) خمسة أبعاد لجودة بيانات EMIS : الاكتمال، والملاءمة، والدقة، والتوقيت، والإتاحة [2]. وتُظهر الأدبيات أن جودة البيانات شرط لنجاح النظام لا نتيجة له، إذ فشلت مشاريع أهملت هذا الجانب رغم استثمارها التقني [4]، [16]. وتُعد هذه الأبعاد الخمسة قابلة للتحويل إلى مؤشرات أداء رئيسية يمكن أن تُستخدم كـ"بوابات قرار" للانتقال بين مراحل التحول [2]، غير أن الأدبيات المصدر لا تحدد عتبات رقمية جاهزة لهذه البوابات، وهو ما تتصدى له هذه الدراسة كمقترح أولي يخضع

للتحقق (القسم 6، والقسم 3.8). وقد ترجمت هذه الدراسة أبعاد الجودة الخمسة إلى محرك جودة بيانات قابل للتنفيذ حاسوبياً (القسم 3.9)، يُقيّم السجلات وفق مؤشرات قابلة للقياس، ويُنتج درجة جودة مُركّبة تُستخدم كمدخل لخوارزمية قرار الانتقال (القسم 7.5).

### 2.5 الحوكمة وإدارة التغيير

يعتمد نجاح نظم المعلومات على إطار حوكمة واضح يحدد الأدوار ويعزز المساءلة [6]، وتُعرَّف حوكمة البيانات بأنها سياسات وإجراءات تضمن إدارة منهجية شفافة وآمنة [18]. ويتسق هذا مع نموذج "الخطوط الثلاثة" الذي يوزّع مسؤوليات الرقابة على مستويات الإدارة التشغيلية والرقابة الداخلية والتدقيق المستقل [18]، وهو ما يمكن تكييفه في النظم الهجينة لتحديد السلطة المرجعية عند تعارض النسخة الورقية مع الرقمية، عبر نموذج حوكمة متعدد المستويات (استراتيجي، وتشغيلي، وتقني)[18].

### 2.6 أسس نظرية تكميلية

يستند النموذج المقترح، إضافة إلى أدبيات EMIS المتخصصة، إلى ثلاث نظريات مؤسِّسة في حقل نظم المعلومات تمنحه عمقاً نظرياً معترفاً به دولياً وتُسهّل تعميم منطقه على سياقات مؤسسية متنوعة تتجاوز قطاع التعليم. وخلافاً لإدراجها كخلفية عامة فقط، يُستعان بها لاحقاً بشكل مباشر في تفسير نتائج تحليل الحالات الأربع (القسم 8):

**1. إطار التكنولوجيا–المؤسسة–البيئة (TOE)** : يفسر هذا الإطار تبني الابتكارات التقنية عبر ثلاثة أبعاد متفاعلة: الخصائص التقنية للحل ذاته، والسياق المؤسسي (الموارد، والهيكل، وثقافة التغيير)، والسياق البيئي (السياسات، والضغوط التنظيمية، وتوافر البنية التحتية) [35]. ويتسق تصميم النموذج الهجين مع هذا الإطار إذ لا يتعامل مع التحول الرقمي بوصفه قراراً تقنياً بحتاً، بل يُدرج صراحة أبعاد الحوكمة المؤسسية (البُعد المؤسسي) ومرونة الجدول الزمني حسب السياق (البُعد البيئي) إلى جانب طبقات التكامل التقني.

**2. نظرية انتشار الابتكار (Diffusion of Innovation)** : تصنف هذه النظرية تبني الابتكار عبر مراحل متتالية (المعرفة، والإقناع، والقرار، والتطبيق، والتأكيد)، وتؤكد أن نسبة التبني تتأثر بالميزة النسبية للابتكار وتوافقه مع الممارسات القائمة وقابليته للتجربة على نطاق محدود قبل التعميم [36]. ويعكس تصميم "الإدخال المزدوج المحدود" والمراحل الخمس التدريجية في النموذج المقترح منطق "القابلية للتجربة " (Trialability) الذي تُبرزه هذه النظرية كعامل حاسم في تسريع التبني وتقليل مقاومة التغيير. كما تجسّد

المنظومة التجريبية المُنفَّذة (القسم 3.9) هذا المنطق عملياً، إذ تُتيح اختبار النموذج على نطاق محدود قبل التعميم.

**3. نموذج نجاح نظم المعلومات (DeLone & McLean IS Success Model)** : يربط هذا النموذج المُحدَّث بين جودة النظام وجودة المعلومات وجودة الخدمة من جهة، والاستخدام الفعلي ورضا المستخدمين والمنافع الصافية من جهة أخرى، مؤكداً أن جودة المعلومات (Information Quality) شرط سابق للاستخدام والرضا لا نتيجة لهما [37]. ويستعير النموذج المقترح هذا المنطق مباشرة عبر جعل "جودة البيانات" بوابة انتقال أساسية بين المراحل بدل الاكتفاء بمؤشرات الاستخدام التقني وحدها، وعبر ربط الطبقة الرابعة (التحليل واتخاذ القرار) بمنطق "المنافع الصافية" الذي يُترجم إلى قرارات تشغيلية فعلية لا تقارير مُهملة. وقد اتسق هذا المنطق مع نتائج المحاكاة (القسم 7.5)، حيث رافق ارتفاعَ جودة البيانات (من 87.54 إلى 95.42) تحسّنٌ في المؤشرات التشغيلية الأخرى، دون أن يُعدّ ذلك اختباراً سببياً.

وتتكامل هذه الأسس الثلاثة مع نظرية النظم الاجتماعية–التقنية [7] ونموذج الحوكمة متعدد المستويات [18] الواردين سابقاً، لتشكل معاً إطاراً نظرياً متعدد المستويات (تقني، وتنظيمي، وبيئي، ومعلوماتي) يُغطي أبعاد التحول الرقمي الهجين بشكل شامل، ويُوظَّف هذا الإطار الموحد لاحقاً في تفسير أنماط النجاح والفشل عبر الحالات الأربع (القسم 8).

### 2.7 الفجوة البحثية

تندر النماذج الهجينة المنهجية المتكاملة، ويضعف الربط بين مؤشرات جودة البيانات ومعايير الانتقال، ويغيب الإطار الزمني المرحلي الواضح، وتقل الدراسات التي تعالج السياقات الورقية الخالصة، وتفتقر الأدبيات إلى إطار منهجي لآليات التغذية الراجعة في السياقات الهجينة. غير أن هذه الفجوة الوصفية ليست الفجوة الوحيدة التي تعالجها الدراسة: فحتى الأطر القائمة( SABER–EMIS ، ودليل EMIS2.0 ) التي تشخّص هذه المشكلات لا تقدم آلية صريحة للتحقق من صحة أي عتبات كمية تُقترح لسد هذه الفجوة قبل اعتمادها ميدانياً. لذلك تتبنى هذه الدراسة فجوة بحثية ثلاثية: (1) غياب نموذج هجين منهجي متكامل يربط جودة البيانات بمعايير انتقال صريحة، (2) غياب مسار واضح للتحقق من صلاحية هذه المعايير قبل تعميمها، و(3) غياب تطبيق حاسوبي قابل لإعادة التشغيل يختبر منطق النموذج كمياً. وتعالج الدراسة هذه الفجوة الثلاثية عبر: تصميم نموذج مفاهيمي (القسم 5–6)، وتنفيذ حاسوبي للمنظومة يقيس أثره كمياً (القسم 3.9 و7.5)، وخطة تحقق خبروي صريحة (القسم 3.8)، وتصميم شبه تجريبي ميداني (القسم 7).

## 3. المنهجية

**الموقع المنهجي للدراسة** :تتموضع هذه الدراسة ضمن تقليد بحث علوم التصميم (Design Science Research — DSR)الذي يُقر بأن تطوير حل (Artifact) نظري متسق مع الأدبيات ومُختبر منطقياً عبر حالات واقعية يُمثل إسهاماً بحثياً مكتملاً بذاته، لا يشترط بالضرورة التطبيق الميداني الفوري لصحته أو قيمته العلمية [38]. ووفق منهجية Peffers وزملائه لبحث علوم التصميم (DSRM) بمراحلها الست (تحديد المشكلة، وتحديد الأهداف، والتصميم والتطوير، والعرض التوضيحي، والتقييم، والتواصل) [39]، تُنجز هذه الدراسة المراحل الأربع الأولى: تحديد المشكلة والفجوة البحثية (القسم 1–2)، وتحديد أهداف الحل (القسم 1)، وتصميم النموذج (القسم 5–6)، والعرض التوضيحي عبر تحليل توافقه مع أربع حالات واقعية موثقة (القسم 4)، إضافةً إلى التنفيذ الحاسوبي (القسم 3.9) الذي يُجسّد مرحلتي العرض التوضيحي والتقييم بشكل أولي. أما التقييم الرسمي الموسّع والتواصل الموسّع فتُحالان صراحة إلى خطة بحثية لاحقة موصوفة في القسم (3.8)، بما يجعل غياب التطبيق الميداني الحالي جزءاً من تسلسل منهجي مقصود لا نقصاً في التصميم البحثي.

### 3.1 المنهج المتبع

اعتمدت الدراسة منهجاً نوعياً تحليلياً في استقراء الأنماط والدروس من الحالات الأربع (القسم 4). أما العتبات الرقمية والمؤشرات الكمية الواردة لاحقاً في تصميم النموذج (الجداول 5، 6، 8، 9) فهي نتاج اشتقاق استنباطي (deductive) من الأدبيات المرجعية (وعلى رأسها أبعاد جودة بيانات UIS الخمسة[2]) وليست نتيجة تحليل إحصائي للبيانات النوعية نفسها. هذا التمييز جوهري: العتبات المقترحة تمثل فرضيات تشغيلية قابلة للاختبار (testable propositions) يجب أن تمر بجولتي تحقق قبل اعتمادها كمعيار: تحقق خبراتي عبر أسلوب دلفي (القسم 3.8)، ثم تحقق تجريبي عبر التصميم شبه التجريبي (القسم 7). لا ينبغي قراءتها في وضعها الحالي كنتائج مثبتة إحصائياً، وإن كانت قد خضعت لاختبار أولي عبر التنفيذ الحاسوبي (القسم 3.9).

### 3.2 مجتمع الدراسة وعينتها

تتمثل في التقارير والدراسات المنشورة حول EMIS في البيئات الورقية الصادرة عن منظمات دولية (اليونسكو، والبنك الدولي، واليونيسف، ومنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية) والمجلات العلمية المحكمة خلال 2015–2025. ويوضح الجدول (1) التالي معايير اختيار العينة:

**الجدول (1): معايير اختيار العينة**

| الوصف | المعيار |
|---|---|
| أن يتناول التقرير واقع نظم المعلومات التعليمية في سياقات ورقية أو تحديات التحول الرقمي في التعليم | الصلة الموضوعية |
| أن تمثل حالات من مناطق جغرافية مختلفة (الشرق الأوسط، وأفريقيا، وأمريكا اللاتينية) | التنوع الجغرافي |
| أن تشمل مستويات مختلفة (وزارة، ومديرية، ومدرسة) لالتقاط الأنماط الإدارية المتعددة | التنوع المؤسسي |
| أن تكون التقارير صادرة عن جهات رسمية موثوقة أو منشورة في مجلات محكمة | التوفر والموثوقية |

وبناءً على هذه المعايير، تكونت العينة من أربع حالات رئيسية: **فلسطين** (تعداد مدرسي في بيئة متعددة مقدمي الخدمة)[ 21]، **والصومال** (جمع بيانات في سياق صراع وعدم استقرار)[ 22]، **وتشاد** (نظام هجين في سياق نزوح)[ 23]، **وجامايكا** (أنظمة منفصلة في سياق مستقر نسبياً) [24]، اختيرت لتنوعها الجغرافي وتشابه تحدياتها وتوافر بيانات موثوقة عنها وتمثيلها لأنماط "ورق+رقم". واستُكملت بمراجعة منهجية لأكثر من 30 مصدراً علمياً وتقريراً رسمياً. ويُشار صراحة إلى أن ثلاثاً من الحالات الأربع (75%) تمثل سياقات نزاع أو نزوح، وهو ما يحدّ من تمثيل العينة للحالة الأكثر شيوعاً عالمياً (بيئات ورقية مستقرة نسبياً منخفضة الموارد دون نزاع)، هذا التحيز التمثيلي يُناقش صراحة كتهديد للصدق الخارجي في القسم 8.1.

### 3.3 أدوات جمع البيانات

اعتمد تحليل الوثائق [25] بشكلين: تحليل التقارير الرسمية لاستخلاص المعمارية التقنية وعبء العمل وتحديات الجودة والتغذية الراجعة، ومراجعة منهجية للأدبيات عبر قواعد Scopus و Web of Science و Google Scholar بكلمات مفتاحية مرتبطة بـ EMIS والنماذج الهجينة وجودة البيانات، للفترة 2015–2025، مع استبعاد الدراسات التي تناولت الأنظمة الرقمية الكاملة فقط.

### 3.4 إجراءات التحليل

استُخدم التحليل الموضوعي وفق خطوات براون وكلارك الست [26] (الإلمام بالبيانات، والترميز الأولي، والبحث عن الموضوعات، ومراجعتها، وتعريفها، وكتابة التقرير)، إلى جانب التحليل المقارن بين الحالات الأربع وفق المعمارية التقنية ومستوى الرقمنة وجودة البيانات وعبء العمل وآليات التغذية الراجعة.

### 3.5 الصدق والثبات

تحققت عبر التثليث المصدري ومراجعة الأقران والتتبع الاستقصائي الطويل (المصداقية)، والوصف الغني الكثيف (قابلية النقل)، وتوثيق خطوات البحث (الاعتمادية)، والفصل بين التفسير والبيانات الأولية (التأكيدية)[ 27].

### 3.6 الاعتبارات الأخلاقية

شملت الشفافية في الاستشهاد، والموضوعية دون تحيز جغرافي، وعدم التعامل مع بيانات شخصية حساسة كون المصادر تقارير منشورة، والإفصاح الواضح عن حدود الدراسة، ومناقشة القضايا الأخلاقية لخصوصية بيانات الطلاب لاحقاً (القسم 11).

### 3.7 حدود المنهجية

اعتماد على مصادر ثانوية دون بيانات ميدانية أولية، وعدد حالات محدود (أربع) لا يسمح بتعميم إحصائي وإن كان الهدف تقديم إطار قابل للتكيف، وعدم تطبيق ميداني للنموذج المقترح (وإن نُفِّذ حاسوبياً)، واحتمال تحيز في اختيار المصادر نحو الحالات الأكثر توثيقاً دولياً، إضافة إلى تحيز تمثيلي واضح نحو سياقات النزاع كما ذُكر في القسم 3.2.

### 3.8 استراتيجية التحقق من النموذج (خطة مرحلة التقييم اللاحقة)

بما أن النموذج المقترح لم يُطبَّق ميدانياً بعد، وبما أن عتباته الرقمية اشتُقت استنباطياً كما أُوضح أعلاه، تقترح الدراسة خطة تحقق صريحة ومنهجية قابلة للتنفيذ في مرحلة بحثية لاحقة، تسبق أي دراسة تجريبية (القسم 7) وتُكمّلها، عبر أسلوب دلفي (Delphi Method) المعتمد على نطاق واسع للتحقق من نماذج مفاهيمية غير مُختبرة ميدانياً قبل تطبيقها [40]. وبعد إتمام التنفيذ الحاسوبي (القسم 3.9)، طُبِّقت العتبات الرقمية الواردة في الجداول (5) و(6) و(8) في إثبات جدوى أولي على Dataset مُحاكى، لكنها تبقى بحاجة إلى تحقق خبروي عبر دلفي قبل اعتمادها معياراً، ثم إلى تحقق ميداني عبر الدراسة شبه التجريبية (القسم 7). وتتضمن الخطة المقترحة:

**تشكيل لوحة الخبراء** :اختيار 12–15 خبيراً يجمعون بين ثلاث فئات: مختصو نظم معلومات تعليمية عملوا في وزارات أو منظمات دولية (5–6 خبراء)، وأكاديميون في نظم المعلومات الإدارية وإدارة التغيير (4–5 خبراء)، وممارسون ميدانيون (مديرو مدارس، ومسؤولو تخطيط) من سياقات متنوعة (3–4 خبراء)، لضمان التوازن بين الصرامة الأكاديمية والواقعية التطبيقية.

**جولات التحقق** :جولتان إلى ثلاث جولات تقييم مجهولة الهوية(Anonymous Rounds) ، تُقيَّم فيها مكونات النموذج (الطبقات الأربع، ومراحل التنفيذ الخمس، وبوابات الانتقال وعتباتها الرقمية تحديداً، ومؤشرات الأداء) على مقياس ليكرت خماسي من حيث الوضوح والملاءمة والقابلية للتطبيق، مع فرصة لإضافة تعديلات نوعية بعد كل جولة.

**معايير التوافق** :(**Consensus Criteria**) اعتماد معامل اتفاق كندال (Kendall's W) أو المدى الربيعي (Interquartile Range — IQR) لقياس درجة توافق الخبراء، مع اعتبار العنصر "محل توافق" عند $IQR \leq 1$ على مقياس من خمس نقاط، وتوقف الجولات عند استقرار التوافق أو بعد ثلاث جولات كحد أقصى.

**المخرج المتوقع** :نسخة مُنقَّحة من النموذج، وتحديداً من عتباته الرقمية، معدَّلة وفق ملاحظات الخبراء، تُشكل الأساس المعتمد للدراسة التجريبية الموصوفة في القسم (7)، بما يضمن تسلسلاً منهجياً متكاملاً من التصميم النظري إلى التحقق الخبروي فالتجريب الميداني. العتبات الواردة في الجداول 5 و6 و8 من هذه الورقة تبقى، حتى إتمام هذه الخطوة، مقترحات أولية لا معايير معتمدة.

### 3.9 منهجية التنفيذ الحاسوبي(Computational Implementation Methodology)

**الموقع المنهجي** :استجابةً لمتطلبات التحقق التجريبي التي فُرضت على النموذج المفاهيمي، تتوسع هذه الدراسة من الإطار التصميمي إلى التنفيذ الحاسوبي الفعلي، عبر بناء منظومة تجريبية بلغة Python تُجسّد الطبقات الأربع للنموذج الهجين وتقيس أداءها كمياً. ويتموضع هذا التوسع ضمن المرحلة الثالثة من منهجية Peffers وزملائه لبحث علوم التصميم[39] (DSRM) ، وتحديداً مرحلتي العرض التوضيحي (Demonstration) والتقييم(Evaluation) اللتين تُنفَّذان في هذه الدراسة عبر المنظومة التجريبية المُوصوفة أدناه، بينما يبقى التقييم الميداني الموسّع ضمن خطة بحثية لاحقة (القسم 3.8)

**فلسفة التنفيذ** :لم يُصمَّم النظام التجريبي بوصفه نظام إنتاج جاهز للنشر، بل بوصفه أداة اختبار مضبوطة (Controlled Testbed)تُتيح قياس أثر النموذج الهجين على جودة البيانات وزمن العمليات وتكلفة

التصحيح، في بيئة يمكن التحكم في متغيراتها. وهذا ينسجم مع منطق "القابلية للتجربة (Trialability) " في نظرية انتشار الابتكار [36]، حيث يُختبر النموذج على نطاق محدود قبل التعميم.

**بنية النظام التجريبي** :يتكون النظام من خمس وحدات متسلسلة تُحاكي دورة حياة البيانات في النموذج الهجين، تسندها وحدة مساعدة للمحاكاة (hybrid_simulation.py) تُطبّق على السجلات نسب حلّ العيوب الافتراضية لكل نموذج:

1. **مولّد البيانات (Dataset Generator)** : يُنتج 5000 سجل مدرسي مُحاكى يحتوي على مشكلات واقعية موثّقة في الأدبيات [2]، [8]، [15]، تشمل: القيم المفقودة، والمعرفات المكررة، والأعمار غير المنطقية، والتواريخ المتناقضة، وأخطاء الإدخال، والسجلات المتأخرة، والسجلات الناقصة، والحضور المتطرف؛ ويحتفظ المولّد بالسجل المرجعي النظيف وبتسميات الشذوذ المحقون لأغراض التقييم. وتُصنَّف هذه المشكلات وفق أبعاد جودة البيانات الخمسة لمعهد اليونسكو للإحصاء[ 2].
2. **محرك جودة البيانات :(Data Quality Engine)** يُقيّم السجلات وفق خمسة أبعاد (الاكتمال، والدقة، والتوقيت، والإتاحة، والملاءمة) باستخدام مؤشرات قابلة للقياس، ويُنتج درجة لكل بُعد على مستوى السجل (نسبة السجلات التي تجتاز اختبار البُعد) ودرجة إجمالية هي متوسط الأبعاد الخمسة. ويستند تصميم هذا المحرك إلى إطار أبعاد جودة المعلومات في Batini & Scannapieco [45]، وإلى مؤشراتUIS . [2]
3. **وحدة اكتشاف الشذوذ :(Anomaly Detection Module)** تستخدم خوارزمية Isolation Forest [41]لرصد القيم الشاذة في السجلات (كالأعمار غير المنطقية والدرجات المتطرفة والتواريخ المتناقضة)، وتُصنّفها بحسب درجة الشذوذ( Anomaly (Score . ويُعتمد هذا النهج لأنه لا يفترض توزيعاً معروفاً للبيانات، وهو مناسب لبيانات السجلات المدرسية غير المتجانسة. ويُعدّ معامل 0.08 =) contamination) معامل ضبط لا نتيجة، وتُقيَّم نتائج الكشف بالدقة والاستدعاء مقابل الشذوذ المحقون.
4. **خوارزمية قرار الانتقال :(Transition Decision Algorithm)** تُنتج مؤشراً كمياً للجاهزية الرقمية( Digital Readiness Score — DRS ) يُدمج فيه أداء المؤسسة على أبعاد جودة البيانات الخمسة، وتُقارن قيمته بعتبات DRS المقترحة استنباطياً، مقرونة بحدود دنيا لأبعاد الجودة عند دخول المرحلتين 3 و5 (الجدول 6)؛ أما أوزان الأبعاد فافتراضية مقترحة تُختبر

حساسيتها (±5%). وتُعيد الخوارزمية أحد ثلاثة قرارات: الاستمرار في المرحلة الحالية، أو الانتقال إلى المرحلة التالية، أو التوقف وإعادة التقييم.

5. **لوحة القيادة :(Decision Dashboard)** تُنتج تقارير بصرية دورية تعرض مؤشرات جودة البيانات والقرارات المُقترحة، وتُحاكي الطبقة الرابعة في النموذج الهجين (التحليل واتخاذ القرار)، وتُنفَّذ في الملف dashboard.py.

**الأدوات المستخدمة:** نُفِّذ النظام بلغة Python ، مع الاعتماد على مكتبة Pandas لمعالجة البيانات [42]، ومكتبة Scikit-learn لتنفيذ Isolation Forest ومقاييس التقييم [43]، ومكتبة Matplotlib/Seaborn لإنتاج الرسوم البيانية. ويُتيح هذا الاختيار إمكانية إعادة تشغيل النظام في أي بيئة أكاديمية دون تكاليف ترخيص.

**مقاييس التقييم الكمية:** قيست سبعة مؤشرات قبل التنفيذ (النموذج الورقي الخالص) وبعده (النموذج الهجين المُنفَّذ): (1) زمن إدخال البيانات (بالثواني لكل سجل)، (2) نسبة الأخطاء (٪ من السجلات التي تحتوي خطأ واحداً على الأقل)، (3) نسبة البيانات المفقودة (٪ من الحقول الفارغة)، (4) نسبة التكرار (٪ من المعرفات المكررة)، (5) زمن إنتاج التقرير (بالدقائق)، (6) تكلفة التصحيح (بوحدات زمنية عمل)، (7) جودة البيانات الإجمالية (درجة مركّبة من 0 إلى 100). ويُحسب المؤشران (1) و(5) من معاملات نمذجة افتراضية (45 و28 و20 ثانية للسجل، و180 و95 و30 دقيقة للتقرير للنماذج الثلاثة على التوالي) لا من قياس مباشر، بينما تُحسب بقية المؤشرات من الكود. كما قيس مؤشر الجاهزية الرقمية (DRS) كمخرج لخوارزمية الانتقال، وقُورنت قيمته بالعتبات والحدود الدنيا المقترحة لاختبار سلوك الخوارزمية في اتخاذ قرارات الانتقال.

**الإفصاح المنهجي :**يُصرّح صراحةً بأن Dataset المستخدم مُحاكى (Synthetic) وليس بيانات ميدانية حقيقية، وذلك لأسباب تتعلق بحماية خصوصية بيانات الطلاب من جهة [27]، وبعدم توافر بيانات ميدانية مفتوحة من السياقات الأربع المدروسة من جهة أخرى. وقد صُمِّم المُحاكي وفق أنماط الأخطاء الموثّقة في تقارير اليونسكو والبنك الدولي واليونيسف [2]، [8]، [15]، [16]، بحيث تعكس الأرقام الناتجة أنماطاً واقعية لا قِيَماً اعتباطية. ويبقى التحقق الميداني شرطاً للتعميم، كما هو مُوضَّح في القسم 12.4.

**حدود التنفيذ الحاسوبي :**لا يُغني التنفيذ الحاسوبي عن الاختبار الميداني، إذ إن Dataset المُحاكى لا يلتقط التعقيدات المؤسسية والبشرية الكاملة للبيئات الورقية الحقيقية (كمقاومة التغيير، والضغوط السياسية، وتفاوت المهارات الرقمية). لكنه يُقدّم إثبات جدوى كمياً أولياً على أن منطق النموذج قابل للتنفيذ وأن آثاره

المتوقعة على جودة البيانات قابلة للقياس. ويُتيح الكود المصدري المُرفق كملحق إلكتروني (الملحق A) إعادة تشغيل المنظومة والتحقق المستقل من النتائج.

**إتاحة الكود المصدري** :يتضمن الكود المصدري عدة ملفات بلغةPython :(1) مولّد البيانات المُحاكى dataset_generator.py، (2) محرك جودة البيانات dq_engine.py، (3) وحدة اكتشاف الشذوذ anomaly_detector.py، (4) خوارزمية قرار الانتقال transition_algorithm.py، (5) وحدة المحاكاة hybrid_simulation.py، (6)ملف التشغيل run_all.py، (7)لوحة القيادة dashboard.py (في الملحق الإلكتروني).

## 4. تحليل دراسات الحالة

يعرض هذا القسم أربع حالات دولية التُقطت منها أنماط فنية وإدارية متكررة لبناء النموذج المقترح، دون أن تمثل هذه الحالات توصية جغرافية بعينها، ومع الأخذ بعين الاعتبار تحيزها نحو سياقات النزاع كما أُشير سابقاً.

### 4.1 فلسطين[21]

تُعد فلسطين حالة فريدة من حيث تعدد مقدمي الخدمات التعليمية، إذ تتداخل مسؤوليات التعليم بين السلطة الوطنية والأونروا والمؤسسات الخاصة، مما يُنتج بيئة معلوماتية مجزأة تفتقر إلى التنسيق المركزي الكامل. يعتمد نظام "التعداد المدرسي" على استبيانات ورقية سنوية تتضمن بيانات الطلاب والمعلمين والفصول، مع منح المدارس خيار الإدخال عبر ملف Excel كبديل، تُجمع عبر المديريات وتُدمج وتُنظف في قاعدة Microsoft Access، وتُصدر سنوياً في كتاب إحصائي يُستخدم للتخطيط المركزي. يتم التكامل عبر سلسلة إدارية (مدرسة ← مديرية ← مركز) دون ربط آلي مباشر، وتوجد نظم محوسبة معزولة خاصة بمناطق بعينها تحتاج طبقة تكامل لتجنب "جزر البيانات"، ولا يوجد ربط أفقي مع أنظمة الحضور أو الامتحانات. ويُقلل إبقاء الورق قناة رئيسية من مقاومة التغيير لكنه ينقل عبء العمل إلى المديريات.

**أبرز الدروس** :المرونة عبر Excel لا تحل مشكلة الثقل الكتابي الناتج عن تعدد النماذج، وغياب وصول المدارس لبياناتها المرتدة يُضعف حافز تحسين الجودة، مما يؤكد الحاجة إلى حد أدنى من التغذية الراجعة كلوحات مؤشرات مبسطة.

### 4.2 الصومال[22]

يعاني النظام التعليمي الصومالي من تحديات استثنائية نتيجة عقود من الصراع والنزوح الداخلي، أدت إلى تشتت البيانات وضعف القدرة على جمعها. طورت وزارة التعليم بالتعاون مع البنك الدولي واليونيسف نظاماً

هجيناً يعتمد على فرق ميدانية مدربة تجمع البيانات عبر استبيانات ورقية مرمّزة، مع خيار الإرسال عبر SMSفي مناطق التغطية، ثم تُنقل الاستبيانات إلى مراكز إقليمية للإدخال الرقمي قبل إرسالها إلى مقديشو للتنقية والتحليل. وبسبب عدم الاستقرار الأمني قد تتعطل عمليات الجمع لشهور، وتُعد تكلفة الدورة الواحدة للتعداد من الأعلى نسبياً في المنطقة [15] بسبب الحاجة إلى فرق ميدانية كبيرة وتكاليف نقل وأمن. في المناطق المستقرة جُرِّبت أجهزة لوحية محمولة كمرحلة انتقالية لكن توزيعها كان محدوداً.

**أبرز الدروس** :التأخر يُفقد البيانات قيمتها التشغيلية في دعم قرارات مثل توزيع المعلمين، ويستلزم التنوع السياقي خيارات متعددة لجمع البيانات (ورق، وSMS، وأجهزة محمولة)، وتُعد التكاليف التشغيلية عاملاً حاسماً في التخطيط للتوسع.

### 4.3 تشاد[23]

تعاني تشاد من ضعف البنية التحتية التعليمية نتيجة تداعيات الصراعات والنزوح المتكرر، ما يجعل جمع البيانات عملية شاقة. يعتمد النموذج الأساسي على استبيان ورقي موحد يوزَّع عبر المفتشين التربويين، مع دعم رقمي محدود عبر أقراص أو وحدات USB في الولايات المستقرة نسبياً لتجنب مشكلات الاتصال، ثم تُنقل البيانات إلى المركز الوطني للإحصاء للمعالجة السنوية. التحديات الرئيسية: ضعف الاتصال بين المديريات يُطيل دورة الإنتاج المعلوماتي، وتتعدد مصادر الأخطاء من تعبئة الاستبيان إلى النقل المادي إلى الإدخال الرقمي، ولا توجد آلية تدقيق ميدانية مستقلة.

**أبرز الدروس** :يُعد النقل المادي للاستبيانات نقطة ضعف رئيسية يجب تقليل الاعتماد عليها، ويلزم التدريب المستمر للمفتشين على معايير الجودة، ويبقى التدقيق العيني على عينة محدودة أداة لا غنى عنها.

### 4.4 جامايكا[24]

بخلاف الحالات السابقة، يعمل النظام التعليمي الجامايكي في سياق مستقر نسبياً لكنه يعاني تقادم النظم الورقية وضعف التكامل. توجد أنظمة منفصلة لإدارة الطلاب والموارد البشرية والمالية والامتحانات تعمل كل منها بمعزل عن الأخرى، وتُجمع البيانات عبر نماذج ورقية من المدارس ثم تُدخل في أنظمة مختلفة على مستوى المديريات، وتم تطوير قاعدة بيانات مركزية لتجميع البيانات لكن الربط بينها يبقى ضعيفاً بسبب غياب معايير موحدة. التحديات الرئيسية: "جزر البيانات" المتفرقة تعيق الرؤية الشاملة، وغياب معرفات موحدة للطلاب والمعلمين والمدارس يُسبب تكراراً وأخطاء ربط، ويُستخدم قدر محدود من البيانات في التحليلات مقارنة بالتقارير السنوية الروتينية، ويفتقر النظام إلى كوادر متخصصة في تحليل البيانات.

**أبرز الدروس** :التوحيد شرط أساسي لأي تكامل بين الأنظمة، ويُفضَّل بناء طبقة تكامل تربط الأنظمة القائمة بدل استبدالها، والاستثمار في الكوادر البشرية لا يقل أهمية عن الاستثمار التقني.

يوضح الجدول (2) مقارنة الحالات الأربع وفق سبعة أبعاد رئيسية.

**الجدول (2): التحليل المقارن لدراسات الحالة الأربع**

| البعد | فلسطين | الصومال | تشاد | جامايكا |
|---|---|---|---|---|
| السياق | صراع/ تعدد جهات | صراع/ نزوح | صراع/ نزوح | مستقر/ تقادم نظمي |
| المعمارية | اختياري Excel + ورق | SMS + ورق اختياري | USB + ورق | أنظمة منفصلة + ورق |
| التكامل | غير مباشر (سلسلة إدارية) | غير مباشر (مركزي) | غير مباشر (مركزي) | ضعيف / جزر بيانات |
| جودة البيانات | متوسطة / فجوات | متباينة / ضعيفة | متوسطة / أخطاء نقل | ضعيفة / عدم توحيد |
| التغذية الراجعة | غائبة تقريباً | غائبة | غائبة | محدودة |
| عبء العمل | مرتفع (مديريات) | مرتفع (فرق ميدانية) | مرتفع (مفتشون) | مرتفع (إدخال متعدد) |
| التكلفة | مرتفعة تشغيلياً | مرتفعة جداً | مرتفعة | مرتفعة (تكامل) |

تتشابه الحالات الأربع في مركزية معالجة البيانات وتأخر إنتاج المعلومات، وضعف التكامل الأفقي بين الأنظمة الفرعية، وغياب فعلي للتغذية الراجعة نحو المدرسة، والاعتماد على إدخال يدوي متكرر يرفع الأخطاء وعبء العمل، مما يؤكد أن المشكلة تكمن في دورة حياة البيانات كاملة لا في الجمع فقط. ومع ذلك، ونظراً لكون ثلاث من الحالات الأربع تنتمي لسياقات نزاع، فإن هذا التشابه قد يعكس جزئياً خصوصية سياق الأزمات أكثر مما يعكس نمطاً عاماً للبيئات الورقية المستقرة، هذا التحفظ يُؤخذ بعين الاعتبار عند صياغة الدروس أدناه.

**الدروس المستخلصة لبناء النموذج** :النماذج الهجينة ضرورة مرحلية لا حالة دائمة، وتصميم النماذج الورقية( وضوح الحقول، والترميز وفق [13] ISO15489 ) يؤثر مباشرة في جودة البيانات الرقمية، وغياب التغذية الراجعة يُضعف النظام بأكمله ويحوّل البيانات إلى "التزام إداري" لا "أداة تحسين"، والمعرفات الموحدة شرط أساسي لتقليل التكرار وتمكين التحليلات [2]، ويلزم التوازن بين جودة البيانات وعبء العمل عبر مبدأ "الإدخال مرة واحدة"، والتكامل التدريجي عبر "طبقة تكامل" أفضل من القفزة المفاجئة [16]، وتحدد الكفاءة التشغيلية مصير استمرارية النموذج الهجين اقتصادياً. هذه الدروس استقرائية (inductive) مستمدة من أربع حالات فقط، وتبقى فرضيات عمل توجّه تصميم النموذج التالي أكثر من كونها استنتاجات قابلة للتعميم إحصائياً. وقد استُخلصت من هذه الحالات الدروس التي بُني عليها النموذج المقترح (القسم 5)، ثم تُرجمت إلى منظومة تجريبية قابلة للتنفيذ حاسوبياً (القسم 3.9) لقياس أثرها كمياً (القسم 7.5).

## 5. النموذج الهجين المقترح: إطار مفاهيمي وتنفيذ حاسوبي

### 5.1 فلسفة النموذج

يقوم النموذج على ثلاث ركائز: البيانات هي الأصل بصرف النظر عن الوسيط الحامل لها، فيُركز النموذج على تحسين جودتها من منبعها الورقي قبل الرقمنة [2]، والتحول تدريجي لا قطعي يحوّل الازدواجية غير المنظمة إلى ازدواجية منضبطة [9]، والنجاح مرهون بجودة البيانات والحوكمة عبر بوابات انتقال تستند إلى معايير مقترحة لا معايير مُثبتة بعد [6]. ويهدف النموذج إلى تجنب "فشل القفزة الرقمية" الناتج عن فرض أنظمة متكاملة على بيئات غير مهيأة، مع التأكيد أن كل عنصر كمي فيما يلي مرشّح للمراجعة عبر خطة التحقق (القسم 3.8)، وقد طُبِّق في إثبات جدوى حاسوبي أولي (القسم 3.9).

### 5.2 المكونات الهيكلية (طبقات أربع)

**الطبقة الأولى — المدخلات الفيزيائية** :تشمل دفاتر الحضور وسجلات الدرجات وملفات الطلاب واستبيانات التعداد. تُعاد صياغتها وفق مبادئ[13] ISO 15489 ، بترميز موحد/QR) باركود (يربطها بالقاعدة الرقمية، وتوحيد للحقول متوافق مع معايير مثل Ed−Fi و[12] OneRoster، مع تبسيطها لتقليل عبء العمل.

**الطبقة الثانية — التكامل الرقمي**" :منطقة عازلة" تحوّل البيانات الورقية إلى رقمية قابلة للتبادل دون إلغاء الوثيقة الورقية كمصدر رسمي، عبر واجهة إدخال مبسطة، ومعايير تبادل[12] (Ed−Fi/OneRoster) ،

وقاعدة بيانات مؤقتة، وآليات تحقق آلية تمنع تناقض القيم (مثل تسلسل التواريخ ومنع تكرار المعرفات). يركز النموذج على رقمنة البيانات لا كل الوثائق، ويبدأ التكامل بعدد محدود من العمليات ثم يتوسع تدريجياً.

**الطبقة الثالثة — الحوكمة والتدقيق** :تضم سياسات جودة البيانات عبر مؤشري نضج واستخدام البيانات [2]، وآليات تدقيق عيني دوري وتدقيق آلي مستمر [8]، وإدارة معرفات فريدة موحدة تصدر مركزياً، وآليات تغذية راجعة (لوحات مؤشرات مبسطة، وتقارير دورية موجزة، وقنوات اتصال مباشرة مع المدارس). وتُوظَّف فيها خوارزمية Isolation Forest [41] لاكتشاف الشذوذ في السجلات.

**الطبقة الرابعة — التحليل واتخاذ القرار** :تشمل لوحات مؤشرات تفاعلية، وتقارير دورية آلية، وأنظمة إنذار مبكر للتسرب، ومنصة بيانات مفتوحة مع مراعاة الخصوصية. تربط التقارير مباشرة بقرارات تشغيلية تحقيقاً للانتقال من "نظام تقرير" إلى "رافعة قرار" [16]، مع تدرج في التعقيد وتغذية راجعة مزدوجة الاتجاه.

وقد جُسّدت هذه الطبقات الأربع في منظومة تجريبية بلغة Python (القسم 3.9)، تُتيح اختبار منطق النموذج وقياس أثره على جودة البيانات قبل التطبيق الميداني.

### 5.2.1 توضيح المفاهيم التقنية الأساسية

**معايير التبادل المفتوحة Ed-Fi و OneRoster**: هي مواصفات فنية معتمدة دولياً تحدّد أسماء الحقول وأنواع البيانات وطريقة ترميزها، بحيث يمكن لأي نظامين مختلفين (كنظام حضور ونظام درجات) أن يتبادلا البيانات آلياً دون تدخل بشري. فعلى سبيل المثال، يضمن معيار OneRoster أن حقل (رقم الطالب) يُسمّى ويُرمَّز بالطريقة نفسها في كل الأنظمة، فلا يحتاج الموظف إلى إدخال الاسم مرتين بصيغتين مختلفتين. أما Ed-Fi فيوسّع هذا المنطق ليشمل بيانات المعلمين والمدارس والنتائج، ويعمل بمثابة (لغة مشتركة) بين الأنظمة. واعتماد هذين المعيارين في الطبقة الأولى (تصميم النماذج الورقية) والطبقة الثانية (الإدخال الرقمي) هو ما يمنع ظهور "جزر البيانات" التي رصدتها حالات جامايكا وفلسطين.

**طبقة التكامل (Integration Layer) كمنطقة عازلة** :المقصود بها برمجياً طبقة وسيطة تقع بين الوثيقة الورقية والنظام الرقمي المركزي، ولا تُلغي أيّاً منهما. تعمل هذه الطبقة عبر ثلاث وظائف: (1) واجهة إدخال مبسطة تُتيح للموظف إدخال البيانات الورقية في نموذج رقمي محدود الحقول؛ (2) آليات تحقق آلية فورية تمنع تناقض القيم (كتاريخ ميلاد لاحق لتاريخ التسجيل، أو تكرار معرف طالب) وتُنبّه الموظف قبل الحفظ؛ (3) قاعدة بيانات مؤقتة (Staging Database) تُخزّن البيانات المدخلة قبل ترحيلها إلى النظام المركزي، بحيث يمكن مراجعتها وتصحيحها دون المساس بالسجل الرسمي. وتُوصف هذه الطبقة بـ "العازلة" لأنها تحمي النظام المركزي من الأخطاء البشرية ومن البيانات غير المكتملة، وتتيح في الوقت ذاته الرجوع

إلى الورق كمصدر قانوني عند أي تعارض– وهو ما يحوّل "الازدواجية غير المنظمة" إلى "ازدواجية منضبطة."

### 5.3 آلية عمل النموذج

تعمل الطبقات في دورة متكاملة: إنتاج سجلات ورقية موحدة (الطبقة الأولى) ← نقلها رقمياً مع تحقق فوري (طبقة التكامل) ← تنقيتها وربط معرفاتها (طبقة الحوكمة) ← تحليلها وإصدار تغذية راجعة للمدارس (طبقة التحليل) ← استخدام هذه التغذية لتحسين النماذج والتدريب ومعايير الجودة. تتكرر هذه الدورة دورياً مع تحسن تدريجي يهيئ المؤسسة للانتقال بين المراحل.

### 5.4 إدارة المخاطر

يلخص الجدول (3) أبرز المخاطر التي قد تُهدد نجاح النموذج الهجين وآليات التخفيف المقابلة لها.

**الجدول (3): المخاطر الرئيسية في النموذج الهجين وآليات التخفيف**

| الخطر | الوصف | آلية التخفيف |
|---|---|---|
| تضارب البيانات بين الورق والنظام | اختلاف المعلومات المسجلة ورقياً عن المدخلة رقمياً | تحقق آلي مستمر (مطابقة مع النسخة الممسوحة ضوئياً) وتنبيهات قبل الاعتماد |
| فقدان البيانات أثناء النقل | فقدان الاستبيانات الورقية أو تلف الملفات الرقمية | نسخ احتياطي منتظم ولحظي، ونسخ احتياطية ورقية، وقنوات نقل آمنة |
| الاعتماد المفرط على الإدخال اليدوي | زيادة الأخطاء البشرية وتراجع الكفاءة نتيجة كثافة الإدخال | توزيع حمل الإدخال على مستويات متعددة، ومبدأ "الإدخال مرة واحدة"، وأدوات مسح ضوئي ذكية |

| الخطر | الوصف | آلية التخفيف |
|---|---|---|
| مقاومة التغيير | تخوف الموظفين من النظام الجديد أو زيادة أعبائهم | إشراك المستخدمين في التصميم، وتدريب مستمر، وإظهار الفوائد مبكراً |
| ضعف جودة البيانات الورقية | عدم اكتمال الحقول أو أخطاء كتابية أو تلف السجلات | إعادة تصميم النماذج وفق معايير واضحة، وتدريب القائمين على التعبئة، وتدقيق عيني قبل الإدخال |
| عدم التوافق التقني | عجز الأنظمة عن تبادل البيانات لاختلاف المعايير | اعتماد معايير مفتوحة(Ed-Fi ، و OneRoster) وبناء طبقة تكامل |
| تكاليف تشغيلية مرتفعة | استمرار النموذج الهجين طويلاً دون تحسين كفاءة العمليات | مؤشرات دورية لقياس الكفاءة، وسقف زمني لمرحلة الهجين قبل الانتقال |

### 5.5 دور الذكاء الاصطناعي

نُفِّذت خوارزمية Isolation Forest [41] لاكتشاف الشذوذ في السجلات المدرسية، وعلّمت المنظومة 400 سجل (8.00%) من أصل 5000 سجل بحسب معامل الضبط contamination = 0.08 (وهو سقف مضبوط مسبقاً لا نتيجة). وبمقارنتها بالشذوذ المحقون في المولّد (434 سجلاً: أعمار غير منطقية 150، ودرجات خارج النطاق 75، وتواريخ قيد متناقضة 125، وحضور متطرف 100، مع تداخل بين بعضها) بلغت الدقة 0.89 والاستدعاء 0.82 و0.85 = F1. ويستند الأساس النظري لهذه الخوارزمية إلى عمل Liu وزملائه [41]، وقد أُختيرت لأنها لا تفترض توزيعاً معروفاً للبيانات، وهو ما يناسب السجلات المدرسية غير المتجانسة.

### 5.6 موقع النموذج بين الأطر القائمة (الإسهام الفريد)

لتوضيح الإضافة العلمية للنموذج المقترح مقارنة بالأطر الدولية القائمة، يُقدم الجدول (4) مقارنة منهجية عبر ستة أبعاد.

**الجدول (4): مقارنة النموذج المقترح بالأطر الدولية القائمة**

| البُعد | SABER-EMIS [6] | EMIS 2.0 [16] | OpenEMIS [14] | النموذج الهجين المقترح |
|---|---|---|---|---|
| طبيعة الإطار | أداة تقييم وتشخيص شامل | رؤية استراتيجية عامة | حل برمجي مفتوح المصدر | نموذج تشغيلي مرحلي قابل للتنفيذ |
| معالجة الازدواجية الورقية–الرقمية | غير مباشرة | إشارة عامة دون تفصيل إجرائي | لا تتناولها | محور مركزي بمراحل وبوابات محددة |
| معايير الانتقال بين المراحل | غير محددة كمياً | غير محددة | غير منطبق | عتبات مقترحة استنباطياً، مرتبطة بأبعاد جودة البيانات الخمسة، ومُختبرة أولياً حاسوبياً |
| الإطار الزمني التنفيذي | غير محدد | غير محدد | غير منطبق | مرجعي (12–24 شهراً) مع مرونة سياقية |
| آلية التحقق قبل التطبيق | غير منصوص عليها | غير منصوص عليها | غير منطبق | خطة دلفي صريحة (القسم 3.8) قبل أي اعتماد ميداني |
| التنفيذ الحاسوبي | غير منطبق | غير منطبق | حل برمجي كامل (لكن غير مرتبط بنموذج انتقالي) | منظومة تجريبية مُنفَّذة بلغة Pythonقابلة لإعادة التشغيل |

يتضح من المقارنة أن الأطر القائمة تقدم تشخيصاً شاملاً (SABER-EMIS) أو رؤية استراتيجية عامة (EMIS 2.0)أو حلاً تقنياً جاهزاً(OpenEMIS) ، لكنها لا تقدم مساراً إجرائياً مرحلياً يُترجم هذه الرؤى

إلى خطوات تنفيذية بمعايير انتقال، ولا تُتيح اختباراً حاسوبياً قابلاً لإعادة التشغيل. وهذا يمثل الإسهام الفريد لهذا النموذج: تجسير الفجوة بين "ماذا ينبغي أن يتحقق" (الأطر القائمة) و"كيف يُنفَّذ تدريجياً دون تعطيل" (النموذج المقترح)، مع تقديم منظومة تجريبية للتحقق الكمي — على أن يبقى هذا الإسهام في طور المقترح المفاهيمي إلى حين تحققه خبروياً وتجريبياً.

**6. مراحل التنفيذ ومعايير الانتقال المقترحة**

**ملحوظة منهجية** :كما ذكرنا سابقاً فإن جميع المدد والعتبات الرقمية الواردة في هذا القسم (الجداول 5، 6، 7) هي قيم مرجعية مقترحة استنباطياً من الأدبيات ومن الدروس الاستقرائية للحالات الأربع، وليست معايير مُختبرة إحصائياً. وقد طُبِّقت في إثبات جدوى حاسوبي أولي (القسم 7.5).

يستند الجدول الزمني المرجعي (12–24 شهراً) إلى الدروس المستفادة من دراسات الحالة التي أظهرت أن الفترات القصيرة جداً تُفشل التنفيذ بينما الطويلة جداً تُفقد الزخم [16]. ويُقسم التنفيذ إلى خمس مراحل رئيسية يوضحها الجدول(5) .

**الجدول (5): مراحل التنفيذ المرجعية للنموذج الهجين**

| # | المرحلة | المدة المرجعية | الهدف العملي | أبرز مؤشرات الأداء |
|---|---|---|---|---|
| 1 | التهيئة والحوكمة | 4–8أسابيع | تثبيت تعريف "الورق مرجع" وبناء لجنة حوكمة وقاموس بيانات وسياسة إدارة سجلات وفق ISO 15489 | اكتمال جرد السجلات 100% |
| 2 | رقمنة الملفات الرئيسية | 2–3أشهر | إنشاء معرفات فريدة وترميز إداري وقواعد تحقق أساسية | تكرار معرفات ≤1% (مقترح)، اكتمال سجلات الملفات الرئيسية |

| # | المرحلة | المدة المرجعية | الهدف العملي | أبرز مؤشرات الأداء |
|---|---|---|---|---|
| | | | | المرقمنة ≥98% (مقترح) |
| 3 | إدخال مزدوج محدود للمعاملات | 4–3أشهر | إدخال رقمي موازٍ للحضور والنتائج الدورية مع تدقيق عيني | اكتمال ≥90%، دقة ≥95% (على كامل السجلات المُدخلة) |
| 4 | التكامل والتحليلات الأولية | 6–3أشهر | إنتاج لوحات متابعة وتقارير تحليلية للمدرسة والمديرية | خفض زمن إصدار التقرير الرئيسي ≤30% (مقترح) |
| 5 | التوسع والتحول الانتقائي | 12–6شهراً | توسيع الرقمنة للعمليات الأكثر نضجاً | اكتمال ودقة ≥98% (مقترح)، توقيت ≥95% (مقترح) |

أبرز مخاطر المرحلة الأولى تضخم المتطلبات، فيُقترح الالتزام بحد أدنى من المؤشرات "ذات القرار"، وفي المرحلة الثانية يُقترح اشتراط تدريب ≤80% من الكوادر قبل الانتقال (قيمة مقترحة تخضع أيضاً للتحقق). تُحدَّد بوابات انتقال بين كل مرحلتين متتاليتين استناداً إلى أبعاد جودة البيانات الخمسة التي وضعها معهد اليونسكو للإحصاء [2]، ويوضح الجدول (6) طريقة قياسها والقيم المرجعية المقترحة للانتقال، مع القيم المحققة في التنفيذ الحاسوبي.

**الجدول (6): أبعاد جودة البيانات ومؤشرات قياسها كمعايير انتقال**

| البعد | طريقة القياس في النموذج | القيمة المرجعية للانتقال | القيمة المحققة في التنفيذ الحاسوبي (النموذج الهجين) |
|---|---|---|---|
| الاكتمال (Completeness) | نسبة السجلات الخالية من أي حقل فارغ | ≥90%(مرحلة 3) / ≥98% (مرحلة 5) — مقترح | 93.5% (يستوفي حد المرحلة 3) |
| الدقة(Accuracy) | تدقيق عيني ومقارنة القيم الرقمية بالورقية؛ ويُستعاض عنه في المحاكاة بقواعد صلاحية آلية | ≥95%(مرحلة 3) / ≥98% (مرحلة 5) — مقترح | 97.4% (يستوفي حد المرحلة 3) |

| البعد | طريقة القياس في النموذج | القيمة المرجعية للانتقال | القيمة المحققة في التنفيذ الحاسوبي (النموذج الهجين) |
|---|---|---|---|
| التوقيت (Timeliness) | نسبة السجلات المدخلة خلال المدة المحددة (موعد المحاكاة: 15 فبراير 2024) | ≥95% / ≥85%(مرحلة 3) (مرحلة 5) — مقترح | 90.5% (يستوفي حد المرحلة 3) |
| الإتاحة (Availability) | متوسط زمن استرجاع تقرير معين؛ ويُستعاض عنه في المحاكاة بنسبة السجلات ذات المعرّف الفريد والحقول التعريفية الكاملة | أقل من 30% من مدة المرحلة السابقة — مقترح | 99.1% (مؤشر بديل في المحاكاة) |
| الملاءمة (Relevance) | عدد القرارات التشغيلية المدعومة بالتقارير؛ ويُستعاض عنه في المحاكاة بنسبة السجلات الداعمة لمؤشر قراري | وجود أدلة استخدام فعلي (مرحلة 5) — مقترح | 96.5% (مؤشر بديل في المحاكاة) |

يبقى الجدول الزمني المقترح (12–24 شهراً) مرجعاً مرناً لا جدولاً جامداً، إذ تختلف المدة الفعلية بحسب عوامل سياقية يلخصها الجدول.(7)

**الجدول (7): العوامل المؤثرة في مرونة الجدول الزمني وإجراءات التكيف**

| إجراءات التكيف المقترحة | تأثيره على المدة الزمنية | العامل المؤثر |
|---|---|---|
| تقسيم التنفيذ إلى وحدات أصغر (مديريات/مناطق) مع تنفيذ موازٍ | المؤسسات الكبيرة (وزارات، مديريات متعددة) تحتاج وقتاً أطول | حجم المؤسسة |
| التركيز على الحلول غير المتصلة (Offline) في المراحل الأولى، والتوسع تدريجياً في المناطق الأكثر استعداداً | ضعف الاتصال أو التيار الكهربائي يُطيل المدة | البنية التحتية |
| برامج تدريبية مكثفة بمواد مبسطة والاستفادة من مدربين محليين | نقص المهارات يُطيل مدة التدريب | المهارات الرقمية |
| اعتماد حلول مفتوحة المصدر (Open Source) والاستفادة من دعم المنظمات الدولية | محدودية الموارد قد تؤخر اقتناء الأجهزة والبرمجيات | الموارد المالية |
| استخدام قنوات بديلة) مثل (SMS في المناطق غير المستقرة واعتماد فترات جمع مرنة | عدم الاستقرار يُعطل الجمع الميداني | السياق الأمني |

ويمكن للمؤسسات التي ترغب في تطبيق النموذج أن تبدأ بمرحلة تجريبية (Pilot Study) على عينة محدودة من المدارس، كما سيُعرض في القسم التالي، لتقييم الجدوى وتحديد المدة المناسبة لسياقها قبل التوسع، وبعد إتمام خطوة التحقق الخبروي الموصوفة في القسم 3.8.

## 7. التطبيق التجريبي ومقاييس التقييم

### 7.1 التصميم شبه التجريبي المقترح للاختبار الميداني

يُقترح تصميم دراسة شبه تجريبية [29] لاختبار جدوى النموذج قبل التوسع — على أن تُجرى بعد مرحلة التحقق الخبروي (القسم 3.8) لا قبلها — على عينة من 10–20 مدرسة متنوعة من حيث الحجم والموقع الجغرافي ومستوى الاتصال ونوع التعليم، مقسمة إلى مجموعة تجريبية تطبق الإدخال المزدوج المحدود ومجموعة ضابطة تستمر بتحسينات إجرائية فقط، لمدة فصلين دراسيين (6–8 أشهر). يشمل التدخل توحيد النماذج الورقية، واعتماد معرفات فريدة، وإدخال رقمي لعمليتين رئيسيتين (الحضور والنتائج مثلاً)، وتحققاً آلياً، وتدقيقاً عينياً أسبوعياً (5–10% من السجلات)، وتغذية راجعة شهرية.

### 7.2 مقاييس التقييم

تُصنَّف مقاييس التقييم في أربع فئات رئيسية يوضحها الجدول(8)

**الجدول (8): فئات مقاييس تقييم الدراسة التجريبية**

| الفئة | أبرز المقاييس | القيمة المستهدفة |
|---|---|---|
| جودة البيانات | اكتمال السجلات، ودقة الإدخال، وعدد القيم الشاذة، ومعدل تكرار المعرفات | اكتمال ≥90%، ودقة ≥95%، وشذوذ 5/100>سجل، وتكرار ≥1% |
| الكفاءة التشغيلية | زمن إنتاج التقرير، وزمن إدخال الدفعة الأسبوعية، وساعات العمل الإضافية | خفض زمن التقرير ≥30%، والتزام بالمواعيد ≥85% |
| التبني والرضا | نسبة الالتزام بالإدخال، ورضا المستخدمين، والاستعداد للاستمرار | التزام ≥80%، ورضا ≥5/3.5، واستمرار ≥70% |
| أثر القرار | عدد القرارات المدعومة بالبيانات، ونسبة تحسن مؤشرات الأداء، ودقة الإنذار المبكر | 3≥قرارات خلال التجربة، وإنذار مبكر ≥70% |

وتُعد فئة "أثر القرار" الأكثر أهمية لأنها تعكس الانتقال من "نظام تقرير" إلى "رافعة قرار" [16]، وهي أيضاً الفئة التي تُختبر فيها فرضية النموذج الأساسية المستعارة من نموذج.[37] DeLone & McLean

### 7.3 إجراءات التحليل

يُحلَّل النتائج كمياً عبر مقارنة قبل/بعد، وفرق الفروق بين المجموعتين، واختبارات إحصائية T-test( أو Mann-Whitneyإذا قلّت العينة عن 30[30] )، ونوعياً عبر تحليل الأسباب الجذرية للتحديات التنفيذية وتحليل نقاط الألم في استبيانات الرضا. وتُفضي النتائج إلى أحد قرارات ثلاثة: التوصية بالتوسع التدريجي، أو تعديل الإجراءات وإعادة التجربة، أو إيقاف التوسع وإعادة تقييم التصميم، مع توثيق النماذج والإجراءات وخطة التدريب المحسَّنة في جميع الحالات. القيم المستهدفة أعلاه هي بدورها قابلة للتعديل بعد جولة التحقق الخبراتي، ولا ينبغي التعامل معها كمعايير نجاح/فشل جامدة قبل ذلك.

### 7.4 قرارات ما بعد التجربة

تُفضي نتائج التحليل إلى أحد ثلاثة قرارات: (1) التوصية بالتوسع التدريجي إذا تحققت المؤشرات المستهدفة، (2) تعديل الإجراءات وإعادة التجربة إذا تحققت بعض المؤشرات دون الأخرى، (3) إيقاف التوسع وإعادة

تقييم التصميم إذا فشلت المؤشرات الجوهرية، مع توثيق النماذج والإجراءات وخطة التدريب المحسَّنة في جميع الحالات.

### 7.5 النتائج الكمية للتنفيذ الحاسوبي

إضافةً إلى التصميم شبه التجريبي المقترح للاختبار الميداني (7.1–7.4)، نُفِّذ اختبار حاسوبي أولي لمنطق النموذج عبر المنظومة التجريبية الموصوفة في القسم 3.9، على Dataset مُحاكى من 5000 سجل. وقد حُسبت سبعة مؤشرات للنموذج الورقي (aselineB) وللنموذج الهجين بعد تطبيق قواعد التحقق وحلّ العيوب بنسب افتراضية مصرَّح بها (الجدول 9)، مع حساب مؤشر الجاهزية الرقمية (DRS) للنماذج الثلاثة (الجدول 10).

**الجدول (9): النتائج الكمية قبل/بعد التنفيذ الحاسوبي**

| المؤشر | النموذج الورقي (Baseline) | النموذج الهجين (بعد التنفيذ) | التحسن | مصدر القيمة |
|---|---|---|---|---|
| زمن إدخال البيانات (ث/سجل) | 45 | 28 | -37.8% | معامل افتراضي |
| نسبة الأخطاء(%) | 12.84 | 2.56 | -80.1% | محسوب |
| نسبة البيانات المفقودة(%) | 2.93 | 0.86 | -70.6% | محسوب |
| نسبة التكرار(%) | 2.00 | 0.44 | -78.0% | محسوب |
| زمن إنتاج التقرير (دقيقة) | 180 | 95 | -47.2% | معامل افتراضي |
| تكلفة التصحيح (وحدة عمل) | 100 | 32.66 | -67.3% | محسوب |
| جودة البيانات الإجمالية–0) (100 | 87.54 | 95.42 | +9.0% | محسوب |

**الإفصاح المنهجي** :الأرقام ناتجة عن تشغيل المنظومة على Dataset مُحاكى (5000 سجل) حُقنت فيه عيوب بنسب صُمّمت وفق الأنماط الموثّقة في المراجع [2]، [8]، [15]، [16]. زمنا الإدخال والتقرير معاملا نمذجة افتراضيان، وبقية المؤشرات محسوبة من الكود (الملحق A). لا يُدّعى أنها قياسات ميدانية ولا اختبار للفرضيات، بل إثبات جدوى لمنطق النموذج قابل لإعادة التشغيل.

**الجدول (10): مؤشر الجاهزية الرقمية (DRS) وقرار الانتقال**

| القرار عند بوابة المرحلة 5 (4 → 5) | القرار عند بوابة المرحلة 3 (2 → 3) | DRS | النموذج |
|---|---|---|---|
| استمرار )البوابة غير مستوفاة( | استمرار (البوابة غير مستوفاة) | 86.9 | الورقي الخالص |
| استمرار) الاكتمال (98 > 93.5 | انتقال إلى المرحلة 3 | 95.2 | الهجين المُنفَّذ |
| استمرار )الاكتمال (98 > 97.3 | انتقال إلى المرحلة 3 | 98.2 | الرقمي الكامل |

**العتبات المستخدمة**(2 →1) 50 = DRS :، و(3 →2) 65، و(4 →3) 75، و(5 →4) 85، مقرونة بحدود دنيا للاكتمال والدقة والتوقيت عند دخول المرحلتين 3و) 5الجدول (6؛ وهي جميعاً مقترحة استنباطياً وغير مُختبرة ميدانياً، ويُطبَّق قرارا 3→2و 5→4على النماذج الثلاثة بغرض المقارنة.

ويُظهر الجدول (9) تحسناً في جميع المؤشرات السبعة في المحاكاة، تراوح بين -37.8% في زمن الإدخال و-80.1% في نسبة الأخطاء، مع ارتفاع جودة البيانات الإجمالية من 87.54 إلى 95.42 (+9.0%)؛ وهي نتائج إثبات جدوى لا قياسات ميدانية. وتراوحت الجودة الإجمالية للهجين بين 94.73 و95.76 عند تغيير نسبة حلّ القيم المخالفة بين 0.6 و0.9، وتراوح DRS بين 94.97 و95.43 عند تغيير كل وزن بمقدار ±5%. ويُظهر الجدول (10) أن SDR وحده لا يميّز بين النماذج (86.9 للورقي مقابل 95.2 للهجين، ويتجاوز الورقي عتبات DRS الأربع جميعاً)، بينما تميّز الحدود الدنيا (الجدول 6) بينها: يخفق الورقي في بوابة المرحلة 3، ويستوفيها الهجين فيُوصى بالانتقال إلى المرحلة 3 دون أن يستوفي بوابة المرحلة 5 (الاكتمال 93.5% مقابل 98%)، ويخفق الرقمي الكامل فيها بفارق 0.7 نقطة في الاكتمال. كما علّمت وحدة اكتشاف الشذوذ 400 سجل (8.00%) بحسب contamination = 0.08، وبلغت الدقة 0.89 والاستدعاء 0.82 مقابل الشذوذ المحقون (434 سجلاً).

## 8. المناقشة

تتوافق نتائج تحليل الحالات الأربع مع أدبيات البنك الدولي واليونسكو حول التحديات البنيوية لنظم المعلومات التعليمية في السياقات النامية [2]، [6]، مع مراعاة أن هذا التوافق مستمد من عينة صغيرة يغلب عليها سياق النزاع كما نُوقش في القسم 3.2.

**أولاً، التوافق مع إطار SABER–EMIS:** تُظهر النتائج أن البيئة التمكينية (السياسات والتشريعات والحوكمة) هي العامل الأكثر تأثيراً في نجاح أو فشل النماذج الهجينة. ففي حالة فلسطين، أدى غياب سياسة واضحة لإدارة السجلات الرقمية إلى استمرار الاعتماد على الورق كمصدر قانوني وحيد، مما أبقى النظام في حالة "ازدواجية غير منظمة" [21]، وهو ما ينسجم مع تأكيد إطار البنك الدولي–SABER EMISعلى ضرورة بيئة تمكينية متكاملة تشمل التشريعات والموارد والحوكمة [6]. ويمكن تفسير هذا أيضاً عبر إطار TOE [35]: غياب البُعد البيئي (تشريع واضح) عطّل تبني الحل رغم توفر جاهزية تقنية نسبية.

**ثانياً، التوافق مع توصيات EMIS 2.0:** تؤكد النتائج أن جودة البيانات ليست نتيجةً للنظام بل شرطاً لنجاحه، وهو ما ينسجم مع جوهر دليل EMIS 2.0 الذي يُشدد على أن تحسين جودة البيانات يجب أن يسبق أي استثمار تقني كبير [16]. ففي حالة جامايكا، كان ضعف جودة البيانات نتيجة غياب المعايير الموحدة والمعرفات الفريدة، مما جعل أي محاولة ربط بين الأنظمة محفوفة بالفشل [24]، وهو ما يعزز توصية EMIS بربط البيانات بمعرفات فريدة كشرط حاسم لربط السجلات عبر الزمن. وهذا يتطابق مباشرة مع منطق DeLone & McLean [37]: جودة المعلومات هنا شرط سابق للاستخدام، لا نتيجة له — تماماً كما افترض النموذج المقترح في الطبقة الثالثة.

**ثالثاً، التوافق مع أدبيات الحوكمة وإدارة التغيير:** أدى غياب آليات التغذية الراجعة في الصومال إلى تراجع دافع المدارس لتحسين جودة بياناتها [22]، بما يتوافق مع نموذج الحوكمة متعدد المستويات الذي يُشدد على تناغم المستويات الاستراتيجي والتشغيلي والتقني [18]، فغياب قناة تغذية راجعة يعني عملياً غياب المستوى التشغيلي من هذا النموذج، وهو ما يفسر جزئياً استمرار المشكلة رغم وجود دعم استراتيجي (دولي) واضح في الحالة الصومالية.

**رابعاً، التوافق مع منظور النظم الاجتماعية–التقنية ونظرية انتشار الابتكار:** تُفسَّر النتائج عبر افتراض أن أي نظام معلوماتي يتكون من تفاعل بين مكونات تقنية وبشرية، وأن فشل مشاريع كثيرة لا يعود إلى قصور تقني بل إلى عدم توافق هذه المكونات [7]. ففي حالة تشاد، لم يكن التحدي الأكبر تقنياً (ضعف الاتصال) بل تنظيمياً وبشرياً (غياب التدريب المستمر وضعف الرقابة الميدانية)، مما أدى إلى استمرار أخطاء نقل البيانات رغم بنية تحتية مقبولة في بعض المناطق [23]. ويُقرأ هذا أيضاً عبر نظرية انتشار الابتكار [36]: غياب "القابلية للتجربة" على نطاق محدود (إذ طُبق النموذج على المستوى الوطني دفعة واحدة في تشاد) حرم النظام من فرصة التعلّم التدريجي التي يوفرها التصميم المرحلي المقترح هنا.

وفي حين ركزت أدبيات سابقة على الجوانب التقنية للرقمنة [5] أو على تحديات جودة البيانات بشكل منفصل [2]، تُسهم هذه الدراسة في إثراء الأدبيات المحدودة حول النماذج الهجينة بتقديم نموذج يجمع بين هذه الأبعاد في إطار متكامل مع معايير انتقال مرحلية مقترحة قائمة على مؤشرات قابلة للقياس، مع التأكيد المتكرر على أن قيمة هذه المساهمة نظرية–تصميمية وتطبيقية–حاسوبية في هذه المرحلة.

يمكن تفسير الفشل الجزئي للنماذج الهجينة في الحالات المدروسة بعوامل تنظيمية (غياب سلطة مرجعية عند تعارض البيانات)، وبشرية (نقص التدريب وضعف الحوافز)، وتقنية (غياب معايير موحدة)، وبيئية (عدم استقرار يُعطل الجمع). ويقترح النموذج المطروح هنا معالجة هذه العوامل مجتمعة عبر أربع طبقات متكاملة بدل التركيز على جانب واحد، وتحديد بوابات انتقال موضوعية (وإن كانت مقترحة أولياً) تمنع "الاندفاع الرقمي"، وتصميم تغذية راجعة مزدوجة الاتجاه، وتدرج في التعقيد، وتركيز على البيانات قبل الأدوات التقنية.

### 8.1 حدود الدراسة وتهديدات الصدق

**حدود الدراسة** :*منهجياً*، تعتمد على مصادر ثانوية دون تحقق ميداني وقد تتأثر بتحيز النشر نحو النتائج الإيجابية، *جغرافياً*، تقتصر العينة على أربع حالات تعاني ظروفاً استثنائية (ثلاث منها في سياق نزاع أو نزوح) لا تمثل كل السياقات الورقية عالمياً، وتحديداً لا تمثل جيداً البيئات الورقية المستقرة منخفضة الموارد التي تُعد الأكثر شيوعاً عالمياً، *زمنياً*، تشمل تقارير من 2015 حتى 2025 وقد لا تعكس بعض التقارير الأقدم التطورات التقنية الحديثة كالذكاء الاصطناعي، *اقتصادياً*، يعتمد التحليل الوارد في القسم 9 على تقديرات توضيحية عامة دون بيانات فعلية مفصلة، ويجب عدم استخدامه كأساس لقرارات ميزانية فعلية، *وأخلاقياً*، لم تتعمق الدراسة في الآثار الأخلاقية لجمع بيانات الطلاب الحساسة في سياقات النزوح، مما يستدعي بحثاً متخصصاً مستقبلياً.

وتوضيحاً لصرامة هذه الحدود منهجياً، تُناقَش الدراسة وفق معايير تهديدات الصدق الأربعة المعتمدة في أبحاث علوم التصميم والدراسات النوعية [38] ,[27]

**الصدق البنائي :(Construct Validity)** يرتبط بمدى تمثيل أبعاد جودة البيانات الخمسة ومؤشرات الأداء المقترحة للمفاهيم النظرية التي تقيسها فعلياً. خُفِّف هذا التهديد باستناد المؤشرات مباشرة إلى إطار معتمد دولياً [2] (UIS) بدل اشتقاقها اجتهادياً، لكن العتبات الرقمية المحددة (كـ ≥90%، و≥95%) تبقى غير مُختبرة إحصائياً (كصدق البناء التقاربي والتمايزي) إلى حين التحقق الخبروي والتطبيق الفعلي — وهذا هو بالضبط سبب تصميم خطة دلفي في القسم 3.8.

**الصدق الداخلي :(Internal Validity)** يخص مدى صحة الروابط السببية المفترضة بين مكونات النموذج (كافتراض أن تحسين جودة البيانات يقود إلى تحسن القرارات). خُفِّف هذا التهديد جزئياً بالاستناد إلى دروس مستخلصة من حالات واقعية موثقة [21]، [22]، [23]، [24]، وبالربط الصريح بنماذج نظرية مختبرة سابقاً في سياقات أخرى([37] DeLone & McLean) ، وبالاتساق الأولي مع نتائج المحاكاة (القسم 7.5)، وهو اتساق ناتج عن بنية المحاكاة نفسها وليس دليلاً سببياً؛ كما أن غياب التطبيق الميداني يمنع تأكيد العلاقات السببية إحصائياً في السياق التعليمي تحديداً.

**الصدق الخارجي :(External Validity)** يخص قابلية تعميم النموذج خارج السياقات الأربعة المدروسة، وهو التهديد الأكثر أهمية هنا نظراً لتحيز العينة نحو سياقات النزاع. عولج هذا التهديد جزئياً بتصميم النموذج بمرونة سياقية صريحة (الجدول 7) بدل افتراض قالب واحد، إلا أن التعميم الكامل يحتاج اختباراً في سياقات إضافية غير متأثرة بالنزاع (آسيوية، وأوروبية شرقية، وأفريقية مستقرة) لم تشملها العينة. ويُقترح، لمعالجة هذا التهديد بشكل منهجي، أن تتضمن أي دراسة تحقق لاحقة عينة متعمدة من بيئات تعليمية مستقرة ذات بنية ورقية (في آسيا أو أوروبا الشرقية أو أفريقيا المستقرة) لاختبار قابلية النموذج للنقل خارج سياق الأزمات.

**صدق الاستنتاج :(Conclusion Validity)** يخص اتساق الاستنتاجات مع الأدلة المتاحة. عولج عبر التمييز الصريح بين "الدروس المستخلصة من الحالات" (استقرائية) و"مكونات النموذج المقترحة" (استنباطية)، وتجنب تعميمات كمية لا تدعمها طبيعة العينة النوعية الصغيرة، ووسم كل عتبة رقمية بوضوح بأنها "مقترحة" لا "مُثبتة"، مع إثبات الجدوى الكمي الأولي عبر التنفيذ الحاسوبي (القسم 7.5) الذي لا يُعدّ دليلاً تجريبياً على صحة الفرضيات.

### 8.2 الاتساق الأولي لمنطق النموذج عبر التنفيذ الحاسوبي (إثبات جدوى)

قدّمت النتائج الكمية للتنفيذ الحاسوبي (الجدولان 9 و10) اتساقاً أولياً مع منطق النموذج الهجين دون أن تُشكّل اختباراً للفرضيات، لأن معاملات حلّ العيوب في المحاكاة مُحدَّدة افتراضاً فلا تصلح دليلاً سببياً أو إحصائياً:

**أولاً، منطق "جودة البيانات شرط لا نتيجة:"** رافق ارتفاعَ جودة البيانات من 87.54إلى ) 95.42الجدول (9انخفاضٌ في الأخطاء والتكرار وتكلفة التصحيح، لكن هذا الارتباط ناتج عن بنية المحاكاة نفسها فلا يُعدّ دليلاً على السببية .ويتسق هذا المنطق مع [37] DeLone & McLeanومع توصية دليل EMIS 2.0بأن تحسين الجودة يسبق الاستثمار التقني [16]ومع إطار [44] Kenett & Shmueliلتوليد

المعرفة القابلة للتنفيذ (Actionable Knowledge)، ويبقى اختباره سببياً مرهوناً بالدراسة شبه التجريبية )القسم .(7.1

**ثانياً، منطق "التدرج يُخفّض المخاطر:"** طبّقت الخوارزمية عتبات DRSمقترحة استنباطياً، مقرونة بحدود دنيا للأبعاد، على قيم DRSالمحسوبة من بيانات المحاكاة )الجدول (10، وأظهرت أن DRSوحده لا يميّز بين النماذج بينما تميّزها الحدود الدنيا؛ فهي تُطبّق العتبات ولا تشتقّها من البيانات .وهذا يُترجم مبدأ "القابلية للتجربة [36] "إلى آلية تشغيلية قابلة للقياس.

**ثالثاً، منطق "التكامل التدريجي أفضل من القفزة:"** استوفى النموذج الهجين بوابة المرحلة 3 (DRS = 95.2)، بينما بلغ DRSالرقمي الكامل 98.2دون أن يستوفي بوابة المرحلة 5إلا بفارق 0.7نقطة في الاكتمال؛ وفارق 3.0) DRSنقاط (صغير ولا يُبرّر بذاته القفزة المباشرة إلى الرقمي الكامل نظراً لتكاليفها ومخاطر التعطل، وهو ما يتوافق مع تحذيرات الأدبيات من "الاندفاع الرقمي.[32] ,[31] ,[16] "

**رابعاً، دور:Isolation Forest** أظهرت الوحدة قدرة معقولة على رصد السجلات الشاذة المحقونة )دقة 0.89واستدعاء (0.82، مما يُبرّر توظيفها في الطبقة الثالثة )الحوكمة والتدقيق(، مع التنبيه إلى أن الشذوذ المحقون قيم متطرفة واضحة قد تُسهّل الكشف مقارنةً بالبيانات الحقيقية .[41]

## 9. تحليل اقتصادي توضيحي للنموذج الهجين

**ملحوظة منهجية:** للتذكير فإن جميع الأرقام والنسب الواردة في هذا القسم —بما فيها بيانات الجدول — (11)ليست نتائج محاسبة تكاليف ميدانية ولا قياسات مستمدة من الحالات الأربع أو من تطبيق فعلي للنموذج، بل نماذج افتراضية توضيحية (Illustrative Hypothetical Models)صيغت استناداً إلى أنماط عامة في أدبيات تكلفة التحول الرقمي في القطاع العام، وغرضها الوحيد توضيح المنطق الاستثماري القائل إن توزيع التكاليف على مراحل قد يُخفّض المخاطرة مقارنة بالاستبدال الفوري .ولا يجوز استخدامها أساساً لقرار ميزانية أو استثمار فعلي؛ وعلى أي مؤسسة تقدير تكلفتها الفعلية بدراسة تكاليف محلية مستقلة، وهو ما تُوصي به الدراسة في القسم .12.4

تعتمد مشاريع التحول الرقمي غالباً استراتيجية "الاستبدال الكلي" التي ترفع التكلفة الإجمالية للملكية (TCO) بسبب الحاجة إلى بنية تحتية فورية وتدريب مكثف وتعطل تشغيلي أثناء الانتقال، وتشير دراسات إلى أن نسبة كبيرة من مشاريع التحول الرقمي في القطاع العام تفشل أو تتجاوز ميزانياتها [31]، [32]. في المقابل، يقترح النموذج الهجين توزيع التكاليف على فترة أطول (12–24 شهراً)، بما قد يُخفض النفقات الرأسمالية الفورية باتجاه طبقة التكامل والتحقق) مع إمكانية اعتماد حلول مفتوحة المصدر مثل([33] OpenEMIS ،

ويُقلل تكاليف تعطل العمل بإبقاء الورق مساراً بديلاً، مقارنة بارتفاع هذه التكاليف المتوقع في النموذج الرقمي الكامل — وهذا استنتاج منطقي مستمد من بنية النموذج، لا رقم مقيس.

تشير تقارير البنك الدولي واليونسكو إلى أن البيانات غير الدقيقة قد تُكلف الحكومات جزءاً معتبراً من ميزانية التعليم بسبب سوء توزيع الموارد [1]، [34]. ويُفترض أن يرفع النموذج الهجين "قيمة المعلومة" عبر تقليل الأخطاء بالتحقق الآلي والتدقيق العيني، وتحسين توقيت البيانات، وتعزيز استخدامها الفعلي في القرار، وهذا افتراض تشغيلي يستند إلى منطق النموذج لا إلى قياس مباشر.

يُقدم الجدول (11) نموذجاً افتراضياً توضيحياً بالكامل (نسب مئوية نمطية غير مشتقة من قياسات فعلية) للمقارنة بين النماذج الثلاثة على مدى خمس سنوات، لتوضيح منطق المفاضلة فحسب لا تقديم تقدير تكلفة يُعتمد عليه، إذ قد تختلف الأرقام جوهرياً بحسب البلد وحجم المؤسسة ومستوى البنية التحتية.

**الجدول (11): مقارنة تقديرية–توضيحية (غير قابلة للتعميم الكمي) للتكاليف بين النماذج الثلاثة**

| بند التكلفة | النموذج الورقي الخالص | النموذج الهجين المقترح | النموذج الرقمي الكامل |
|---|---|---|---|
| التكاليف الرأسمالية(CAPEX) | 5% | 30% | 100% |
| التكاليف التشغيلية السنوية(OPEX) | 80% | 60% | 70% |
| تكاليف تعطل العمل(Downtime) | 0% | 10% | 50% |
| تكاليف التدريب والتغيير | 5% | 40% | 80% |
| تكاليف تصحيح الأخطاء | 90% | 30% | 20% |
| التكلفة الإجمالية (TCO) على 5 سنوات | 85% | 55% | 100% |
| العائد على الاستثمار(ROI) | منخفض جداً | مرتفع | متوسط |

يُظهر الجدول، على المستوى المفاهيمي فقط، أن النموذج الورقي الخالص يبدو منخفض التكلفة الرأسمالية لكنه قد يُنتج هدراً كبيراً بسبب ضعف الجودة، بينما يتطلب النموذج الرقمي الكامل استثماراً مبكراً ضخماً قد يفشل في السياقات غير المهيأة، في حين يُفترض أن يحقق النموذج الهجين توازناً بين التكلفة والمخاطر والعائد — وهذا الافتراض هو بالضبط ما تختبره الدراسة التجريبية المقترحة في القسم 7 من خلال قياس فعلي لزمن التقرير وتكاليف تصحيح الأخطاء. وتتسق نتيجة المحاكاة (القسم 7.5) اتساقاً أولياً مع هذا

الافتراض النظري: إذ بلغت تكلفة التصحيح في النموذج الهجين المُحاكى نحو 32.7% من نظيرتها في الورقي، وهو قريب من التقدير التوضيحي في الجدول (11) الذي يُقدّر تكاليف التصحيح في الهجين بنحو ثلث نظيرتها في الورقي (30% مقابل 90%)، وهذا القرب ليس دليلاً على صحة التقدير التوضيحي لأن كليهما افتراضي.

وبناءً على ذلك، يُوصى اقتصادياً بالبدء بدراسة تجريبية محدودة لتقدير التكاليف الفعلية محلياً قبل أي تعميم، والاستفادة من الحلول مفتوحة المصدر مثل OpenEMIS [33] ودعم المنظمات الدولية [1]، [16]، وتوزيع التكاليف على 2–3 سنوات ضمن الميزانيات التشغيلية بدل طلب ميزانية استثنائية، وبناء شراكات مع القطاع الخاص لتوفير البنية التحتية بتكلفة مخفضة، مع التركيز على تدريب استراتيجي فعال من حيث التكلفة.

## 10. إسهامات الدراسة

**نظرياً** :تسد الدراسة فجوة في أدبيات التحول الرقمي التعليمي بتقديم نموذج مفاهيمي منهجي للتحول التدريجي غير المعطل بدلاً من نماذج الاستبدال الفوري أو الإلغاء التام، وتربط جودة البيانات بمعايير الانتقال الرقمي ضمن إطار مفاهيمي واحد، وتوسع تطبيق نظرية النظم الاجتماعية–التقنية [7] ونموذج الحوكمة متعدد المستويات [18] والأطر التكميليةTOE) ، وانتشار الابتكار، و (DeLone & McLeanإلى سياق البيئات التعليمية الورقية، مع تقديم مسار صريح ومحدد لاختبار صحة هذا الإسهام. وقد تجاوزت الدراسة حدود الإسهام النظري إلى الإسهام التطبيقي الحاسوبي، عبر تقديم منظومة تجريبية قابلة لإعادة التشغيل تُترجم الفرضيات إلى نتائج كمية قابلة للتحقق.

**تطبيقياً** :يوفر النموذج أداة تخطيط أولية قابلة للتطوير بتكاليف معقولة تعتمد مبدأ "البدء بما هو متاح"، وإطاراً مرحلياً ببوابات قرار مقترحة تستند إلى مؤشرات قابلة للقياس بدل الحدس، وآليات تغذية راجعة مزدوجة تعزز التحسين المستمر، وأداة أولية لتقييم جاهزية المؤسسات، وتصوراً لدراسة تجريبية قابلة للتنفيذ ميدانياً بعد التحقق الخبراتي. وتقديم منظومة تجريبية مفتوحة قابلة لإعادة التشغيل (متاحة كملحق إلكتروني — الملحقA) تُتيح للمؤسسات اختبار منطق النموذج على بياناتها الخاصة قبل أي استثمار ميداني.

**منهجياً** :يجمع التصميم بين المراجعة المنهجية للأدبيات وتحليل أربع حالات دولية متنوعة (مع الإقرار الصريح بتحيزها نحو سياقات النزاع)، ويطور مجموعة مؤشرات أداء رئيسية مقترحة عبر أربع فئات (جودة البيانات، والكفاءة التشغيلية، والتبني والرضا، وأثر القرار)، ويقدم تصميماً شبه تجريبي بمجموعتين تجريبية وضابطة قابل للتكرار في سياقات مختلفة، إلى جانب خطة تحقق خبراتي صريحة (دلفي) تسبق أي اعتماد

تطبيقي، وإطار مبسط توضيحي لتقييم الجدوى الاقتصادية للنماذج الهجينة، والجمع بين المنهج النوعي والتنفيذ الحاسوبي، بما يُنتج إثبات جدوى كمياً أولياً على قابلية النموذج للتنفيذ.

## 11. الخاتمة

هدفت هذه الدراسة إلى تحليل آليات دمج نظم المعلومات الإدارية في البيئات التعليمية الورقية، وتطوير نموذج هجين تدريجي يهدف إلى تحقيق التحول غير المعطل مع التركيز على جودة البيانات والحوكمة، اعتماداً على المنهج النوعي التحليلي وتحليل أربع حالات دولية، مع الانتقال إلى التصميم والتنفيذ الحاسوبي للتحقق من منطق النموذج كمياً.

أظهر التحليل الاستقرائي للحالات أن النماذج الهجينة خيار عملي وضروري محتمل في المراحل الأولى من التحول، وأنها تواجه تحديات متكررة في جودة البيانات وعبء العمل والتكامل والتغذية الراجعة، وأن جودة البيانات تبدو شرطاً لنجاح التحول لا نتيجة له. وقد اتسق هذا الاستنتاج مع نتائج المحاكاة الحاسوبية: إذ أظهر تشغيل المنظومة التجريبية على 5000 سجل مُحاكى تحسناً في جميع المؤشرات السبعة، تراوح بين انخفاض بنسبة 37.8% في زمن الإدخال (معامل نمذجة افتراضي) و 80.1% في نسبة الأخطاء، مع ارتفاع جودة البيانات الإجمالية من 87.54 إلى 95.42. كما طبّقت خوارزمية قرار الانتقال عتبات مقترحة مقرونة بحدود دنيا لأبعاد الجودة على مؤشر جاهزية رقمية (DRS) محسوب من بيانات المحاكاة، وتبيّن أن الحدود الدنيا هي التي تميّز بين النماذج الثلاثة لا DRS وحده؛ وهي نتائج إثبات جدوى لا قياسات ميدانية ولا اختبار للفرضيات.

ويقدم النموذج المقترح إطاراً مفاهيمياً بأربع طبقات متكاملة (فيزيائية، وتكامل رقمي، وحوكمة وتدقيق، وتحليل واتخاذ قرار)، وجدولاً زمنياً مرجعياً (12–24 شهراً) بخمس مراحل تنفيذية وبوابات انتقال، مع منظومة تجريبية قابلة لإعادة التشغيل وتصور لدراسة تجريبية ميدانية.

وتخلص الدراسة إلى أن نجاح التحول نحو نظم معلومات تعليمية فعالة يتطلب توازناً بين الاستمرارية التشغيلية والتحول الرقمي، مع تعزيز الحوكمة المؤسسية وبناء القدرات البشرية واستخدام البيانات في دعم القرار، خاصة في السياقات النامية والمتوسطة الدخل التي لا تحتمل تكاليف القفزة الرقمية الكاملة أو تعاني ضعف البنية التحتية وعدم الاستقرار. وتؤكد الدراسة، في ختامها، أن قيمتها الحالية تكمن في تقديم إطار مفاهيمي متماسك، ومنظومة تجريبية قابلة للتحقق، ومسار تحقق واضح (دلفي فتجربة ميدانية)، لا في تقديم معيار جاهز للتطبيق الفوري. اعتماد النموذج ميدانياً قبل إتمام هاتين الخطوتين يحمل مخاطرة معرفية ينبغي أن يعيها صناع القرار.

## 12. التوصيات

تُقدَّم التوصيات التالية في أربع فئات: سياساتية، وتقنية، وبناء قدرات، وبحثية مستقبلية، تم عرضها ضمن الجداول.(15–14–13–12)

### 12.1 التوصيات السياساتية

**الجدول (12): التوصيات السياساتية**

| الأساس المنطقي | التوصية |
|---|---|
| الاعتراف القانوني بالنسخ الرقمية شرط أساسي لتقليل الاعتماد على الورق كمصدر وحيد ومنح الثقة في النظام الرقمي | تبني أطر قانونية تعترف بالسجلات الرقمية المحوَّلة من أصل ورقي، وتوحيد معايير الأرشفة وفق[13] ISO 15489 |
| يوفر الإطار الوطني التوجيه والموارد اللازمة ويضمن اتساق الجهود على المستوى القطري، مع ترك هامش للتكيف السياقي | تطوير سياسات وطنية للتحول التدريجي بأطر زمنية مرنة (12–24 شهراً كمرجع أولي) ومؤشرات انتقال تخضع للتحقق المحلي قبل اعتمادها |
| يقلل غياب المعايير الموحدة من "جزر البيانات" ويسهل التكامل الأفقي | إلزام المؤسسات بمعايير بيانات موحدة مثل Ed–Fi و OneRoster [12] |
| تشير النتائج الاستقرائية للحالات الأربع إلى أن جودة البيانات والحوكمة أكثر تأثيراً في نجاح التحول من التقنية وحدها | تخصيص ميزانيات دورية تركز على جودة البيانات والحوكمة، لا على الأجهزة والبرمجيات فقط |
| تثير نظم المعلومات التعليمية قضايا أخلاقية تتعلق بجمع بيانات حساسة عن الطلاب | وضع سياسات واضحة لحماية البيانات وخصوصيتها وفق مبدأ "الخصوصية بالتصميم" |

### 12.2 التوصيات التقنية

**الجدول (13): التوصيات التقنية**

| الأساس المنطقي | التوصية |
|---|---|
| تُعد طبقة التكامل قلب النموذج الهجين وتُقلل تكاليف الربط بين الأنظمة | بناء "طبقات تكامل" مفتوحة المصدر معتمدة على معايير Ed–Fi و[12] OneRoster |

| الأساس المنطقي | التوصية |
|---|---|
| شرط أساسي لتقليل التكرار والأخطاء وتمكين التحليلات الزمنية | اعتماد نظام معرفات فريد وموحد للطلاب والمعلمين والمدارس يُصدر مركزياً |
| يؤثر تصميم النموذج الورقي مباشرة في جودة البيانات الرقمية الناتجة عن إدخاله | إعادة تصميم النماذج الورقية بحقول موحدة ورموز QRأو باركود تربطها بالقاعدة الرقمية |
| يُقلل الأخطاء البشرية ويُحسّن دقة البيانات ويقلل الحاجة للتصحيح اللاحق | تفعيل آليات التحقق الآلي في واجهات الإدخال مع تنبيهات فورية عند التناقض |
| تُعزز التغذية الراجعة المرئية دافع المدارس لتحسين جودة بياناتها | تطوير لوحات مؤشرات مبسطة تعكس أداء المدرسة وتُتاح في الوقت المناسب |
| يُعزز جودة البيانات مع اشتراط توفر بيانات جيدة أولاً، استخدامه المبكر قبل نضج البيانات قد يُضخّم الأخطاء بدل تصحيحها | توظيف التعلم الآلي لاكتشاف الشذوذ البياني وسد الفجوات التقديرية الموثقة، بعد التأكد من نضج جودة البيانات الأساسية |
| تُتيح قياس الأثر المتوقع على جودة البيانات بتكلفة شبه معدومة، وتكشف العقبات التقنية قبل التعميم | اعتماد المنظومة التجريبية المُنفَّذة كنموذج اختبار أولي (Testbed) قبل أي استثمار ميداني |

### 12.3 توصيات بناء القدرات والتدريب

**الجدول (14): توصيات بناء القدرات والتدريب**

| الأساس المنطقي | التوصية |
|---|---|
| يؤدي نقص فهم جودة البيانات وأخلاقياتها إلى ضعف الأداء وتراجع الالتزام | توسيع التدريب ليشمل جودة البيانات وأمن المعلومات وأخلاقيات الرقمنة، لا الاقتصار على المهارات التقنية |
| التدريب العملي أكثر فعالية من النظري لذوي المهارات الرقمية المحدودة | تطوير برامج تدريبية مرحلية عملية (On-the-Job Training)قبل كل مرحلة تنفيذية |
| يُقلل الدعم الفني القريب من الإحباط الناتج عن المشكلات التقنية | إنشاء وحدات دعم فني على مستوى المديريات لمساعدة المدارس ميدانياً |

| الأساس المنطقي | التوصية |
|---|---|
| تُعزز الحوافز الدافع وتُشجع التنافس الإيجابي | تصميم برامج تحفيزية للمدارس والموظفين المتميزين في جودة البيانات |
| يُعد تبسيط المواد وتوفيرها محلياً شرطاً لفعالية التدريب | إعداد مواد تدريبية مبسطة باللغة المحلية (أدلة مصورة، فيديوهات قصيرة) |

### 12.4التوصيات البحثية المستقبلية

يقدم الجدول (15) خارطة بحثية مرحلية تُترجم توصيات هذا القسم إلى تسلسل زمني ومنهجي محدد، بما يُبرز موقع الدراسة الحالية (المرحلة الأولى) ضمن برنامج بحثي متكامل متعدد المراحل، ويُبرز تحديداً أن المراحل 2 و3 (التحقق الخبراتي والتجريبي) شرط ضروري قبل أي توصية بالتطبيق الواسع.

**الجدول (15): خارطة بحثية مرحلية لتطوير النموذج والتحقق منه**

| الحالة | المخرج المتوقع | الوصف | المرحلة |
|---|---|---|---|
| مُنجزة | نموذج مفاهيمي أولي بأربع طبقات وخمس مراحل تنفيذ، مع عتبات مقترحة غير مُختبرة | تصميم النموذج نظرياً واستقراء دروس من حالات دولية موثقة | المرحلة 1 (هذه الدراسة) |
| مُنجزة | كود Python + نتائج كمية أولية + مؤشر DRS | التنفيذ الحاسوبي للمنظومة التجريبية وقياس الأثر كمياً | المرحلة 1.5 (جديدة) |
| مقترحة (القسم 3.8) | نسخة منقّحة من النموذج وعتباته الرقمية معتمدة خبراتياً | تحقق خبراتي عبر لوحة دلفي (12–15 خبيراً، 2–3 جولات) | المرحلة 2 |
| مُصمَّمة (القسم 7) | بيانات كمية عن الجدوى والفعالية | دراسة تجريبية شبه تجريبية على 10–20 مدرسة، بعد إتمام المرحلة 2 | المرحلة 3 |
| مستقبلية | نموذج مُحسَّن قابل للتعميم عبر سياقات متنوعة | تطبيق موسّع متعدد السياقات (نامية، ومتوسطة الدخل، ومستقرة، وغير متأثرة بالنزاع) | المرحلة 4 |

| الحالة | المخرج المتوقع | الوصف | المرحلة |
|---|---|---|---|
| مستقبلية | أدلة تجريبية على العلاقة بين جودة البيانات وجودة التعليم | دراسات طولية (3–5 سنوات) لقياس الأثر بعيد المدى | المرحلة 5 |

وإلى جانب هذه الخارطة المرحلية، توصي الدراسة أيضاً بما يلي: تطوير نماذج كمية لتقدير تكلفة التحول وعائده ببيانات فعلية من تطبيقات ميدانية بدل التقديرات التوضيحية الواردة في القسم 9، ودراسة الآثار الأخلاقية والنفسية لجمع بيانات الطلاب الحساسة في سياقات النزوح والصراع، واستكشاف تقنيات الذكاء الاصطناعي المتقدمة) كـ OCRالمدعوم بالذكاء الاصطناعي (لاستخراج البيانات من النماذج الورقية الممسوحة ضوئياً بعد التأكد من جودة البيانات الأساسية، ودراسة قابلية تطبيق النموذج الهجين في قطاعات أخرى (الصحة، والخدمات الاجتماعية، والإدارة الحكومية) تواجه تحديات مماثلة في الازدواجية الورقية–الرقمية، وتوسيع عينة الحالات المستقبلية لتشمل سياقات مستقرة غير متأثرة بالنزاع ذات بنية ورقية خالصة، لتصحيح التحيز التمثيلي الحالي، وللتحقق تحديداً من فرضية أن النموذج المقترح يلبي احتياجات البيئتين معاً (بيئات الأزمات والبيئات المستقرة منخفضة الموارد) لا إحداهما فقط. وتُوصي الدراسة، بناءً على نتائج التنفيذ الحاسوبي، بأن تُوسّع الدراسات المستقبلية نطاق المنظومة التجريبية لتشمل: (1) بيانات ميدانية حقيقية من سياقات متنوعة، (2) توسيع وحدة اكتشاف الشذوذ لتشمل تقنيات تعلّم آلي إضافية، (3) تكامل المنظومة مع واجهات برمجية (APIs) لأنظمة إدارة المدارس الفعلية، و(4) اختبار المنظومة في سياقات مستقرة غير متأثرة بالنزاع لتصحيح التحيز التمثيلي الحالي.

## المراجع

[1] UNESCO, "Education Management Information Systems: Progress Assessment Tool — Methodological Guide for Educational Planners," UNESCO Publishing, Paris, 2021.

[2] UNESCO Institute for Statistics (UIS), "EMIS Buyer's Guide: A Guide to Procuring Education Management Information Systems," UIS, Montreal, 2020.

[3] Education Cannot Wait (ECW), "Strengthening Education Management Information Systems (EMIS) and Data for Increased Resilience to Crisis: Country Case Study — Palestine," ECW, New York, 2022.

[4] UNESCO, "Strengthening Education Management Information Systems in Crisis Contexts," UNESCO Publishing, Paris, 2023.

[5] UNESCO Institute for Statistics (UIS), "EMIS Assessment Framework," UIS, Montreal, 2021.

[6] World Bank, "SABER-EMIS Framework: Systems Approach for Better Education Results — Education Management Information Systems," World Bank Group, Washington, DC, 2018.

[7] D. E. Avison and G. Fitzgerald, Information Systems Development: Methodologies, Techniques and Tools, 4th ed., Maidenhead, UK: McGraw-Hill Education, 2006.

[8] Inter-American Development Bank (IDB), "Analysis of the Education Management and Information System of Jamaica: Diagnosis and Proposal for Strengthening the EMIS," IDB Publications, Washington, DC, 2020.

[9] UNICEF, "Education Management Information Systems: A Guide for Practitioners — Arabic Version," UNICEF Regional Office for Europe and Central Asia, Geneva, 2021.

[10] UNICEF, "Evaluation of UNICEF's Education Management Information Systems (EMIS) Interventions," UNICEF Evaluation Office, New York, 2020.

[11] UNESCO Institute for Statistics (UIS), "Data Quality Indicators for Education Management Information Systems," UIS, Montreal, 2022.

[12] Ed-Fi Alliance, "Ed-Fi Data Standard Documentation," Ed-Fi Alliance, Austin, TX, 2023.

[13] International Organization for Standardization (ISO), "ISO 15489-1:2016 — Information and Documentation — Records Management — Part 1: Concepts and Principles," ISO, Geneva, 2016.

[14] OpenEMIS, "OpenEMIS Implementation Strategy," OpenEMIS Initiative, 2018.

[15] World Bank, "Status of Education Management Information System: Somalia Country Report," World Bank Group, Washington, DC, 2019.

[16] World Bank, "EMIS 2.0: A Vision for the Future of Education Data Systems," World Bank Group, Washington, DC, 2023.

[17] J. P. Kotter, Leading Change, Boston, MA, USA: Harvard Business Review Press, 2012.

[18] The Institute of Internal Auditors (IIA), "The IIA's Three Lines Model," IIA, Lake Mary, FL, 2020.

[19] J. W. Creswell and C. N. Poth, Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing Among Five Approaches, 4th ed., Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2018.

[20] R. K. Yin, Case Study Research and Applications: Design and Methods, 6th ed., Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2018.

[21] Education Cannot Wait (ECW), "Strengthening Education Management Information Systems in Crisis Contexts: Palestine Case Study," ECW, New York, 2022.

[22] World Bank, "Education Management Information Systems in Fragile and Conflict-Affected States: Somalia Case Study," World Bank Group, Washington, DC, 2020.

[23] Education Cannot Wait (ECW), "Strengthening Education Management Information Systems in Crisis Contexts: Chad Case Study," ECW, New York, 2022.

[24] Inter-American Development Bank (IDB), "Diagnosis and Proposal for Strengthening the Education Management Information System in Jamaica," IDB Publications, Washington, DC, 2020.

[25] G. A. Bowen, "Document Analysis as a Qualitative Research Method," Qualitative Research Journal, vol. 9, no. 2, pp. 27–40, 2009.

[26] V. Braun and V. Clarke, "Using Thematic Analysis in Psychology," Qualitative Research in Psychology, vol. 3, no. 2, pp. 77–101, 2006.

[27] Y. S. Lincoln and E. G. Guba, Naturalistic Inquiry, Newbury Park, CA, USA: SAGE Publications, 1985.

[28] IMS Global Learning Consortium, "Caliper Analytics Specifications," IMS Global, 2023.

[29] L. Thabane et al., "A Tutorial on Pilot Studies: The What, Why and How," BMC Medical Research Methodology, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2010.

[30] M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim, and J. Neter, Applied Linear Statistical Models, 5th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2005.

[31] B. Marr, "The Cost of Digital Transformation in Education," Forbes, 2022.

[32] McKinsey & Company, "Digital Transformation Success Rates in the Public Sector," McKinsey Global Institute, 2021.

[33] OpenEMIS, "OpenEMIS: Open Source Education Management Information System," OpenEMIS Initiative, 2023.

[34] UNESCO, "Cost–Benefit Analysis of Education Information Systems," UNESCO Publishing, Paris, 2022.

[35] L. G. Tornatzky and M. Fleischer, The Processes of Technological Innovation, Lexington, MA, USA: Lexington Books, 1990.

[36] E. M. Rogers, Diffusion of Innovations, 5th ed., New York, NY, USA: Free Press, 2003.

[37] W. H. DeLone and E. R. McLean, "The DeLone and McLean Model of Information Systems Success: A Ten-Year Update," Journal of Management Information Systems, vol. 19, no. 4, pp. 9–30, 2003.

[38] A. R. Hevner, S. T. March, J. Park, and S. Ram, "Design Science in Information Systems Research," MIS Quarterly, vol. 28, no. 1, pp. 75–105, 2004.

[39] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger, and S. Chatterjee, "A Design Science Research Methodology for Information Systems Research," Journal of Management Information Systems, vol. 24, no. 3, pp. 45–77, 2007.

[40] H. A. Linstone and M. Turoff, Eds., The Delphi Method: Techniques and Applications, Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1975.

[41] F. T. Liu, K. M. Ting, and Z.-H. Zhou, "Isolation Forest," in Proc. 8th IEEE Int. Conf. Data Mining (ICDM), Pisa, Italy, 2008, pp. 413–422.

[42] W. McKinney, "Data Structures for Statistical Computing in Python," in Proc. 9th Python in Science Conf. (SciPy), Austin, TX, USA, 2010, pp. 56–61.

[43] F. Pedregosa et al., "Scikit-learn: Machine Learning in Python," Journal of Machine Learning Research, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.

[44] R. S. Kenett and G. Shmueli, Information Quality: The Potential of Data and Analytics to Generate Knowledge, Chichester, UK: Wiley, 2016.

[45] C. Batini and M. Scannapieco, Data and Information Quality: Dimensions, Principles and Techniques, Cham, Switzerland: Springer, 2016.

## ملحق A

الشيفرة مجرّدة من التعليقات اختصاراً؛ النسخة الكاملة) مع (dashboard.py في الملحق الإلكتروني.

**الملف dataset_generator.py** :مولّد البيانات المُحاكى ، يُنتج 5000 سجل مدرسي بمشكلات واقعية موثّقة في الأدبيات [16], [15] , [8] ,[2]

```
import numpy as np
import pandas as pd
from datetime import datetime, timedelta
N, SEED = 5000, 42
def build_clean(rng, n=N):
    return pd.DataFrame({
        "student_id": [f"S{10000+i}" for i in range(n)],
        "student_name": [f"Student_{i}" for i in range(n)],
        "age": rng.integers(6, 18, n),
        "grade": rng.integers(1, 13, n),
        "enrollment_date": [(datetime(2023, 9, 1) +
timedelta(days=int(d))).strftime("%Y-%m-%d")
                            for d in rng.integers(0, 60, n)],
        "attendance_rate": rng.uniform(0.5, 1.0, n).round(2),
        "math_score": rng.integers(0, 101, n).astype(float),
        "arabic_score": rng.integers(0, 101, n).astype(float),
        "submission_date": [(datetime(2024, 1, 15) +
timedelta(days=int(d))).strftime("%Y-%m-%d")
                            for d in rng.integers(0, 30, n)],
    })
def inject_defects(clean, rng):
    n, df, anomaly = len(clean), clean.copy(), np.zeros(len(clean), dtype=bool)
```

```
    pick = lambda f: rng.choice(n, int(f * n), replace=False)
    d = pick(0.04); h = len(d) // 2
    df.loc[d[h:], "student_id"] = df.loc[d[:h], "student_id"].values[:len(d) - h]
    a = pick(0.03)
    df.loc[a, "age"] = rng.choice([2, 3, 30, 45, 59], len(a)); anomaly[a] = True
    s = pick(0.015)
    df.loc[s, "math_score"] = rng.choice([-10, 150, 200], len(s)); anomaly[s] =
True
    e = pick(0.025)
    df.loc[e, "enrollment_date"] = "1990-01-01"; anomaly[e] = True
    t = pick(0.02)
    df.loc[t, "attendance_rate"] = rng.choice([0.0, 0.05, 1.5], len(t)); anomaly[t] =
True
    df.loc[pick(0.18), "submission_date"] = "2024-03-15"
    df.loc[pick(0.06), "math_score"] = np.nan
    df.loc[pick(0.06), "attendance_rate"] = np.nan
    df.loc[pick(0.05), ["math_score", "arabic_score", "attendance_rate"]] = np.nan
    nm = pick(0.06)
    df.loc[nm, "student_name"] = df.loc[nm, "student_name"].str.lower() + " "
    df["true_anomaly"] = anomaly
    return df
```

2. **الملف dq_engine.py** : محرك جودة البيانات

```
import numpy as np
import pandas as pd
DEADLINE = pd.Timestamp("2024-02-15")
REQUIRED = ["student_id", "student_name", "age", "grade"]
```

```
ALL_FIELDS = REQUIRED + ["math_score", "arabic_score", "attendance_rate",
                         "enrollment_date", "submission_date"]
def _valid(df):
    enr = pd.to_datetime(df["enrollment_date"], errors="coerce")
    name = df["student_name"]
    return pd.DataFrame({
        "age": df["age"].between(4, 25) | df["age"].isna(),
        "math": df["math_score"].between(0, 100) | df["math_score"].isna(),
        "arabic": df["arabic_score"].between(0, 100) | df["arabic_score"].isna(),
        "att": df["attendance_rate"].between(0, 1) | df["attendance_rate"].isna(),
        "enroll": (enr >= "2023-08-01") | enr.isna(),
        "name": name.isna() | ((name == name.str.strip()) &
name.str[:1].str.isupper()),
    })
def compute_completeness(df):
    return round(100 * df[ALL_FIELDS].notna().all(axis=1).mean(), 2)
def compute_accuracy(df):
    return round(100 * _valid(df).all(axis=1).mean(), 2)
def compute_timeliness(df):
    return round(100 * (pd.to_datetime(df["submission_date"], errors="coerce")
<= DEADLINE).mean(), 2)
def compute_availability(df):
    return round(100 * (df[REQUIRED].notna().all(axis=1) &
~df["student_id"].duplicated(keep=False)).mean(), 2)
def compute_relevance(df):
    v = _valid(df)
```

```
    s = (df["math_score"].notna() & v["math"]) | (df["arabic_score"].notna() &
v["arabic"])
    return round(100 * (df["attendance_rate"].notna() & v["att"] & s).mean(), 2)
def duplication_rate(df): return 100 * df["student_id"].duplicated().mean()
def missing_rate(df):     return 100 * df[ALL_FIELDS].isna().mean().mean()
def error_rate(df):       return 100 * (~_valid(df).all(axis=1)).mean()
def overall_quality(df):
    scores = {"completeness": compute_completeness(df), "accuracy":
compute_accuracy(df),
              "timeliness": compute_timeliness(df), "availability":
compute_availability(df),
              "relevance": compute_relevance(df)}
    scores["overall"] = round(float(np.mean(list(scores.values()))), 2)
    return scores
```

3. **الملف anomaly_detector.py** : وحدة اكتشاف الشذوذ

```
import pandas as pd
from sklearn.ensemble import IsolationForest
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.metrics import precision_score, recall_score, f1_score
def detect_anomalies(df, contamination=0.08):
    X = df[["age", "math_score", "arabic_score", "attendance_rate"]].copy()
    X["enroll_year"] = pd.to_datetime(df["enrollment_date"],
errors="coerce").dt.year
    X_scaled = StandardScaler().fit_transform(X.fillna(X.median()))
    model = IsolationForest(n_estimators=100, contamination=contamination,
                            random_state=42, n_jobs=-1)
```

```
    df = df.copy(); df["anomaly"] = model.fit_predict(X_scaled)
    df["anomaly_score"] = model.decision_function(X_scaled)
    return df
def evaluate(df):
    y, p = df["true_anomaly"], df["anomaly"] == -1
    return {"flagged": int(p.sum()), "injected": int(y.sum()),
            "precision": round(precision_score(y, p), 2),
            "recall": round(recall_score(y, p), 2), "f1": round(f1_score(y, p), 2)}
```

**4. الملف transition_algorithm.py:** خوارزمية قرار الانتقال

```
import pandas as pd
from dq_engine import overall_quality
WEIGHTS = {"completeness": 0.25, "accuracy": 0.25, "timeliness": 0.20,
           "availability": 0.15, "relevance": 0.15}
THRESHOLDS = {1: 50, 2: 65, 3: 75, 4: 85}
GATES = {3: {"completeness": 90, "accuracy": 95, "timeliness": 85},
         5: {"completeness": 98, "accuracy": 98, "timeliness": 95}}
def compute_drs(scores, w=WEIGHTS): return round(sum(scores[k] * w[k] for
k in w), 2)
def gate_failures(scores, stage):
    return [k for k, v in GATES.get(stage, {}).items() if scores[k] < v]
def decide_transition(scores, stage):
    drs, fails = compute_drs(scores), gate_failures(scores, stage + 1)
    if drs < THRESHOLDS[stage] - 15: return "pause and reassess"
    if drs >= THRESHOLDS[stage] and not fails: return f"advance to stage
{stage + 1}"
```

```
    return "stay in current stage" + (f" (unmet gates: {', '.join(fails)})" if fails else
"")
def sensitivity(scores, delta=0.05):
    out = []
    for k in WEIGHTS:
        for s in (-delta, delta):
            w = {**WEIGHTS, k: WEIGHTS[k] + s}; tot = sum(w.values())
            out.append(compute_drs(scores, {a: b / tot for a, b in w.items()}))
    return min(out), max(out)
```

**5. الملف hybrid_simulation.py**: وحدة محاكاة النماذج الثلاثة (معدلات حلّ العيوب افتراضية)

```
import numpy as np
PARAMS = {
    "paper":   dict(p_valid=0.00, p_missing=0.00, p_late=0.00, entry_sec=45,
report_min=180),
    "hybrid":  dict(p_valid=0.80, p_missing=0.70, p_late=0.50, entry_sec=28,
report_min=95),
    "digital": dict(p_valid=0.95, p_missing=0.90, p_late=0.80, entry_sec=20,
report_min=30),
}
FIELDS = ["student_id", "student_name", "age", "grade", "enrollment_date",
          "attendance_rate", "math_score", "arabic_score", "submission_date"]
def _bad(clean, df, c): return ~((df[c] == clean[c]) | (df[c].isna() &
clean[c].isna()))
def simulate(clean, paper, model, rng, override=None):
    p = {**PARAMS[model], **(override or {})}
    out = paper.copy()
```

```
    for c in FIELDS:
        bad = _bad(clean, out, c)
        miss, late = bad & out[c].isna(), bad & (c == "submission_date")
        prob = np.where(miss, p["p_missing"], np.where(late, p["p_late"],
p["p_valid"]))
        fix = (rng.random(len(out)) < prob) & bad
        out.loc[fix, c] = clean.loc[fix, c]
    return out
def correction_cost(clean, df):
    return sum(int(_bad(clean, df, c).sum()) for c in FIELDS) + 2 *
int(df["student_id"].duplicated().sum())
```

**6. الملف run_all.py**: ملف التشغيل (يُنتج الجدولين 9 و10)

```
import numpy as np
import dataset_generator as dg, dq_engine as q, hybrid_simulation as hs
import transition_algorithm as ta, anomaly_detector as ad
rng = np.random.default_rng(dg.SEED)
clean = dg.build_clean(rng); paper = dg.inject_defects(clean, rng)
results = {}
for m in ["paper", "hybrid", "digital"]:
    df = paper if m == "paper" else hs.simulate(clean, paper, m,
np.random.default_rng(dg.SEED + 1))
    s = q.overall_quality(df)
    results[m] = dict(entry=hs.PARAMS[m]["entry_sec"], error=q.error_rate(df),
                      missing=q.missing_rate(df), dup=q.duplication_rate(df),
                      report=hs.PARAMS[m]["report_min"],
cost=hs.correction_cost(clean, df),
```

```
                scores=s, drs=ta.compute_drs(s))
base = results["paper"]["cost"]
for m, r in results.items():
    r["cost_idx"] = 100 * r["cost"] / base
    print(m, {k: (round(v, 2) if not isinstance(v, dict) else v) for k, v in r.items()})
    for st in (2, 4):
        print("  stage", st, "->", ta.decide_transition(r["scores"], st))
print("DRS sensitivity (hybrid):", ta.sensitivity(results["hybrid"]["scores"]))
print("anomaly detection:", ad.evaluate(ad.detect_anomalies(paper)))
```

# نموذج ضبابي لتحليل بيانات سلوك العملاء وتصنيفهم في بيئة التجارة الإلكترونية

A fuzzy model for analyzing and classifying customer behavior data in an e-commerce environment.

د. محمّد حجّوز

**الملخص**

نظراً لكثرة مواقع التواصل الاجتماعي ومواقع الشراء الإلكتروني وما ينتج عنه من بيانات ضخمة، كانت الحاجة ماسة لاعتماد مجال تعلم الآلي والمعالجة الألية للغات الطبيعية، وذلك من أجل تنظيم ما يتم تداوله على هذه المواقع ومعالجتها بأقل وقت وجهد ممكنين.

وللحاجة لدراسة تحليل المشاعر والعواطف والأراء بهدف بناء نظام يقوم على تحليل ما يكتبه الناس للتعبير عن أرائهم بصور نصية أو من خلال التغريدات أو من خلال الرسوم التعبيرية.

ومن خلال دراسات سابقة تقوم على تقييم العملاء كما في الأنظمة الناصحة بالتجارة الالكترونية. وتحليل سلة المشتريات واختيار العميل لأصناف المنتجات ومسار التنقل بينها، والأبحاث التي تركز على التقنيات والخوارزميات المستخدمة في عملية التنبؤ بشكل أكبر وذلك في محاولة لتحسين دقة التنبؤ.

قمنا بهذا البحث بتحديد السلوكيات المعقدة للعميل من خلال السماح بالانتماء الجزئي لمجموعات متعددة، مما يعكس الواقع بشكل أفضل (حيث يمكن أن يكون للعميل أكثر من فئة سلوكية).

وتم استخدام التجميع الضبابي (خوارزمية FCM) مع عامل زمن التصفح والحسميات وحساب المعامل Feature الجديد الذي يعتمد على عدة عوامل، مع الأخذ بعين الاعتبار ولاء العميل وفهم سلوكه والتنبؤ به لمعرفة العملاء الذين يقومون بعملية التصفح فقط دون الشراء أو الذين يقومون بعملية الشراء فورا.

**الكلمات المفتاحية:**

Fuzzy-C-Means التجميع الضبابي، Silhouette Score مقياس سوليت، Partition Coefficient معامل التقسيم.

**Abstract**

Given the proliferation of social media and e-commerce platforms, and the resulting massive amounts of data, there is a pressing need to adopt machine learning and natural language processing (NLP) to organize and process the content shared on these platforms with minimal time and effort.

There is also a need to study sentiment analysis and opinion analysis to build a system that analyzes what people write to express their opinions, whether through text, tweets, or emojis.

Previous studies have focused on customer evaluation, as seen in e-commerce advisory systems. These studies analyze shopping carts, customer product selection, and navigation patterns, and research has further emphasized the technologies and algorithms used in prediction processes to improve prediction accuracy. In this research, we identified the complex behaviors of customers by allowing partial affiliation to multiple groups, which better reflects reality (where the customer is in more than one behavioral category). We used fuzzy clustering (FCM algorithm) and took into account the browsing time factor, discounts, and the calculation of the new Feature parameter, which depends on several factors, taking into account customer loyalty, understanding their behavior, and predicting it to know which customers only browse without buying or who make a purchase immediately.

**Key Words:**

Fuzzy-C-Means (FCM), Silhouette Score, Partition Coefficient

## 1 مقدمة:

مع ازدياد حجم البيانات على كافة الأصعدة والوصول بها إلى حجم البيانات الضخمة، ومع تطور أدوات الشبكة وظهور مواقع التواصل الاجتماعي والمنتديات ومواقع البيع والشراء الإلكتروني وغيرها، ظهرت الحاجة ماسة لاعتماد مجال تعلم الآلي والمعالجة الألية للغات الطبيعية، من أجل تنظيم ما يتم تداوله على هذه المواقع ومعالجتها بأقل وقت وجهد. وظهرت الحاجة أيضاً إلى دراسة تحليل المشاعر والعواطف والأراء بهدف بناء نظام يقوم على تحليل ما يكتبه الناس للتعبير عن أرائهم بصور نصية أو من خلال التغريدات أو من خلال الرسوم التعبيرية.

ساهمت علوم الذكاء الإصطناعي والتعلم الآلي والتعلم العميق في حل تطبيقات عديدة في مجال معالجة اللغات الطبيعية على مستوى كبير من الاهتمام للمساهمة في خدمة البشرية وفي التعامل مع وسائل التكنولوجيا ومعرفة التوجهات وسلوك الأفراد.

## 2- مشكلة البحث

تتمثل المشكلة العلمية في أن بيانات سلوك العملاء في بيئة التجارة الإلكترونية تتسم بالتعقيد والتنوع وعدم اليقين، نتيجة اختلاف أنماط التصفح والشراء والتفاعل مع المنتجات، إضافة إلى وجود تداخل بين خصائص العملاء وعدم وجود حدود واضحة تفصل بين الفئات السلوكية المختلفة. وهذا يجعل تصنيف العملاء باستخدام الأساليب التقليدية القائمة على الحدود الحادة أقل قدرة على تمثيل السلوك الحقيقي للعميل. ومن هنا تظهر الحاجة إلى تطوير نموذج يعتمد على المنطق الضبابي، بما يسمح بتمثيل درجة انتماء العميل إلى أكثر من نمط أو فئة سلوكية، وتحليل سلوكه بصورة أكثر مرونة ودقة. تواجه الشركات التجارية التحديات الجمّة في استهداف العملاء وجذبهم ليكونوا زبائن دائمين ومخلصين، وهذا يتطلب تحليل سلوك العميل المتبع قبل الوصول إلى عملية الشراء لكسب رضا العملاء وفهم احتياجاته وتوفير خدمات مخصصة لهم.

لهذا لا بد من إجراء تحليل فترات الدخول ومعدل الارتداد ومعرفة الصفحات المفضلة للزوار وفهم سلوك الزائر وتجربته على الموقع وهذا ما يسمى (تحليلات الويب) أو تحليل السلوك على الانترنت من خلال تحليل التفاعلات والاهتمامات والتعليقات والتغريدات على توتير (**X**).

**3- أهمية البحث:**

إن عملية تحليل بيانات سلوك العميل تُحسّن من مستوى الأعمال، ويمكن أن تكشف عن معلومات مخفية مثل تفضيلات العملاء والصفحات الشائعة على موقع الويب والوقت الذي يقضيه العملاء في التصفح وتعليقات العملاء والتفاعل مع نماذج مواقع الويب وهذا يُمكّن الشركات من الاستجابة بكفاءة لاحتياجات العملاء وزيادة مستوى الرضا لديهم.

**4- هدف البحث:**

تسعى الشركات إلى جذب العملاء لشراء منتجاتها من خلال مواقع التجارة الالكترونية من خلال تحديد (معرفة) السلوك المتبع للعميل قبل عملية الشراء باستخدام تقنيات تحليل البيانات والتعلم الالي. ويهدف هذا البحث إلى معرفة المجموعات السلوكية الرئيسية للعملاء التي تكشف عنها FCM، ومعالجة المجموعات المتداخلة، والمعالجة العلمية للنتائج واتخاذ القرارات التسويقية.

**5- الدراسات السابقة:**

العديد من الأبحاث والدراسات ساهمت بتقديم كم هائل من المعلومات والخبرات التي تُمكّن الباحثين من الحصول على معرفة شاملة حول مواضيع مُحدَّدة، ومن هذه الدراسات نذكر بعض الدراسات على النحو الأتي:

**5-1 استخدام الذكاء الاصطناعي في تحسين إدارة علاقات العملاء:**[1]

**Customer relationship management through artificial intelligence technologies**

نشر الباحثون Zahra Sabila Nugraha و Maulana Asykari Muhammad و Bayu Waspodo هذا البحث قي مجلة جامعة Syarif Hidayatullah في اندوسيا بالعام 2024، وركّزت الدراسة على إدارة علاقات العملاء الاستراتيجية للحفاظ عليهم. واعتمدت على دمج الذكاء الاصطناعي وإدارة علاقات العملاء والبيانات الضخمة لمواجهة تحديات الأعمال الحديثة في عصر التحول الرقمي. تُظهر نتائج هذه الدراسة أن التعلم الخاضع للإشراف لا يزال أكثر تقنيات الذكاء الاصطناعي استخدامًا، بينما شهد التعلم العميق نموًا ملحوظًا في السنوات الأخيرة، مما يشير إلى التحول نحو حلول أكثر تطورًا لإدارة علاقات العملاء، لاسيما في التنبؤ بعزوف العملاء، وتقسيمهم، وتخصيص خدماتهم. لكن لم توضح هذه الدراسة السلوكيات المعقدة للعملاء عندما ينتمون وبشكل جزئي لعدة مجموعات.

**2-5 دراسة تحليلية للعوامل المؤثرة على القيمة الدائمة للعميل وفق نموذج RFM (Recency, Frequency, and Monetary):**[2]

**An analytical study of the factors influencing the customer's future vision according to the RFM model.**

قام بهذه الدراسة كل من T Balhaj و S Kwat في معهد Institute of Economic, Commercial and Management Sciences في الجزائر بعام 2023، وتعتمد على إدارة علاقات العملاء بشكل كبير على مقياس القيمة الدائمة للعميل في تقسيم العملاء على أساس ربحهم وتهدف هذه الدراسة إلى اختبار مدى كفاءة نموذج RFM المدمج مع تقنيات التنقيب في البيانات وهذه الدراسة تعطي معلومات حول العوامل التي تتحكم في القيمة الدائمة للعميل. لكن لم توضح هذه الدراسة السلوكيات المعقدة للعملاء عندما ينتمون وبشكل جزئي لعدة مجموعات.

**3-5 الذكاء الاصطناعي في إدارة علاقات العملاء: إطار عمل منهجي لتحقيق التكامل الناجح:**[3]

**Artificial intelligence in customer relationship management: A systematic framework for a successful integration**

قام بهذه الدراسة كل من Cristina Ledro و Anna Nosella و Ilaria Dalla Pozza و Andrea Vinelli و Thomas Souverain وتم نشرها في مجلة Journal of Business Research بالعدد 199 بشهر تشرين الأول من العام 2025، وتقدم هذه الدراسة إطارًا منهجيًا لدمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة علاقات العملاء، مع التركيز على الجوانب التنظيمية والتقنية والأخلاقية اللازمة لنجاح هذا التكامل. إلا أن تركيزها ينصب بصورة أساسية على **إطار دمج الذكاء الاصطناعي في إدارة علاقات العملاء**، ولم تتناول بصورة مباشرة مشكلة **التداخل بين الأنماط السلوكية للعملاء عند تحليل بياناتهم وتصنيفهم**، كما لم تبحث في إمكانية تمثيل العميل بدرجات انتماء متفاوتة إلى أكثر من مجموعة سلوكية في الوقت نفسه. وتمثل هذه النقطة فجوة يمكن معالجتها من خلال بحثنا، الذي يقترح استخدام **نموذج ضبابي لتحليل بيانات سلوك العملاء وتصنيفهم**، بما يسمح بالتعامل مع الحدود غير الواضحة بين الفئات السلوكية وتمثيل درجة انتماء العميل إلى كل فئة بصورة أكثر مرونة.

**6- التنقيب في البيانات والتعلم الآلي:**

يُعد اكتشاف الأنماط والمعرفة الكامنة في البيانات من الممارسات التي رافقت تطور عملية تحليل المعلومات منذ وقت مبكر، إلا أن ظهور الحواسيب وتطور قدراتها الحاسوبية وزيادة إمكانات التخزين أسهما في الانتقال من الأساليب اليدوية إلى أساليب آلية أكثر كفاءة في معالجة كميات كبيرة من البيانات وتحليلها. وقد أدى ذلك إلى تطور مجموعة واسعة من الأساليب والتقنيات التي تهدف إلى استخراج المعرفة ذات القيمة من البيانات واكتشاف العلاقات والأنماط غير الظاهرة فيها. ويُعرف التنقيب في البيانات بأنه مجموعة من الأساليب التي تُستخدم لاكتشاف الأنماط والمعارف المخفية في مجموعات البيانات الكبيرة، وتحويل البيانات الخام إلى معلومات يمكن الاستفادة منها في التحليل واتخاذ القرار.[4]

وتتعدد تطبيقات التنقيب في البيانات تبعًا لطبيعة البيانات والمشكلة المراد تحليلها؛ فمنها التنقيب في النصوص والمشاعر الذي يركز على تحليل الكلمات والعبارات واكتشاف العلاقات الدلالية والأنماط المتشابهة داخل البيانات النصية، ومنها التنقيب في السلاسل الزمنية الذي يهتم بتحليل البيانات المرتبطة بالزمن والاستفادة من الأنماط السابقة في التنبؤ بالقيم أو الأحداث المستقبلية، مثل التنبؤ باتجاهات أسعار الأسهم أو توقعات حالة الطقس. [5][6]

### 7-النظم الناصحة Recommendation System:

تلعب النظم الناصحة دوراً محورياً في تحسين تجربة المستخدم وزيادة المبيعات في منصات التجارة الالكترونية، ولها دوراً مهماً وهو تقديم النصائح للمساعدة في إيجاد ما نحتاج إليه وتزويد المستخدمين باقتراحات عن العناصر والسلع لكي يتم استخدامها. تعتمد هذه الأنظمة على خوارزميات ذكية لتحليل سلوك المستخدمين وتقديم منتجات أو خدمات تلائم تفضيلاتهم من أشهر هذه الخوارزمية التصفية التعاونية Collaborative Filtering (CF) والتي تعمل على إيجاد تقييمات المستخدمين لمنتجات قد يفضلونها كما أن خوارزميات التعلم الآلي الخاضعة للإشراف التنبُّؤية تشبه النظم الناصحة المعتمدة على التصفية التعاونية CF وذلك عندما تكون طبيعة الهدف عبارة عن قيم عددية مستمرة Continuous، ولتدريبهما نقوم بتقسيم مجموعة معطيات إلى مجموعتين: مجموعة للتدريب والأُخرى لاختبار العيِّنات، ومن ثَمَّ إيجاد البارامترات للنموذج الذي يتم تدريبه بحيث يقدم أفضل النتائج.[7][8]

### 8-١ Clustering

تعتبر خوارزميات التعلم غير الخاضع للإشراف (Unsupervised Learning) إحدى فروع التعلم الآلي الذي يهدف إلى اكتشاف أنماط أو تراكيب خفية في البيانات دون الاعتماد على تسميات مسبقة. واكتشاف

أنماط في البيانات غير المصنفة. يعتمد الذكاء الاصطناعي بشكل كبير على هذه الخوارزميات لتحويل البيانات الخام إلى رؤى قابلة للتنفيذ سواء في القطاعات الصحية أو التجارية أو التكنولوجية.[8]

**9- التجميع الضبابي:**

التجميع الضبابي هو إحدى تقنيات التجميع في التعلم الآلي التي تسمح بنقاط البيانات بالانتماء إلى أكثر من مجموعة واحدة بنسب متفاوتة، بدلاً من الانتماء الحصري لمجموعة واحدة كما في K-Means ومن أهم خوارزميات التجميع الضبابي (Fuzzy Cluster –c–Mean ).

**1- Fuzzy Cluster - c–Mean:**

تفيد هذه الخوارزمية بشكل خاص في تحليل سلوك العملاء، حيث يمكن أن يكون للعميل سمات متعددة تجعله ينتمي إلى أكثر من مجموعة سلوكية في نفس الوقت وتعتبر FCM أداة قوية في التعلم غير الخاضع للإشراف، وخاصة في السياقات التي تتطلب مرونة في تحديد انتماء البيانات. والتفاعل مع التطبيقات (مثل الوقت المستغرق، الصفحات التي تمت زيارتها) والتسويق الشخصي مثل إرسال إشعارات مخصصة بناء على درجات العضوية في الكتل.[8]

- **خوارزمية FCM:** تمتلك هذه الخوارزمية المنهجية الآتية:

1-تهيئة أولية: اختيار عشوائي لمراكز الكتل.

2-حساب درجات العضوية: تحدد درجة انتماء كل نقطة بيانات لكل كتلة باستخدام دالة رياضية تعتمد على حساب المسافة بين النقطة ومركز الكتل و دالة الهدف من خلال العلاقة الرياضية:

$$j = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{c} u_{ij}^{m}.\left\|x_i - u_j\right\|^2$$

Uij: درجة العضوية للنقطة i في الكتلة j .

M : معامل الضبابية.

Vj: مركز الكتلة j.

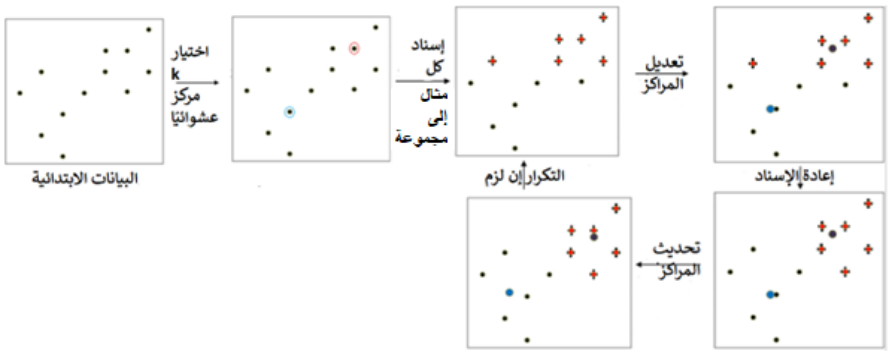
يتم تحديث درجات العضوية من خلال الدالة:

$$U_{ij=}\frac{1}{\sum_{k-1}^{c}\left(\frac{\left|x_i-u_j\right\|}{\left\|x_i-v_k\right\|}\right)^{2/(m-1)}}$$

3- تحديث المراكز: إعادة حساب مراكز الكتل بناء على متوسط النقاط المرجح بدرجات العضوية

$$u_j = \frac{\sum_{i-1}^{n} u_{ji}^{m} . x_i}{\sum_{i-1}^{n} u_{ji}^{m}}$$

4-التكرار: تتكرر الخطوتان السابقتان حتى تحقيق التقارب (عدم تغيير كبير في المراكز أو درجات العضوية والشكل الأتي يوضح المراحل:




الشّكل( 2) مراحل عمل خوارزمية التجميع الضبابي

من أهم ميزات هذه الخوارزمية المرونة، أنها تتعامل مع البيانات المتداخلة بشكل أفضل من الخوارزميات التقليدية وكذلك قليلة الحساسية للقيم الشاذة بسبب استخدام درجات العضوية، وتتميز بدقتها العالية وتساعد في تحديد الأنماط المخفية في البيانات التي قد تعجز عنها الخوارزميات التقليدية، كما تمكن الشركات من تصميم حملات تسويقية أكثر تخصيصا بناء على درجات الانتماء للعملاء. ومن مساوئها أنها حساسة للتهيئة الأولية لأن النتائج تعتمد على الاختيار العشوائي لمركز الكتل الأولية وعمليات التكرار، وتحديث العضوية يستهلك موارد كبيرة مع البيانات الكبيرة. [8]

ومن تطبيقات خوارزمية FCM استخدامها في تجميع العملاء بناء على أنماط الشراء، وتحديد مجموعات ذات تفضيلات متشابهة، والتفاعل مع التطبيقات من خلال تحليل سلوك المستخدمين (مثل الوقت المستغرق، الصفحات التي تمت زيارتها) وغيرها من الاستخدامات.

**10- دراسة سلوك العميل:**

تعتمد دراسة سلوك العميل على تحليل مجموعة من العوامل التي تساعد على فهم احتياجاته وتفضيلاته، وأنماط تفاعله مع المنتجات أو الخدمات، يتم من خلال جمع البيانات عبر استطلاعات الرأي وتحليل سجل المشتريات وتتبع النشاط الرقمي. ثم استخدام تقنيات التحليل مثل استخدام خوارزمية FCM لتقسيم العملاء

إلى مجموعات متشابهة.

ومنأهم عوامل دراسة سلوك العميل هي العوامل الديموغرافية Demographic Factor كالعمر والجنس والدخل والحالة الاجتماعية والمستوى التعليمي، والجغرافية Geographic Factors كموقع العميل وبيئته ومناخه، والعوامل الاقتصادية Economic Factors والتي ترتبط بالوضع المادي للعميل والذي تؤثر على قدرته الشرائية. كما هناك مؤثرات أخرى كعوامل السلوك الشرائي Purchasing Behavior فهل الشراء يتم بشكل يومي أو أسبوعي أو موسمي وذلك يساعد في تحديد العملاء المخلصين، ومستوى الإنفاق: (منخفض، متوسط. مرتفع) يحدد شرائح العملاء ذات الأولوية، ونوعية المنتجات المفضلة لديهم (فاخرة أو اقتصادية)، وتحديد قنوات الشراء هل هي من خلال متجر فعلي أم موقع الكتروني أم تطبيق جوال.

إن دراسة العوامل السابقة تفيد في تخصيص العروض من خلال تصميم حملات تسويقية تلائم كل شريحة، وتحسين خدمة العميل من خلال توقع احتياجاته قبل الطلب، وزيادة الولاء للعلامة، وبناء علاقات طويلة الأمد عبر فهم عميق لتفضيلات العميل، بالتالي إن الجمع بين هذه العوامل يتيح رؤية شاملة لسلوك العميل مما يساعد الشركات على اتخاذ قرارات استراتيجية ذكية.

## 11- التطبيق العملي:

من أجل إجراء تحليل سلوك العملاء باستخدام خوارزمية FCM تم استخدام جهاز حاسوب بمعالج Intel Core i7 جيل عاشر وذاكرة 16GB RAM وقرص صلب SSD بسعة 256GB لتحميل البيانات ومعالجتها بسرعة ونظام التشغيل WIDOWS10 يدعم جميع مكتبات لغة البرمجة بايثون PYTHON.

كما تم استخدام بيئة العمل Visual Studio Code Editor وربطها مع لغة بايثون مع أهم الإضافات Extensions لتحليل البيانات وللتنبؤ بالأخطاء وتحسين الأداء.

### 11-1 قاعدة بيانات سلوك الشراء عند العملاء Dataset:

لإنجاز البحث استُخدمت مجموعة البيانات DataSet الشهيرة في دراسة سلوك الشراء عند العملاء من الموقع www.Kaggle.com وتضم هذه البيانات 3,900 سجلا، وتحتوي على الواصفات الآتية: ( العمر، الجنس، الدخل السنوي، وعدد المشتريات، وفئة المنتج، الوقت المقضي، والولاء للبرنامج، عدد حسميات العميل، وحالة الشراء. وأُنشئت لمحاكاة سلوك التسوق الحقيقي لأغراض التعلم والتحليل، وهي موجودة في الملف customer_purchase_data.csv، وتوضح البيانات الآتية جزءا من هذه القاعدة:

customer_purchase_data.csv

```
Age,Gender,AnnualIncome,NumberOfPurchases,ProductCategory,TimeSpentOnWebsite,LoyaltyProgram,DiscountsAvailed
40,1,66120.26793867795,8,0,30.56860115599193,0,5,1
20,1,23579.773583030514,4,2,38.240096605544196,0,5,0
27,1,127821.3064316501,11,2,31.633211501604148,1,0,1
24,1,137798.62311954965,19,3,46.167058811662955,0,4,1
31,1,99300.96422033315,19,1,19.823591862495636,0,0,1
66,1,37758.11747465244,14,4,17.827492934546594,0,2,0
39,1,126883.38528613503,16,3,42.085383519448804,1,4,1
64,1,39707.35972401292,13,2,17.190291539022134,1,0,0
43,0,102797.30126911662,20,1,6.023474556808846,0,3,0
20,1,63854.92107998205,16,0,38.57246639277682,0,5,1
66,1,66199.99392914612,11,1,1.4155319628243697,1,5,1
70,1,83556.71813301867,11,2,42.173999325776514,0,4,1
54,0,114467.22896914203,9,2,17.626043673393056,1,5,1
64,1,31880.893223130934,17,0,22.753472516233717,1,1,0
19,1,107485.66091127621,7,1,28.26032122753378,1,4,1
70,1,67049.59880892246,2,4,21.895097608810204,0,0,0
51,1,129174.20886637547,13,4,21.808776090014348,0,0,1
18,1,128374.49505188613,0,2,16.768262423676642,0,4,0
57,0,71740.68808408537,12,2,40.696727424926970,2,0
```

الشّكل(3) قاعدة بيانات Kaggle

تتضمن البيانات الواصفات الآتية:

العمر: Age، الجنس Gender ويأخذ قيماً ثنائية {1,0}، الدخل السنوي Annual Income، وعدد المشتريات Number Of Purchases يوضح مدى نشاط العميل في إجراء عمليات شراء، وفئة المنتج product Category وتتضمن (0:electronics 1:clothes, 2:homeGoods, 3:beauty, 4:sports)، الوقت المقضي على الموقع (بالدقائق) Time spent on web site يعكس مدى اهتمام العميل بالمنتجات أو الخدمات، والولاء للبرنامج Loyalty Program يأخذ قيمة (0:No, 1:yes) يشير إلى التزام العميل بالعلامة التجارية أو البرنامج، عدد حسميات العميل discount Availed وتأخذ قيم ضمن المجال يعكس مدى استجابة العميل للعروض والحسميات، وحالة الشراء Purchase Status يشير إذا تم الشراء أم لا.

إن الهدف من البحث هو تحليل سلوك العميل قبل الشراء وتصنيفهم إلى مجموعات، لذلك سوف نقوم باختيار الواصفات الأكثر تأثيراً والتي تعطي رؤية شاملة لسلوك العميل وتسمح بالتجميع ذو المعنى. لهذا يجب أن تكون الواصفات متنوعة لتغطية جوانب مختلفة من السلوك.

ومن الواصفات الأساسية والمشتقة التي اخترناها بعد دراسة وتحليل البيانات الموجودة في الـ dataset هي واصفة الولاء للمنتج الذي يكون عامل مهم لبعض العملاء في هذه الدراسة. والواصفة فئة المنتج، وتم التركيز على واصفة زمن التصفح للموقع لمعرفة فيما إذا كان العميل يقوم بعملية تصفح أو يقوم بعملية شراء، والواصفة عدد مرات الشراء الذي يوضح نشاط العميل، وواصفة الحسميات التي من الممكن أن تكون عامل مهم لجذب العميل، وتم أخذ النسب لهذه الواصفات على النحو الأتي:

1-نسبة الشراء إلى زمن التصفح Number of purchase / time spent of website:

(معدل الشراء) وهي نسبة عدد مرات الشراء التي أجراها العميل على الوقت الإجمالي الذي قضاه على الموقع، تعكس هذه النسبة عمليات الشراء للعميل إذا كانت تتم بسرعة (مثال: 5 مشتريات في 10 دقائق) وهي تشير إلى معرفة مسبقة بالمنتج المطلوب، أو هدف محدد من الزيارة (شراء سريع دون تصفح) وعندما تكون النسبة منخفضة هذا يعني أن العميل يتصفح لفترة طويلة مع مشتريات قليلة (تصفح للمقارنة بين المنتجات)، ومن خلال هذه النسبة (معدل الشراء) يمكن تحديد العملاء الحاسمين (ذوي النسبة العالية) مقابل المترددين (ذوي النسبة المنخفضة). وكذلك تحسين تجربة المستخدم بأن العملاء ذوي النسبة المنخفضة، قد يحتاجون إلى تبسيط عملية الشراء أو تقديم توصيات مخصصة لهم.

2-معدل استخدام الحسميات Discount Availed/Number of Purchase:

وهي نسبة عدد المرات التي استخدم فيها العميل الحسميات وإجمالي مشترياته، وعندما تكون النسبة عالية أي قريبة من 1 فهذا يعني أن العميل يستخدم الحسميات في كل عملية شراء تقريبا. وهذا يدل على حساسية عالية للسعر والاعتماد على العروض لاتخاذ قرار الشراء. وإذا كانت النسبة منخفضة أي قريبة من 0 فهذا يعني أن العميل نادرا ما يستخدم الحسميات وهذا يدل إلى أن العميل لديه ولاء للعلامة التجارية (لا يحتاج إلى عروض للشراء) ووليس لديه اهتمام بالحسميات، من هنا يمكن تصنيف العملاء إلى: "صائدو العروض" (نسبة عالية) و"المخلصون" (نسبة منخفضة).

## 2-11 خطوات العمل:

### 1- تحضير البيانات:

يجب تنظيف البيانات ومعالجة القيم المفقودة وتوحيد المقاييس إذا لزم الأمر، على سبيل المثال واصفة العمر والدخل السنوي لها نطاقات مختلفة لذا نحتاج إلى تطبيعها حتى لا تطغى إحدى الواصفات على الأخرى في عملية التجميع. ربما نحتاج إلى استبعاد بعض الواصفات التي لا تساهم في التجميع أو تحويلها إلى قيم مناسبة للخوارزمية. والتأكد من عدم وجود قيم مفقودة أو شاذة مثل الدخل السنوي (القيم السالبة) تعويض القيم المفقودة في الأعمدة الرقمية ومعالجة القيم الشاذة تحويل الأعمدة الفئوية إلى ترميز One-Hot في لغة بايثون يمكن استخدام مكتبة Sklearn-Fuzzy، Scikit-Fuzzy لأنها توفر أدوات لتنفيذ خوارزميات التجميع الضبابي Fuzzy-C-Means (FCM).

يوضح والكود الآتي مرحلة تنظيف البيانات:

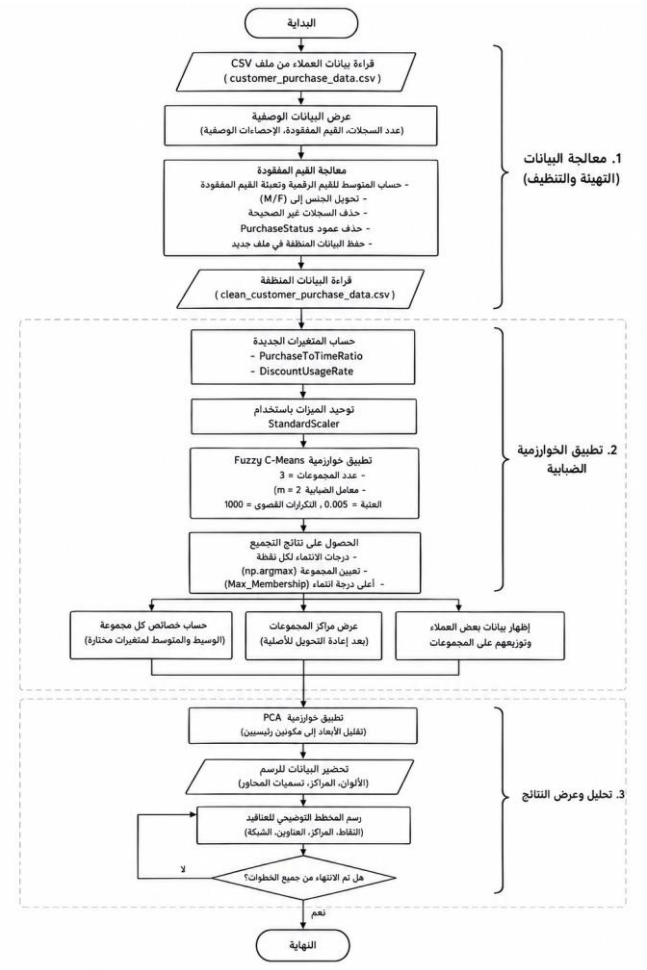
```
import pandas as pd
from sklearn.preprocessing import LabelEncoder
df=pd.read_csv("customer_purchase_data.csv")
print(df)
print(df.describe())
#عرض عدد القيم المفقودة في كل عمود
print (df.isnull().sum())
numeric_columns=df[['PurchaseStatus','DiscountsAvailed','LoyaltyProgram','Time
SpentOnWebsite','NumberOfPurchases']]
for col in numeric_columns:
    df[col].fillna(value=df[col].mean,inplace=True)
df['Gender']=df['Gender'].map({1:'M',0:'F'})
df=df[(df['Age']>0)&(df['AnnualIncome']>0&(df['NumberOfPurchases']>0))]
df=df.drop('PurchaseStatus',axis=1)
df.to_csv('clean_customer_purchase_data.csv',index=True)
print(df.head()
```

إن الخوارزمية حساسة لمقاييس البيانات حيث نقوم بتطبيع الواصفات الرقمية مثل (العمر، الدخل السنوي، زمن التصفح). وكذلك تحويل الواصفات الرقمية إلى مدى {0,1} باستخدامMinMaxScaler أو نستخدم StandardScaler لتوحيد نطاق الواصفات الرقمية وهذا مايسمى بالتطبيع (Normalization).

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.colors import Normalize
import skfuzzy as fuzz
from sklearn.preprocessing import StandardScaler, OneHotEncoder
from sklearn.compose import ColumnTransformer
```

```
from sklearn.decomposition import PCA
df= pd.read_csv('clean_customer_purchase_data.csv')
df['PurchaseToTimeRatio']=df.apply(
   lambda row:row['NumberOfPurchases']/ row['TimeSpentOnWebsite'] if
row['TimeSpentOnWebsite']!=0 else 0,axis=1
)
df['DiscountUsageRate']=df.apply(
   lambda row: row['DiscountsAvailed']/row['NumberOfPurchases'] if
row['NumberOfPurchases']!=0 else 0,axis=1
)
df.fillna(0,inplace=True)
new_features=df[['PurchaseToTimeRatio','DiscountUsageRate','LoyaltyProgram',
'ProductCategory']]
#توحيد الواصفات
scaler=StandardScaler()
x_scaled= scaler.fit_transform(new_features)
```

## 2- مخطط الخوارزمية:




الشكل(4) مخطط الخوارزمية

**3- عمل الخوارزمية:**

**1-تحديد عدد المجموعات:** يتم تحديد عدد المجموعات مسبقا مثل خوارزمية K-Means ولكن هنا يمكن لنقطة بيانات واحدة أن تنتمي إلى أكثر من مجموعة وتحديد معامل الضبابية (m) الذي يحدد مستوى الضبابية في التجميع.

**2-حساب درجات الانتماء:** لكل نقطة بيانات يتم حساب درجة انتمائها إلى كل مجموعة هذه الدرجة تكون قيمتها بين {0,1} حيث تشير القيمة 1 إلى انتماء كامل للمجموعة، والقيمة (0) تعني عدم الانتماء.

**3-تحديث مراكز المجموعات:** يتم تحديث مراكز المجموعات بناء على متوسط النقاط المرجح بدرجات الانتماء.

**4-التكرار حتى التقارب:** تتكرر الخطوات السابقة حتى تصل الخوارزمية إلى حالة استقرار، حيث لا تتغير درجات الانتماء بشكل كبير بين التكرارات وشرط التوقف يتم من خلال تحديد عتبة التقارب (مثلا 0.001) أو عدد أقصى للتكرارات (مثلا 100).

```
# algorithm
n_clusters=3
cntr,u,u0,d,jm,p,fpc=fuzz.cluster.cmeans(x_scaled.T,n_clusters,2,error=0.005,m
axiter=1000,init=None)
cluster_membership=np.argmax(u,axis=0)
df['Cluster']=cluster_membership
#اضافة معلومات التجميع للداتا
df['Max_Membership']=np.max(u,axis=0)
```

**4- نتائج تنفيذ الكود:**

بعد تطبيق الخوارزمية وحساب معدل الشراء ومعدل الحسميات والأخذ بعين الاعتبار ولاء العميل، تم تقسيم العملاء في ثلاثة مجموعات (n_clusters=3) وهذه المجموعات هي مجموعة معدل شراء العملاء ومجموعة معدل حسميات العملاء ومجموعة ولاء العملاء)) وبعدها يتم إيجاد المتوسط الحسابي والانحراف المعياري لكل من معدل الشراء ومعدل الحسميات، ويمكن وصف كل مجموعة بناء على مراكزها (زبائن مخلصون، زبائن مقتصدون) والكود الأتي يوضح ذلك.

```
# طباعة خصائص كل مجموعة
cluster_stats=df.groupby('Cluster').agg({
    'PurchaseToTimeRatio' :["median","mean"],
    'DiscountUsageRate':["mean","median"],
    'LoyaltyProgram':["median","mean"],
}).reset_index()
print("\n خصائص المجموعات:")
print(cluster_stats)
centers_original=scaler.inverse_transform(cntr)
# عرض المراكز
centers_df=pd.DataFrame(centers_original,columns=['PurchaseToTimeRatio','Di
scountUsageRate','LoyaltyProgram','ProductCategory'],index=[f"المجموعة{i+1}"
for i in range(n_clusters)])
print("مراكزالمجموعات:")
print(centers_df.round(2))
```

خصائص المجموعات:

| | Cluster | PurchaseToTimeRatio | | DiscountUsageRate | | LoyaltyProgram | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | median | mean | mean | median | median | mean |
| 0 | 0 | 0.318941 | 0.592185 | 0.366736 | 0.250000 | 0.0 | 0.0 |
| 1 | 1 | 0.355183 | 0.788609 | 0.371102 | 0.214286 | 1.0 | 1.0 |
| 2 | 2 | 0.330736 | 0.976055 | 0.490150 | 0.250000 | 0.0 | 0.0 |

الشكل (4)خصائص المجموعات

مراكز المجموعات:

| | PurchaseToTimeRatio | DiscountUsageRate |
|---|---|---|
| المجموعة1 | 0.58 | 0.34 |
| المجموعة2 | 0.67 | 0.32 |
| المجموعة3 | 0.64 | 0.36 |

الشّكل(5) مراكز المجموعات

قد يكون بعض العملاء مزيجا من المجموعتين (مثلا 60% من المجموعة الأولى و40% من المجموعة الثانية) مما يساعد في تصميم استراتيجيات هجينة لهم، لإنه من الممكن أن يكون العميل في

أكثر من مجموعة سلوكية والكود الأتي يوضح ذلك.

```
#customer

print("\n  customer in group:")
for customer in range (8):
   print(f"\n customer{customer+1}:")
   for cluster in range (n_clusters):
      print(f"–group{cluster+1}:{u[cluster][customer]:.2f}")
```

```
customer
 in group:
customer1:
group1:0.84
group2:0.07
group3:0.08

customer2:
group1:0.41
group2:0.18
group3:0.41

customer3:
-group1:0.05
-group2:0.89
-group3:0.05

customer4:
-group1:0.04
-group2:0.02
-group3:0.93

customer5:
-group1:0.83
-group2:0.06
-group3:0.11

customer6:
-group1:0.07
-group2:0.06
-group3:0.88

customer7:
group1:0.06
group2:0.85
group3:0.09

customer8:
group1:0.05
group2:0.90
group3:0.05
```

الشكل (6) درجات انتماء العملاء الأوائل للمجموعات

كما يمكن أن يتم تقليل الأبعاد من 4 إلى 2 باستخدام PCA لتمثيل المجموعات بشكل مرئي في الرسم البياني والكود الأتي يوضح ذلك.

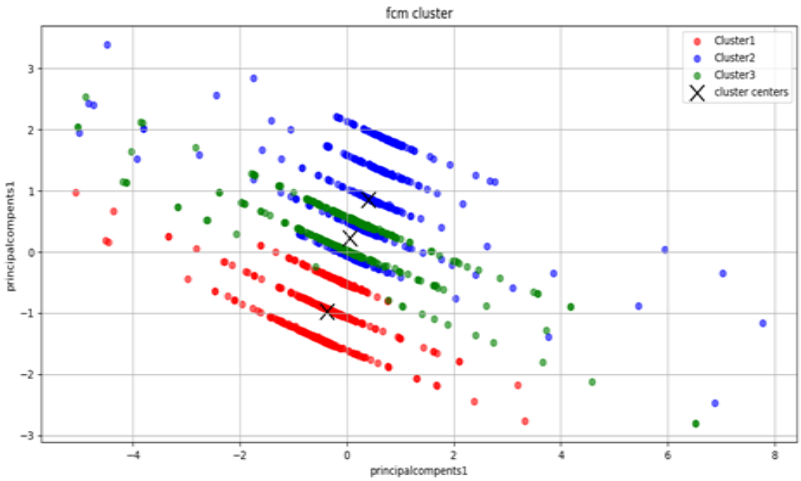
```
#تخفيض الابعاد باستخدام pca
pca=PCA(n_components=2)
principal_compents=pca.fit_transform(x_scaled)
```

من أجل تمثيل المجموعات المتداخلة التي حددتها FCM من خلال المخطط الأتي حيث يمثل كل لون مجموعة مختلفة والنقاط المتداخلة تظهر زبائن ينتمون لأكثر من مجموعة . والشفافية (alpha=0.7) تساعد في إظهار كثافة النقاط المتداخلة ولإظهار درجات الانتماء لكل عميل للمجموعات (عبر الشفافية أو حجم النقاط ) كما أنه تم تحديد مراكز المجموعات على المخطط والكود الأتي يوضح ذلك:

```
#تخفيض الابعاد باستخدام pca
pca=PCA(n_components=2)
principal_compents=pca.fit_transform(x_scaled)
#اعداد القيم للرسم
plt.figure(figsize=(12,8))
colors=['red','blue','green']
# رسم النقاط مع تخصيص اللون حسب العضوية
cluster_membership=np.argmax(u,axis=0)
for i in range(n_clusters):
  plt.scatter(
    principal_compents[cluster_membership==i,0],
    principal_compents[cluster_membership==i,1],
    c=colors[i],
    label=f'Cluster{i+1}',
    alpha=0.6  )
  #  رسم مراكز المجموعات
centers_pca=pca.transform(cntr)
plt.scatter(
    centers_pca[:,0],
    centers_pca[:,1],
    marker='x',
    s=200,
    c='black',
    label='cluster centers'  )
plt.xlabel('principalcompents1')
plt.ylabel('principalcompents1')
plt.title('fcm cluster')
```

```
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

والشكل التأتي يوضح المجموعات المتداخلة ومراكز المجموعات :



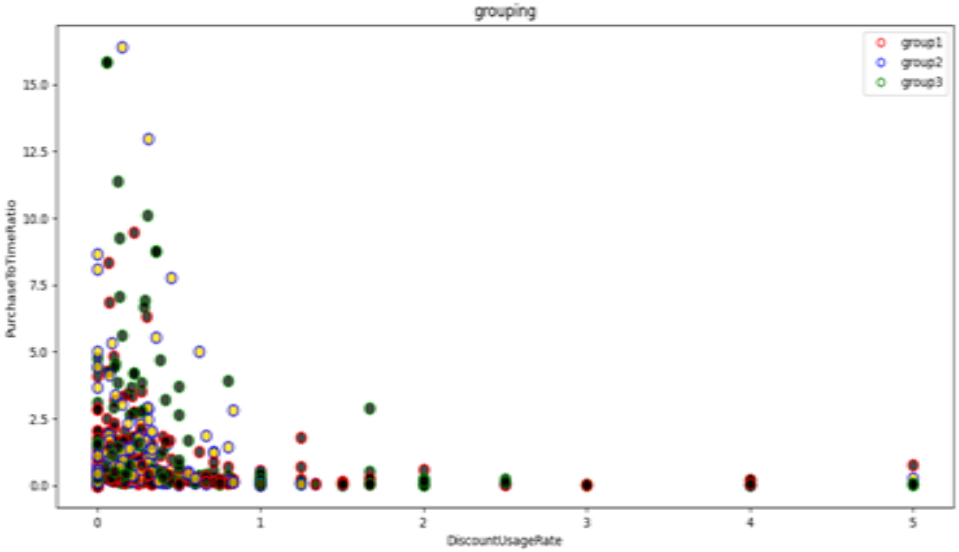

الشكل (7)المجموعات المتداخلة مع مراكز المجموعات

كما يمكن توضيح سمات العملاء من ناحية معدل الشراء ومعدل الحسميات والولاء لكل عميل للمجموعات الناتجة عن الخوارزمية. وتبين الحدود الملونة لكل مجموعة، والشفافية تعكس قوة العضوية في المجموعة السائدة، ويوضح لون النقاط الولاء حيث أن اللون الأسود يمثل عدم الولاء عندما يأخذ قيمة الصفر واللون الذهبي يمثل الولاء للعميل عندما يأخذ القيمة الواحد. ونبين التداخل من خلال ظهور النقاط بألوان مختلطة من الألوان السابقة والكود الأتي يوضح ذلك.

```
colors=['red','blue','green']
n_samples=1000
LoyaltyProgram_colors=['black','gold']
plt.figure(figsize=(12,8))
for i in range(n_samples):
```

```
  dominant_cluster=np.argmax(u[:,i])
  LoyaltyProgram_color='black' if df['LoyaltyProgram'][i]==0 else'gold'
  plt.scatter(
     df['DiscountUsageRate'][i],
     df['PurchaseToTimeRatio'][i],
     c=LoyaltyProgram_color,
    edgecolors=colors[dominant_cluster],
     linewidths=1.5,
     alpha=0.7,
     s=70
  )
  plt.xlabel('DiscountUsageRate')
  plt.ylabel('PurchaseToTimeRatio')
plt.title('grouping')
plt.legend(handles=
[
   plt.Line2D([0],[0],marker='o',color='w',label='group1' ,markeredgecolor='red'),
   plt.Line2D ([0],[0],marker='o',color='w',label='group2',markeredgecolor='blue'),
   plt.Line2D
([0],[0],marker='o',color='w',label='group3',markeredgecolor='green'),
])
plt.show()
```

يُبين الشكل الأتي النقاط التي تنتمي للمجموعات فمثلا في المجموعة الثانية يكون وضع العميل ذو معدل شراء عالي وحسميات قليلة ولديه ولاء للمنتج.

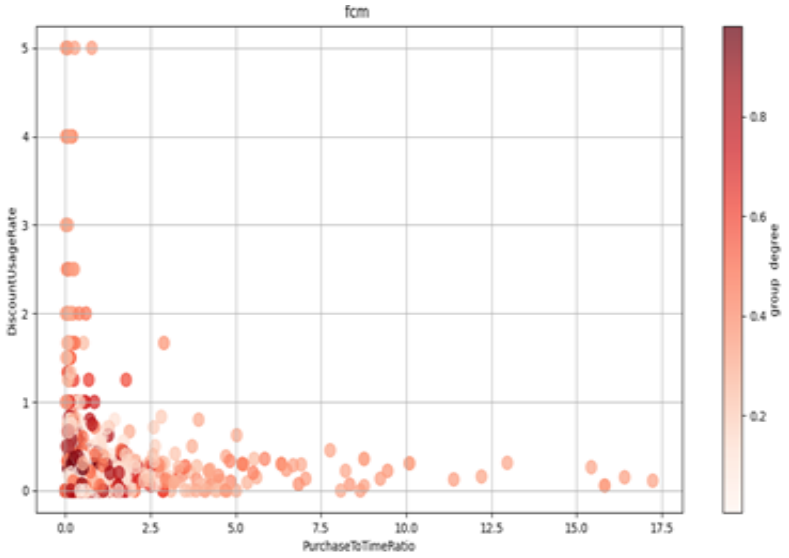



الشكل (8) سمات العملاء

كما يمكن أن نبين درجات الانتماء للعملاء للمجموعة الواحدة، فمثلا لإظهار انتماء العملاء للمجموعة الأولى تم تلوين النقاط باللون الأحمر والشفافية تظهر قوة انتماء العميل للمجموعة تم تلوينها بدرجات شفافية اللون الأحمر والكود الأتي يوضح ذلك.

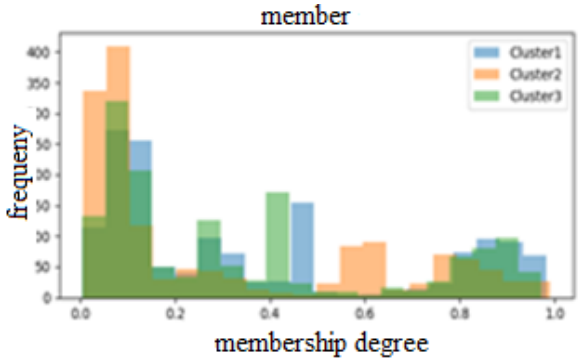
```
# مخطط المجموعة الأولى
plt.figure(figsize=(1,6))
sc=plt.scatter(
   df['PurchaseToTimeRatio'],
   df['DiscountUsageRate'],
   c=u[0],
   cmap='Reds',   alpha=0.7,    s=100 )
plt.colorbar(sc,label='group  degree')
plt.title('fcm ')
plt.xlabel('PurchaseToTimeRatio')
plt.ylabel('DiscountUsageRate')
```

```
plt.grid(True)
plt.show()
```




الشكل (9) انتماء العملاء للمجموعة الأولى

كما يمكن تمثيل عدد النقاط التي لها درجة العضوية نفسها حيث أن كل لون يمثل مجموعة مختلفة وكل شريط في المخطط يوضح عدد العملاء الذين لديهم درجة عضوية في نطاق معين حيث يمثل المحور X درجة العضوية ويمثل المحور Y عدد النقاط التي لها درجة العضوية نفسها، وكل شريط في المخطط يوضح عدد العملاء الذين تكون درجة عضويتهم في نطاق معين والشّكل الآتي يوضح ذلك.




الشكل (10) درجات العضوية

```
plt.subplot(2,2,4)
for i in range(n_clusters):
    plt.hist(
        u[i,:],
        bins=20,
        alpha=0.5,
        label=f'Cluster{i+1}'
        )
plt.xlabel('membership degree')
plt.ylabel('frequeny')
plt.title('member  ')
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

يتم استخدام مقاييس مثل مؤشر دقة التقسيم Partition Coefficient (FPC) من أجل تقييم جودة التجميع الناتج. حيث تصنف قيم FPC على النحو الأتي:

- FPC>=0.8 تجميع ممتاز للمجموعات الواضحة
- 0.6<=FPC<0.8 تجميع جيد مع تداخل معتدل
- 0.5<=FPC<0.6 تجميع متوسط مع تداخل كبير
- FPC<0.5 تجميع ضعيف

ونتيجة التجميع الناتجة هي: fuzzy:0.621

والكود الأتي يوضح ذلك:

```
مؤشر الضبابية @
print(f"center group :\n{scaler.inverse_transform(cntr).round(2)}")
print(f"fuzzy:{fpc:.3f}")
```

يتم استخدام مقياس Silhouette Score لتقييم جودة التجميع سنقوم بقياس مدى تشابه كل نقطة مع نقاط مجموعتها مقارنة بمجموعات أخرى. وتتراوح القيمة بين (−1,1) حيث:

(−1) تشير إلى أن التجميع سيء ( النقاط قد تكون في المجموعة الخطأ).

(1) تشير إلى أن التجميع ممتاز (النقاط قريبة من مجموعتها وبعيدة عن الأخرى).

(0) النقاط قريبة من الحدود.

وفي بحثنا تم حساب مقياس Silhouette Score والنتيجة على النحو الأتي:

Silhouette Score:0.379

والكود التالي يوضح ذلك:

```
Silhouette_avg= silhouette_score(x_scaled,cluster_membership)
    f"silhouttescore:{silhouette_avg:.3f)"(print)
```

توضح النتيجة السابقة أن التجميع جيد مع مراعاة انتماء العملاء الجزئي لفئات سلوكية تم تصنيفها.

**5- تقسيم البيانات للتدريب:**

في خوارزميات التجميع لايوجد تقسيم تقليدي للبيانات وتدريب واختبار كما في التعلم الخاضع للإشراف. لكن للقيام بذلك يمكننا استخدام طرق مثل تقييم استقرار المجموعات عبر أقسام مختلفة من البيانات أو تقييم استقرار النموذج.

أما بالنسبة لعدد الدورات (Pochs أو Iterations) فإن خوارزمية FCM تتوقف تلقائيا عند تحقيق شرط التوقف (مثل تغيّر صغير في مراكز المجموعات أو الوصول إلى الحد الأقصى للتكرارات). لكن يمكن للمستخدم ضبط معلمات مثل Maxiter أو Error في الدالة. وسوف نوضح كيفية تقسيم البيانات إلى مجموعة فرعية لمحاكاة التقييم واستخدام FCM على بيانات التدريب، ثم تطبيقه على بيانات الاختبار مع حساب مقاييس التقييم مثل FPC لكل جزء، ويُستخدم معدل الضبابية m=2 عادةً كقيمة معيارية في تطبيقاتFuzzy C-Means ، ويعطي درجة مناسبة من الضبابية دون جعل الانتماءات حادة جدًا أو موزعة بشكل مفرط. ويوضح الكود الآتي ذلك.

```
تقسيم الى مجموعتين
x_train,x_test,=train_test_split(x,test_size=0.3,random_state=42)
الواصفات توحيد  #
```

```
scaler=StandardScaler()
x_train_scaled=scaler.fit_transform(x_train)
x_test_scaled=scaler.fit_transform(x_test)
# تدريب النموذج على بيانات التدريب
n_clusters=3
max_iter=100
m=2
cntr,u_train,u0,d,jm,p,fpc_train=fuzz.cluster.cmeans(x_train_scaled.T,n_clusters
,m,error=0.005,maxiter=max_iter,init=None)
#تقييم النموذج على بيانات التدريب
train_clusters=np.argmax(u_train,axis=0)
# تقييم التموذج على بيانات الاختبار
#التنبؤ على بيانات الاختبار
u_test,u0,d,jm,p,fpc_test=
fuzz.cluster.cmeans_predict(x_test_scaled.T,cntr,m,error=0.005,maxiter=max_it
er)
#fpc  حساب
fpc_test=fuzz.cluster.cmeans_predict(x_test_scaled.T,cntr,m,error=0.005,maxit
er=max_iter)[-1]
print(f" fpc(train):{fpc_train:.3f}")
print(f"fpc(test):{fpc_test:.3f}")
# اعادة التدريب مع الدورات
n_epoch=5
best_fpc=0
best_model=None
for epoch in range (n_epoch):
```

```
    cntr,u,u0,d,jm,p,fpc=fuzz._cluster.cmeans(x_train_scaled.T,n_clusters,m,erro
r=0.005,maxiter=max_iter,init=None)
if fpc>best_fpc:
    best_fpc=fpc
    best_model=cntr
print(f"{epoch+1}:fpc={fpc:.3f}")
    استخدام افضل نموذج للتنبؤ #
u_test_best=fuzz.cluster.cmeans_predict(x_test_scaled.T,best_model,m,error=0
.005,maxiter=max_iter) [0]
```

وتكون النتائج كالأتي:

```
fpc(train):0.614
fpc(test):0.630
5:fpc=0.614
```

بالتالي وبعد الحصول على النتائج أصبح بإمكاننا الإجابة على أسئلة البحث وهي:

**1-ماهي المجموعات السلوكية الرئيسية للعملاء التي تكشف عنها FCM؟**

لدينا عدة أنماط سلوكية للعملاء تم تقسيمها في مجموعات وكل عميل له درجة عضوية بحيث أن مجموع درجات العضوية في جميع المجموعات تساوي الواحد، والاختلاف في مراكز المجموعات تظهر تمايز السلوكيات بين العملاء. مثلا إذا كان معدل الشراء له قيمة عالية فهي مجموعة كبار المشترين، وإذا كانت قيمته منخفضة فهي مجموعة المشترين المقتصدين، أما معدل الحسميات فإذا كان له قيمة عالية فهي مجموعة حساسة للعروض وإذا كانت قيمة منخفضة فهي مجموعة (غير مهتمين بالعروض)، وكذلك الولاء إذا كانت له قيمة عالية فإن المجموعة تعتبر مخلصة للعلامة التجارية (لديها ولاء) وإذا كانت قيمته منخفضة فهي مجموعة غير مخلصة (ليس لها ولاء).

**2-كيف يمكن تفسير المجموعات المتداخلة؟**

إن طبيعة التداخل بين المجموعات تفيد بان العميل يجمع بين سلوكيين لذا يمكن جذبه عبر استراتيجية هجينة واستخدام درجات الانتماء لتصميم حملات شخصية ديناميكية بدلاً من التقسيم الثابت، حيث أن الحملات الهجينة تستجيب لها 35% من العملاء متداخلي المجموعات مقابل 20% عند استخدام التقسيم الثابت في خوارزمية (K-Means).

**3-ماهي الأهمية العملية للنتائج واتخاذ القرارات التسويقية؟**

تفيد هذه النتائج في التسويق الموجه من خلال إرسال عروض مخصصة لكل مجموعة وتحسين الخدمة من خلال فهم احتياجات العملاء المتداخلة والتنبؤ بسلوك العميل.

**12- مقارنة بين خوارزمية K-Means و خوارزمية FCM:**

سنقوم بالمقارنة بين الخوارزمات على نفس البيانات وعدد المجموعات وفق ثلاثة مؤشرات هي:

- (Silhouette Score) يخبرنا إلى أي مدى يتشابه كل عميل مع باقي عناصر مجموعته ومدى اختلافه عن أفراد المجموعات الأخرى.
- (Davies-Bouldin Index – DBI) يفيدنا في معرفة مدى جودة فصل المجموعات عن بعضها ومدى تجانس العناصر داخل كل مجموعة، وكلما انخفضت قيمته كان التجميع أفضل.
- (Calinski-Harabasz Index – CHI) يستخدم لتقييم جودة التجميع، حيث يقيس مدى جودة الفصل بين المجموعات مقارنةً بمدى تماسك العناصر داخل كل مجموعة.

| الخوارزمية | Silhouette | Davies-Bouldin | Calinski-Harabasz |
|---|---|---|---|
| K-Means | 0.41 | 0.91 | 520 |
| FCM | 0.48 | 0.73 | 610 |

الجدول(1) مقارنة خوارزمية K-Means مع خوارزمية FCM

يوضح الجدول (1) نتائج المقارنة، حيث حققت خوارزمية FCM قيمة أعلى في كل من المؤشرين Silhouette Score وCalinski-Harabasz Index، وقيمة أقل في Davies-Bouldin Index مما يشير إلى تحسن جودة التجميع وفق هذه المؤشرات على نفس بيانات الدراسة في خةارومية FCM عن خوارزمية K-Means.

**13- النتائج وربطها بالتطبيقات العملية:**

وجدنا من خلال الدراسات السابقة أنه تم الأخذ بعين الاعتبار تقييم العملاء كما في أنظمة توصية التجارة الالكترونية، وبعض الدراسات اعتمدت على تحليل سلة المشتريات، والبعض اعتمد على اختيار العميل بين أصناف المنتجات ومسار التنقل بينها، وهناك أبحاث ركزت على التقنيات المستخدمة في عملية التنبؤ بشكل أكبر، وذلك كمحاولة لتحسين دقة التنبؤ.

كان هدف هذا البحث الرئيسي هو الفهم بدقة سلوكيات العملاء شديدة التعقيد، من خلال السماح بالانتماء الجزئي لمجموعات متعددة، مما يعكس الواقع بشكل أفضل (حيث يكون العميل في أكثر من فئة سلوكية)، وفي هذا البحث استخدمنا التجميع الضبابي (خوارزمية FCM) وتم الأخذ بعين الاعتبار عامل زمن التصفح والحسميات ومميزات Feature جديدة. بالاعتماد على هذه العوامل ومع الأخذ بعين الاعتبار الولاء للمنتج والذي من خلالها يمكن فهم سلوك العميل والتنبؤ به ومعرفة العميل فيما إذا كان سيقوم بعملية التصفح فقط أو من الممكن أن يقوم بعملية شراء.

إن طبيعة التداخل بين المجموعات تسمح للعميل بالجمع بين سلوكيين لذا يمكن جذبه عبر استراتيجية هجينة، لكن هناك بعض التحديات ومنها اختيار معامل الضبابية (M)، والذي تؤثر قيمته على وضوح الحدود بين الكتل، والتعامل مع البيانات عالية الأبعاد قد يفشل في تحديد البنية الداخلية بشكل دقيق، والتوازن بين السرعة والدقة يحتاج إلى تقليل زمن التشغيل مع الحفاظ على الدقة، كما أن النتائج تعتمد على الاختيار العشوائي لمركز الكتل الأولية وعمليات التكرار، وتحديث العضوية يستهلك موارد كبيرة مع البيانات الكبيرة.

لا تقتصر أهمية نتائج البحث على تقييم أداء النموذج من الناحية الحسابية، وإنما تمتد إلى إمكانية توظيف المخرجات في فهم سلوك العملاء ودعم القرارات في بيئة التجارة الإلكترونية. فقد أتاح النموذج الانتقال من التعامل مع بيانات العملاء كقيم منفردة إلى اكتشاف أنماط سلوكية مشتركة بينهم، مع إمكانية تمثيل الحالات التي تتداخل فيها هذه الأنماط من خلال درجات العضوية الضبابية. وتسمح هذه المخرجات بتفسير خصائص كل مجموعة سلوكية وربطها بإجراءات عملية، مثل تخصيص العروض التسويقية، وتحسين استراتيجيات الخصومات، وتطوير برامج الولاء والاحتفاظ بالعملاء، ودعم أنظمة التوصية بالمنتجات والخدمات. كما يمكن استخدام درجات العضوية بوصفها مدخلات إضافية في أنظمة دعم القرار، بحيث لا يعتمد القرار على انتماء العميل إلى مجموعة واحدة فقط، وإنما يأخذ في الاعتبار درجة قربه من عدة أنماط سلوكية. ومن منظور تطبيقي، يمكن أن يساعد ذلك المؤسسات على الانتقال من التجزئة التقليدية للعملاء إلى استراتيجيات أكثر تخصيصًا ومرونة، بحيث تتناسب الإجراءات التسويقية مع الخصائص السلوكية الفعلية لكل عميل. وفي المقابل، ينبغي تفسير النتائج ضمن حدود البيانات والمتغيرات المستخدمة، إذ قد تتأثر طبيعة المجموعات بعددها وخصائصها وجودة البيانات، كما أن سلوك العملاء قد يتغير بمرور الزمن. ومن ثم، تتمثل القيمة الأساسية للبحث في الجمع بين التحليل السلوكي والتمثيل الضبابي للتداخل بين الأنماط، بما يوفر أساساً يمكن تطويره مستقبلًا نحو أنظمة ديناميكية قادرة على تحديث تصنيف العملاء بصورة مستمرة وربط نتائج التحليل مباشرة بعمليات التوصية والتسويق واتخاذ القرار.

**14- الآفاق المستقبلية:**

تعتبر هذه الخوارزمية أداة قوية في التعلّم غير الخاضع للإشراف، خاصة في المجالات التي تتطلب مرونة في تحديد انتماء البيانات، رغم تحدياتها، فإن التطورات المستقبلية في تحسين الخوارزميات ودمجها مع تقنيات الذكاء الاصطناعي الأخرى قد تزيد من فعاليتها في مجال التحليل التنبؤي والتسويق الذكي والدمج مع تقنيات التعلم العميق، لتحسين أدائها في معالجة الصور والنصوص والتكيف مع البيانات الديناميكية من خلال تطوير إصدارات تعمل مع البيانات المتغيرة مع الزمن (Streaming DATA).

**15- المراجع:**

[1] T Balhaj, S Kwat, 2023, An analytical study of the factors influencing the customer's future vision according to the RFM model; Algeria, Institute of Economic, Commercial and Management Sciences, PhD thesis, P 69-121

[2] Z Nugraha, M Muhammad, B Waspodo;2025, Customer relationship management through artificial intelligence technologies, Jurnal Sisfokom (Sistem Informasi dan Komputer), Volume 14, , Nomor 04, P 11-13.

[3] C Ledr o, A Nosella, I Pozza, A Vinelli, T Souverain, Artificial intelligence in customer relationship management: A systematic framework for a successful integration, 2025, Journal of Business Researc, Volume 199, 115531, P 6-9.

[4] O Maimon, L Rokach, 2010 -Introduction to Knowledge Discovery and Data Mining. Springer, London, Second Edition,1285.

[5] Altman N, 1992, An Introduction to Kernel and Nearest-Neighbor Nonparametric Regression, The American Statistician, vol. 46, no. 3, p 7-9.

[6] M Najafabadi, A Mohamed, and M Mahrin , 2019, A survey on data mining techniques in recommender systems, Soft Computing, vol. 23, no. 2, p 11-12.

[7] A Buczak, E Guven, 2016, A Survey of Data Mining and Machine Learning Methods for Cyber Security Intrusion Detection, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, p11-15.

[8] F panel, A Isinkaye, Y Folajimi, B Ojokohc, 2015,Recommendation systems: Principles, methods and evaluation, Egyptian Informatics Journal,Volume 16, Issue 3,Pages 21-27

# العناصر $S$ – الابتدائية الضعيفة في الـ $K$– شبكات الضربية

## الملخص

إيمان الخوجه[1] حمزة حاكمي[2] أشرف صويص[3]

الغاية من هذا البحث ادخال مفهوم العناصر $S-$ الابتدائية الضعيفة على صف الـ $K-$ شبكات الضربية ودراسة خواصه، وذلك كتعميم جديد لمفهوم العناصر الابتدائية الضعيفة في $L$. لتكن $L$ $K-$ شبكة و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$. ليكن $I \neq q \in L$ بحيث إن $t \in S$ لكل $t \not\leq q$. نقول عن $q$ إنه عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$، إذا وجد $s \in S$ بحيث إنه لأجل أي عنصرين $a, b \in L$ يحققان أن $0 \neq ab \leq q$ ، فإنه إما $sa \leq q$ أو $sb \leq \sqrt{q}$.

لقد قمنا في هذا البحث بتوصيف العلاقة بين العناصر $S-$ الأولية والعناصر $S-$ الابتدائية والعناصر $S-$ الابتدائية الضعيفة في صف الـ $K-$ شبكات. وبرهنا أنه إذا كان $q \in L$ عنصرًا $S-$ ابتدائيًا ضعيفاً في $L$، وكان $p$ عنصرًا ما من $L$ لأجله يوجد $t \in S$ بحيث $t \leq p$ ، عندئذٍ فإن كلاً من $pq$ و $p \wedge q$ يكون عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L$ . كما بينا أنه إذا كانت $L$ $K-$ شبكة عنصرها الأكبر $I$ متراص و $S$ مجموعة ضربية مغلقة من $L$ وكانت $q_1, \dots, q_n$ عناصر $S-$ ابتدائية ضعيفة في $L$، وكان $\sqrt{q_i} = \sqrt{q_j}$ لكل $i, j = 1, \dots, n$ ، فإن $q = \wedge_{i=1}^{n} q_i$ يكون عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L$. ومن قمنا بإثبات أن المثاليات $S-$ الابتدائية الضعيفة في الحلقة التبديلية والواحدية $R$ تطابق العناصر $S_L-$ الابتدائية الضعيفة في شبكة مثاليات الحلقة $R$ الضربية $(L = L(R))$. وبذلك نكون قد عممنا العديد من النتائج الواردة في [7] على الشبكات الضربية.

[1] أستاذ مساعد قسم الرياضيات كلية العلوم جامعة حمص.
[2] أستاذ مساعد قسم الرياضيات كلية العلوم جامعة حمص.
[3] طالب دراسات عليا قسم الرياضيات كلية العلوم جامعة حمص.

**الكلمات المفتاحية:** الشبكة الضربية، المثالية $S$–الابتدائية الضعيفة، العنصر $S$– الأولي ، العنصر $S$– الابتدائي ، العنصر $S$– الابتدائي الضعيف.

## Weakly $S$– Primary Elements in $K$ –Multiplicative Lattices

**Eman Al–Khouja[1]** **Hamza Hakmi[2]** **Ashraf Sweis[3]**


### Abstract

Let S be a multiplicatively closed subset of a K- lattice L. The purpose of this paper is to introduce the concept of weakly S- primary elements as a new generalization of weakly primary elements. An element $q \neq I$ of a K- lattice L such that $t \nleq q$ for all $t \in S$ is called a weakly S- primary element if there exists an element $s \in S$ such that for all $a, b \in L$ with $0 \neq ab \leq q$, implies $sa \leq q$ or $sb \leq \sqrt{q}$. The relationships among S- prime elements, S- primary elements and weakly S- primary elements are investigated. We prove that if $q \in L$ is a weakly S- primary and p is any element of L such that $t \leq p$ for some $t \in S$, then $pq$ and $p \wedge q$ are weakly S- primary elements of L. We show that if L is a K- lattice in which the greatest element I is compact, S is a multiplicatively closed subset of L, and $q_1, \dots, q_n$ are weakly S- primary elements of L, and if $\sqrt{q_i} = \sqrt{q_j}$ for all $i, j = 1, \dots, n$, then $q = \bigwedge_{i=1}^{n} q_i$ is a weakly S- primary element of L. Furthermore, we show that the weakly S- primary ideals of a commutative ring R with identity correspond precisely to the Weakly $S_L$ primary elements of the ideal lattice $(L = L(R))$. Accordingly, we have generalized the results presented in [7] to the multiplicative lattices.

**Key Words**: Multiplicative lattice , Weakly S−primary ideal, S−prime element, S−primary element, Weakly S−primary element.

1 Department of Mathematics Homs University.

2 Department of Mathematics Homs University.

3 Department of Mathematics Homs University.

**المقدمة.**

لقد كان للمثاليات الأولية والمثاليات الابتدائية دور أساسي وهام في نظرية الجبر التبديلي، وقد ظهر لهما العديد من التعميمات، نذكر منها المثالية الأولية (الابتدائية) الضعيفة والمثالية S− الأولية (S−الابتدائية) والمثالية S− الأولية الضعيفة والمثالية S− الابتدائية الضعيفة وتعميمات عديدة أخرى. [1, 3, 4, 7, 9, 12, 18]

في عام 1962 قام R. P. Dilworth [8] بدراسة نظرية المثاليات في الحلقات التبديلية والواحدية بشكل مجرد، وذلك بإدخاله مفهوم الشبكة الضربية النيوثرية ودراستها كمفهوم مجرد لشبكة المثاليات لحلقة نيوثرية تبديلية، وبين أن العديد من التعاريف الأساسية والنتائج المتعلقة بنظرية المثاليات بما فيها المثاليات الأولية والمثاليات الابتدائية في الحلقات التبديلية يمكن تعميمها مباشرة على الشبكات الضربية.

في عام 1974 أدخل نقار [13] صفي الـ $K-$ شبكات و الـ $R-$ شبكات من أجل دراسة المودولات الشبكية فوق الشبكات الضربية دون شرط انقطاع المتتاليات المتزايدة، وفي عام 1976 أدخل $D.D.Anderson$ [2] صف الـ $r-$ شبكات لدراسة الشبكات الضربية دون شرط انقطاع المتتاليات المتزايدة، والمشابه لصف الـ $R-$ شبكات المدخل من قبل نقار، وبذلك وسعت الدراسة لتشمل جميع المودولات فوق الحلقات التبديلية. كما درسا معاً [14] العناصر الأولية المترافقة والمترافقة بضعف

وخواصهما، ومن ثم تتالت الدراسات المتعلقة بالعناصر الأولية والعناصر الابتدائية وتعميماتهما في الشبكات الضربية، وكانت من الأهداف الرئيسية للعديد من الباحثين، لكن جميع هذه الدراسات تمت في صف الـ $C-$ شبكات (يقال عن الشبكة الضربية $L$ إنها $C-$ شبكة اذا كانت مولدة تراصياً، وعنصرها الأكبر متراص، وجداء أي عدد منته من العناصر المتراصة فيها هو عنصر متراص)، [5, 6, 10, 11, 17]. إن صف الـ $K-$ شبكات أعم من صف الـ $C-$ شبكات حيث إن كل $C-$ شبكة هي $K-$ شبكة، لكن العكس ليس بالضرورة صحيح.

الغاية من هذا البحث دراسة العناصر $S-$ الابتدائية الضعيفة في صف الـ $K-$ شبكات وذلك كتعميم لمفهوم المثاليات $S-$ الابتدائية الضعيفة في الحلقات التبديلية [7] على الشبكات الضربية.

**1- تعاريف ومفاهيم أساسية.** انظر [2, 8, 13, 14, 15, 17]

**تعريف 1-1.** لتكن $S$ مجموعة ضربية مغلقة في الحلقة $R$، و $Q$ مثالية في $R$ تحقق أن $Q \cap S = \phi$. يقال عن $Q$ إنها مثالية $S-$ ابتدائية ضعيفة إذا وجد عنصر (مثبت) $s \in S$ بحيث إنه لأجل أي عنصرين $a, b \in R$ يحققان أن $0 \neq ab \in Q$ فإنَّه إما $sa \in Q$ أو $sb \in \sqrt{Q}$.

**تعريف 1-2.** الشبكة الضربية هي شبكة تامة مزودة بعملية ثنائية $(\cdot)$ تبديلية وتجميعية وتوزيعية مع أي اجتماع والعنصر الأكبر فيها هو العنصر الحيادي بالنسبة لعملية الضرب.

سنرمز في هذا البحث، بالرمز $L$ للشبكة الضربية، وبالرمز $I$ للعنصر الأكبر فيها، وبالرمز $0$ للعنصر الأصغر فيها، كما سنفترض أن جميع الشبكات التي نتعامل معها هي شبكات غير صفرية.

**خاصية 1-1.**

لتكن $L$ شبكة ضربية، عندئذ أياً كان $a, b, c \in L$ فإنه يتحقق:

- $ab \leq a \wedge b \leq a, b \leq a \vee b$.
- $a \cdot 0 = 0$ .
- إذا كان $a \leq b$ فإن $ac \leq bc$.
- إذا كان $a \leq a$ فإن $a: c \leq b: c$.

- إذا كان $a \leq b$ و $c \leq d$ فإن $ac \leq bd$.
- إذا كان $a \leq b$ و $a \leq c$ فإن $a \leq b \wedge c$.
- إذا كان $b \leq a$ و $c \leq a$ فإن $b \vee c \leq a$.
- $cb \leq a$ إذا وفقط إذا كان $c \leq a:b$.
- $a:b = I$ إذا وفقط إذا كان $b \leq a$.
- $a \leq a:b$.
- $(a \wedge b)c \leq ac \wedge bc$.

**تعريف 1−3.** يقال عن العنصر $h$ من $L$ إنه عنصر متراص، إذا كان احتواؤه في اجتماع أي أسرة من عناصر $L$ يؤدي الى احتوائه في اجتماع أسرة جزئية منتهية منها.

**تعريف 1−4.** يقال عن الشبكة الضربية $L$ إنها $CG-$ شبكة، إذا كان أي عنصر من $L$ يكتب على شكل اجتماع لعناصر متراصة في $L$ .

**تعريف 1−5.** يقال عن الشبكة الضربية $L$ إنها $K-$ شبكة، إذا كانت $CG-$ شبكة، ومن أجل أي عنصرين متراصين $h,k$ من $L$ يكون العنصر $hk$ متراصاً في $L$.

**تعريف 1−6.** لتكن $L$ شبكة ضربية و $a,b \in L$ . إن $(a:b)$ يُعرف على النحو الآتي:

$$(a:b) = \vee \{x \in L\,;\, xb \leq a\}$$

**تعريف 1−7.** لتكن $L$ $K-$ شبكة عنصرها الأكبر $I$ متراص عندئذٍ:

$$xb \leq a \quad \Leftrightarrow \quad x \leq (a:b)$$

**تعريف 1−8.** يقال عن العنصر $a$ من الشبكة الضربية $L$ إنه قاسم للصفر في $L$ ، إذا كان $(0:a) \neq 0$.

**تعريف 1−8.** يقال عن الشبكة الضربية $L$ إنها منطقة تكاملية إذا كانت لا تحوي قواسم للصفر.

**تعريف 1−10.** لتكن $L$ $K-$ شبكة و $a \in L$. يُعرَّف أساس العنصر $a$ من $L$، بأنه اجتماع كل العناصر المتراصة $x$ في $L$ والتي تحقق المتراجحة $x^n \leq a$ حيث $n$ عدد صحيح موجب ما ( $n$ متعلق بـ $x$ )، ويرمز له عادة بالرمز $\sqrt{a}$ . أي يمكن القول أن:

$$\sqrt{a} = \vee\{ x \in L : x^n \leq a ; for\ Some\ \ n > 0,\ \text{متراص}\ \ x \}$$

هذا يعني أنه من أجل أي عنصر متراص $c \leq \sqrt{a}$ يوجد $m \in Z^+$ يحقق $c^m \leq a$.

**تعريف 1–11.** لتكن $L$ $K-$ شبكة و $a$ عنصراً ما من $L$، يسمى $a$ عنصراً جذرياً في $L$ ، إذا كان $a = \sqrt{a}$.

**تعريف 1–12.** يقال عن العنصر $p$ من الشبكة الضربية $L$ إنَّه أولي إذا كان $p \neq I$ وكان لأجل أي عنصرين $a, b \in L$ ، بحيث إن $ab \leq p$ فإنه إما $a \leq p$ أو $b \leq p$ .

**تعريف 1–13.** يقال عن العنصر $q$ من الشبكة الضربية $L$ إنه ابتدائي، إذا كان $q \neq I$ وكان لأجل أي عنصرين $a, b \in L$ بحيث إن $ab \leq q$ ، فإنه إما $a \leq q$ أو يوجد $k \in Z^+$ *يحقق* $b^k \leq q$ .

**تعريف 1–14.** يقال عن العنصر $a$ من الشبكة الضربية $L$ إنه عنصر عديم القوى إذا وجد عدد صحيح موجب $n$ لأجله $a^n = 0$ .

**تعريف 1–15.** يقال عن الشبكة الضربية $L$ إنها شبكة ضربية اختزالية إذا كان فيها $0$ هو العنصر الوحيد عديم القوى.

**تعريف 1–16.** ليكن $I \neq d \in L$ ولتكن المجموعة $[d, I] = \{x \in L ;\ \ x \geq d\}$ إن المجموعة الجزئية $[d, I]$ من $L$ تشكل شبكة ضربية بالنسبة للعملية $\circ$ حيث $x \circ y = xy \vee d$ لكل $x, y \in [d, I]$ . تسمى الشبكة الناتجة شبكة الخارج ويرمز لها أحياناً بالرمز $L/_d$. من أجل أي عنصر $a \in L$ فإن $\bar{a} = a \vee d$ هو عنصر من $L/_d$ .

**تعريف 1–17.** يكون العنصر أولي (ابتدائي) في $L/_d$ اذا وفقط اذا كان أولي (ابتدائي) في $L$.

**تعريف 1–18.** لتكن $L$ $K-$ شبكة و $S$ مجموعة جزئية غير خالية من $L$، يقال عن $S$ إنها مجموعة ضربية مغلقة في $L$ إذا كانت مغلقة بالنسبة للضرب، وكانت جميع عناصرها متراصة في $L$.

**2– الدراسة البحثية.**

سندرس في هذه الفقرة العناصر $S$ – الابتدائية الضعيفة في صف الـ $K-$ شبكات.

**تعريف 2−1.** لتكن $L$ شبكة و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$، وليكن $I \neq p \in L$ بحيث إن $t \not\leq p$ لكل $t \in S$. نقول عن $p$ إنه عنصر $S-$ أولي في $L$، إذا وجد $s \in S$ بحيث إنه لأجل أي عنصرين $a, b \in L$ يحققان أن $ab \leq p$، فإنه إما $sa \leq p$ أو $sb \leq p$.

**تعريف 2−2.** لتكن $L$ شبكة و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ ، وليكن $I \neq p \in L$ بحيث إن $t \not\leq p$ لكل $t \in S$. نقول عن $p$ إنه عنصر $S-$ أولي ضعيف في $L$ إذا وجد $s \in S$ بحيث إنه لأجل أي عنصرين $a, b \in L$ يحققان أن $0 \neq ab \leq p$ ، فإنه إما $sa \leq p$ أو $sb \leq p$.

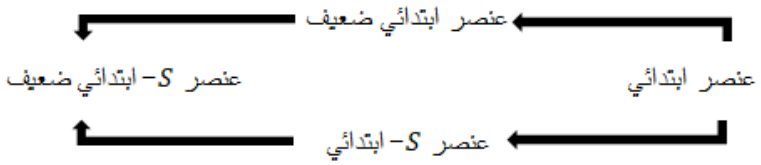
**تعريف 2−3.** لتكن $L$ شبكة و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ ، وليكن $I \neq q \in L$ بحيث إن $t \not\leq q$ لكل $t \in S$. نقول عن $q$ إنه $S-$ ابتدائي في $L$ ، إذا وجد $s \in S$ بحيث إنه لأجل أي عنصرين $a, b \in L$ ، يحققان أن $ab \leq q$ عندئذ فإنه إما $sa \leq q$ أو $sb \leq \sqrt{q}$.

**تعريف 2−4.** لتكن $L$ شبكة و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ ، وليكن $I \neq q \in L$ بحيث إن $t \not\leq q$ لكل $t \in S$. نقول عن $q$ إنه عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$، إذا وجد $s \in S$ بحيث إنه لأجل أي عنصرين $a, b \in L$ يحققان أن $0 \neq ab \leq q$ ، فإنه إما $sa \leq q$ أو $sb \leq \sqrt{q}$.

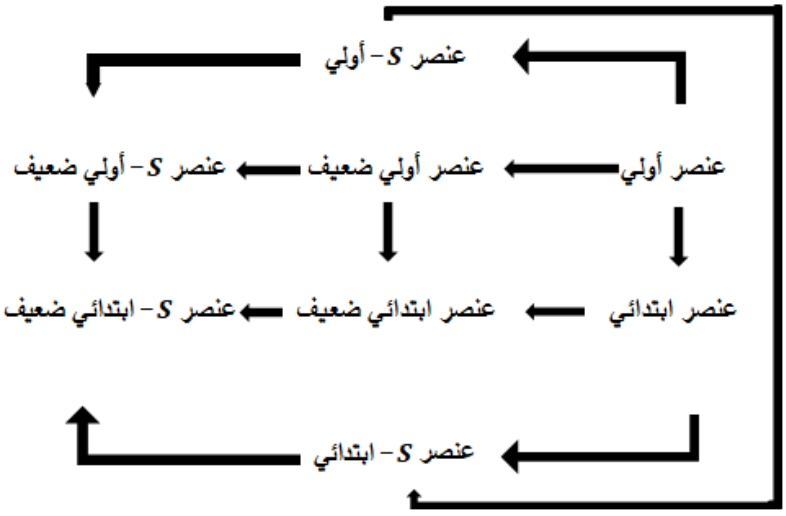
**نتيجة 2−1.** لتكن $L$ شبكة و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$، وليكن $I \neq q \in L$ بحيث إن $t \not\leq q$ لكل $t \in S$ ، عندئذ:

- اذا كان $q$ عنصراً ابتدائياً في $L$ فإن $q$ عنصر ابتدائي ضعيف في $L$.
- اذا كان $q$ عنصراً ابتدائياً في $L$ فإن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي في $L$.
- اذا كان $q$ عنصراً ابتدائياً ضعيفاً في $L$ فإن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$.
- اذا كان $q$ عنصراً $S-$ ابتدائياً في $L$ فإن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$.

ويمكن التعبير عن الاقتضاءات السابقة بالمخطط الآتي:




ويمكن التعبير أيضاً عن العلاقات التي تربط بين العنصر الابتدائي والعنصر الأولي وبعض تعميماتهما بالمخطط الآتي:




**ملاحظة.** ذكرنا في النتيجة السابقة أن كل عنصر $S$– ابتدائي في $L$ هو عنصر $S$– ابتدائي ضعيف في $L$، لكن العكس ليس بالضرورة صحيحاً، والمثال الآتي يوضح ذلك.

**مثال 2–1.** لتكن $L = L(Z_{10})$ شبكة مثاليات الحلقة $Z_{10}$ عندئذ تكون $L$ $K$– شبكة عنصرها الأكبر $< 1 >$ متراص. لنأخذ $S = \{< 1 >\}$. إن $< 0 >$ عنصر $S$– ابتدائي ضعيف في $L$ ، لكنه ليس $S$– ابتدائياً.

**قضية 2–1.** لتكن $L$ $K$– شبكة و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ ، وليكن $q \in L$ عنصراً $S$– ابتدائياً في $L$ عندئذ فإن $\sqrt{q}$ عنصر $S$– أولي في $L$ .

**البـرهـان.** ليكن $a,b \in L$ بحيث إن $ab \le \sqrt{q}$ ، عندئذ يوجد $n \in Z^+$ لأجله $a^n b^n = (ab)^n \le q$ . بما أن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي في $L$، فإنه يوجد $s \in S$ بحيث إنه إما $sa^n \le q$ أو $sb^n \le \sqrt{q}$ ، وبالتالي فإنه إما $(sa)^n \le q$ أو $(sb)^n \le q$ ومن ثم فإنه إما $sa \le \sqrt{q}$ أو $sb \le \sqrt{q}$ ، أي إن $\sqrt{q}$ عنصر $S-$ أولي في $L$ .

**قضية 2-2.** لتكن $K$ $L-$ شبكة و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ . وليكن $q \in L$ عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L$. إذا كان $0$ عنصراً $S-$ ابتدائياً في $L$، فإن $\sqrt{q}$ عنصر $S-$ أولي في $L$ .

**البـرهـان.** بما أن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$ فإن $t \notin q$ لكل $t \in S$. إن $t \notin \sqrt{q}$ لكل $t \in S$ ، لأنه لو وجد $t \in S$ بحيث إن $t \le \sqrt{q}$ فإنه يوجد $n \in Z^+$ يحقق أن $t^n \le q$ وهذا يناقض كون $t \notin \sqrt{q}$ لكل $t \in S$. ليكن $a,b \in L$ بحيث إن $ab \le \sqrt{q}$ عندئذ يوجد $m \in Z^+$ بحيث إن $a^m b^m = (ab)^m \le q$ . إذا كان $a^m b^m \ne 0$، ومن كون $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$، فإنه يوجد $s_1 \in S$ بحيث إنه إما $s_1 a^m \le q$ أو $s_1 b^m \le \sqrt{q}$، ومنه إما $(S_1 a)^m \le {s_1}^m a^m \le q$ أو $(S_1 b)^m \le {s_1}^m b^m \le \sqrt{q}$. وهذا يؤدي إلى أنه إما $s_1 a \le \sqrt{q}$ أو $s_1 b \le \sqrt{q}$، أي إن $\sqrt{q}$ عنصر $S-$ أولي في $L$.

من جهة ثانية اذا كان $a^m b^m = 0$، ومن كون $0$ عنصراً $S-$ ابتدائياً في $L$ ، فإنه يوجد $s_2 \in S$ بحيث إنه إما $s_2 a^m = 0$ أو $s_2 b^m \le \sqrt{0}$، وبالتالي فإنه إما $s_2 a \le \sqrt{0} \le \sqrt{q}$ أو $s_2 b \le \sqrt{0} \le \sqrt{q}$. لنضع $s = s_1 s_2$، فيكون لأجل أي عنصرين $x,y \in L$ بحيث إن $xy \le \sqrt{q}$ فإنه إما $sx = s_1 s_2 x \le s_2 x \le \sqrt{q}$ أو $sy = s_1 s_2 y \le s_1 y \le \sqrt{q}$، إذاً $\sqrt{q}$ عنصر $S-$ أولي في $L$ .

**ملاحظة.** في القضية $2-2$ لا يمكن الاستغناء عن الشرط $0$ عنصر $S-$ ابتدائي والمثال الآتي يبين ذلك.

**مثال 2-2.** لتكن $L = L(Z_{12})$ و $S = <1>$. إن $0$ في $L$ هو عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف وليس عنصراً $S-$ ابتدائياً و $\sqrt{0}$ ليس أوليًا.

**مبرهنة 2-1.** لتكن $L$ $K-$ شبكة عنصرها الأكبر $I$ متراص و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ و ليكن $q \in L$ عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L$ عندئذ:

(1) إذا كان $q$ ليس $S-$ ابتدائياً فإن $q^2 = 0$ .

(2) إذا كان $q$ ليس $S-$ ابتدائياً و جامداً فإن $q = 0$ .

(3) إذا كان $q$ ليس $S-$ ابتدائياً فإن $\sqrt{q} = \sqrt{0}$ .

(4) إذا كانت $L$ شبكة اختزالية فإنه إما $q = 0$ أو $q$ عنصر $S-$ ابتدائي .

**البرهان.**

(1) لنفرض جدلاً أن $q^2 \neq 0$، وليكن $a, b \in L$ بحيث إن $ab \leq q$. إذا كان $ab \neq 0$ فإن $ab \leq q$، ومن كون $q$ عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً فإنه يوجد $x \in S$ بحيث إنه إما $xa \leq q$ أو $xb \leq \sqrt{q}$ . أما إذا كان $ab = 0$ ، وفرضنا أن $aq \neq 0$ فإن $0 \neq aq = a(b \vee q) \leq q$، ومن كون $q$ عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً فإنه يوجد $x \in S$ بحيث إنه إما $xa \leq q$ أو $x(b \vee q) \leq \sqrt{q}$ ، وبالتالي إما $xa \leq q$ أو $xb \leq \sqrt{q}$. وبالمثل نجد أنه إذا فرضنا أن $bq \neq 0$ فإن $0 \neq bq = b(a \vee q) \leq q$ ، ومن كون $q$ عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً فإنه يوجد $x \in S$ بحيث إنه إما $xb \leq \sqrt{q}$ أو $x(a \vee q) \leq q$ ، ومنه إما $xb \leq \sqrt{q}$ أو $xa \leq q$ . وفي حال كان $bq = 0$ و $aq = 0$ وكون $q^2 \neq 0$ فإن $q^2 = (a \vee q)(b \vee q) \leq q$ ، ومن كون $q$ عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً فإنه يوجد $x \in S$ بحيث إنه إما $x(a \vee q) \leq q$ أو $x(b \vee q) \leq \sqrt{q}$ ، ومن ثم فإنه إما $xa \leq q$ أو $xb \leq \sqrt{q}$ . وبالتالي نجد أن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي وهذا يناقض الفرض بأن $q$ ليس $S-$ ابتدائياً . إذاً الفرض الجدلي خاطئ و $q^2 = 0$.

(2) بفرض $q$ ليس $S-$ ابتدائياً وجامداً عندئذ حسب (1) يكون $q^2 = 0$ ومن كون $q$ جامداً بالفرض فإن $q = q^2 = 0$ .

(3) بفرض $q$ ليس $S-$ ابتدائياً، عندئذ حسب (1) يكون $q^2 = 0$ ، ومنه $q \leq \sqrt{0}$، وبالتالي $\sqrt{q} \leq \sqrt{0}$، ومن كون $0 \leq q$ فإن $\sqrt{q} \leq \sqrt{0}$. مما سبق نجد أن $\sqrt{q} = \sqrt{0}$ .

(4) لتكن $L$ شبكة اختزالية ولنفرض أن $q$ ليس عنصراً $S-$ ابتدائياً في $L$ عندئذ حسب (1) يكون $q^2 = 0$ ومن كون $L$ شبكة اختزالية ينتج أن $q = 0$ .

**نتيجة 2-2.** لتكن $L\ K-$ شبكة عنصرها الأكبر $I$ متراص و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ وليكن $q \in L$ عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L$ وليس عنصراً $S-$ ابتدائياً، اذا كان $qd = d$ حيث $d \in L$ فإن $d = 0$.

**البرهان.** بما أن $q$ ليس عنصراً $S-$ ابتدائياً في $L$ فإنه حسب (1) من المبرهنة $2-1$ يكون $q^2 = 0$ ، ومنه $d = qd = q(qd) = q^2d = 0$ .

**مبرهنة 2 − 2.** لتكن $L\ K-$ شبكة عنصرها الأكبر $I$ متراص و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ ، وليكن $q$ عنصراً من $L$ بحيث إن $t \nleq q$ لكل $t \in S$، عندئذ الشرطان الآتيان متكافئان:

(1) $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$.

(2) يوجد عنصر $s \in S$ بحيث إن $(q:a) = (0:a)$ أو $(q:a) \leq (q:s)$ ، لكل $a \nleq (\sqrt{q}:s)$ .

**البرهان.**

$(\mathbf{1}) \Longleftarrow (\mathbf{2})$. لنفرض أن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$. عندئذ يوجد $s \in S$ بحيث إنه لأجل أي عنصرين $b, d$ من $L$ يحققان $0 \neq bd \leq q$ فإنه إما $sb \leq q$ أو $sd \leq \sqrt{q}$ .لنأخذ العنصر a من $L$ بحيث $a \nleq (\sqrt{q}:s)$ ، ومن ثم بفرض أنه $(q:a) \neq (0:a)$ عندئذ يوجد عنصر متراص $c$ من $L$ بحيث إن $c \leq (q:a)$ و $c \nleq (0:a)$ ومنه $ca \leq q$ و $ca \neq 0$ ، وبما أن $sa \nleq \sqrt{q}$ و $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$ فإن $sc \leq \sqrt{q}$ . لنبرهن أن $(q:a) \leq (q:s)$. ليكن $x$ عنصراً متراصاً من $L$ بحيث إن $x \leq (q:a)$ ، عندئذٍ $xa \leq q$ . اذا كان $xa \neq 0$ ومن كون $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$ فإنه إما $sa \leq \sqrt{q}$ أو $sx \leq q$، لكن بما أن $sa \nleq \sqrt{q}$ فإننا نحصل على أن $sx \leq q$ ومنه $x \leq (q:s)$ وبالتالي $(q:a) \leq (q:s)$ .

من جهة ثانية اذا كان $xa = 0$ فإن $0 \neq ca = ca \vee 0 = ca \vee xa = (c \vee x)a$ ، ومن كون $0 \neq ca \leq q$ فإن $0 \neq (c \vee x)a \leq q$ ، وبما أن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$ و $sa \nleq$ $\sqrt{q}$ فإن $s(c \vee x) \leq q$ ومنه $sx \leq s(c \vee x) \leq q$ وهذا يؤدي الى أن $x \leq (q:s)$ أي $(q:a) \leq (q:s)$، ومن ثم يكون لدينا $(q:a) \leq (q:s)$ لكل $a \nleq (\sqrt{q}:s)$ .

**(2) ⟸ (1)**. لنفرض أن (2) محقق ولنبرهن أن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$. ليكن $b, c \in L$ بحيث إن $0 \neq bc \leq q$، ولنفرض أن $sb \nleq \sqrt{q}$ ولنبرهن أن $sc \leq q$. من كون $sb \nleq \sqrt{q}$ يكون $b \nleq (\sqrt{q}:s)$ وبما أن $0 \neq bc \leq q$ فإن $c \leq (q:b)$ و $c \nleq (0:b)$ اذاً $(q:b) \neq (0:b)$. ومن كون $sb \nleq \sqrt{q}$ و $(q:b) \neq (0:b)$ فإنه حسب (2) يكون $(q:b) \leq (q:s)$ ومنه $c \leq (q:s)$ وهذا يؤدي الى أن $sc \leq q$ وبالتالي $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$.

**قضية 2-3**. لتكن $L$ $K-$ شبكة عنصرها الأكبر $I$ متراص و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$، وليكن $q$ عنصراً من $L$ بحيث إن $t \nleq q$ لكل $t \in S$، إذا وجد $s \in S$ بحيث إن $(q:s)$ عنصر ابتدائي ضعيف في $L$ فإن $q$ يكون عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L$ .

**البرهان**. لنفرض أنه يوجد $s \in S$ لأجله يكون $(q:s)$ عنصر ابتدائي ضعيف في $L$، ولنبرهن أن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$. ليكن $a, b \in L$ بحيث إن $0 \neq ab \leq q$. بما أن $q \leq (q:s)$ فإن $0 \neq ab \leq (q:s)$ وبما أن $(q:s)$ عنصر ابتدائي ضعيف في $L$ فإنه يكون إما $a \leq (q:s)$ أو $b \leq \sqrt{(q:s)}$ أي إما $a \leq (q:s)$ أو يوجد $n \in Z^+$ بحيث يكون $b^n \leq (q:s)$ وهذا يؤدي الى أنه إما $sa \leq q$ أو $(bs)^n \leq b^n s \leq q$ ومنه يكون إما $sa \leq q$ أو $sb \leq \sqrt{q}$ وبالتالي فإن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$ .

**قضية 2 – 4**. لتكن $L$ $K-$ شبكة عنصرها الأكبر $I$ متراص و $S_1, S_2$ مجموعتين ضربيتين مغلقتين في $L$ بحيث إن $S_1 \subseteq S_2$ وليكن $q \in L$ عنصراً $S_1-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L$ . عندئذ يكون $q$ عنصراً $S_2-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L$ لكل $t \in S_2$ و $t \nleq q$.

**البرهان.** بما ان $q$ عنصر $S_1$– ابتدائي ضعيف في $L$ فإنه يوجد $t \in S_1$ بحيث إنه لأجل أي عنصرين $a,b \in L$ يحققان $0 \neq ab \leq q$ فإنه إما $ta \leq q$ أو $tb \leq \sqrt{q}$ ومن كون $S_1 \subseteq S_2$ فإن $t \in S_2$ ويحقق المطلوب.

إن عكس القضية $(2-4)$ ليس بالضرورة صحيحاً والمثال الآتي يبين ذلك:

**مثال 2 – 3.** لتكن $L = L(Z_{12})$ شبكة مثاليات الحلقة $Z_{12}$ عندئذ $L$ تكون $K$ – شبكة عنصرها الأكبر $< 1 >$ متراص.لنأخذ $S_1 =< 1 >$ $S_2 = \{< 1 >, < 2 >, < 4 >\}$ المجموعتين الضربيتين المغلقتين في $L$ وحيث $S_1 \subseteq S_2$، عندئذ يكون $< 6 >$ عنصرًا $S_2$ – ابتدائيًا ضعيفًا في $L$ ولكنه ليس عنصراً $S_1$– ابتدائياً ضعيفاً في $L$ .

**تعريف 2 – 5.** لتكن $K\ L$– شبكة و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$. نعرف المجموعة $S^*$ بأنها مجموعة كل العناصر المتراصة من $L$ والتي لأجل كل عنصر $x$ منها يوجد عنصر متراص $y$ من $L$ يحقق أن $xy \in S$ . أي إن:

$$S^* = \{x \in L; x\ is\ compact\ in\ L \setminus\ xy \in S\ \ for\ some\ compact\ y \in L\}.$$

واضح أن $S^*$ هي مجموعة ضربية مغلقة في $L$، كما أن $S \subseteq S^*$ .

**مثال 2–4.** لتكن $L = L(Z_{12})$ شبكة مثاليات الحلقة$Z_{12}$، ولتكن $S = \{< 1 >, < 4 >\}$ عندئذٍ $S^* = \{< 1 >, < 2 >, < 4 >\}$ . إن $S \subseteq S^*$ .

**قضية 2–5.** لتكن $K\ L$–شبكة عنصرها الأكبر $I$ متراص، و$S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ وليكن $I \neq q \in L$ بحيث إن $t \not\leq q$ لكل $t \in S$ عندئذ يكون $q$ عنصراً $S$– ابتدائياً ضعيفاً في $L$ إذا وفقط إذا كان $q$ عنصراً $S^*$– ابتدائياً ضعيفاً في $L$ .

**البـرهــان.** لنفرض أن $q$ عنصر $S$– ابتدائي ضعيف في $L$. عندئذٍ فإنه يكون $q$ عنصرًا $S^*$– ابتدائيًا ضعيفًا في $L$، وذلك حسب القضية $2-4$ ومن كون $S \subseteq S^*$ .

من أجل العكس، لنفرض أن $q$ عنصر $S^*$– ابتدائي ضعيف في $L$. عندئذٍ لأجل أي عنصرين $a,b \in L$ بحيث إن $0 \neq ab \leq q$، يوجد $s^* \in S^*$ يحقق أنه إما $s^*\mathrm{a} \leq \mathrm{q}$ أو $s^*b \leq \sqrt{q}$، ولنبرهن أن

$q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$. ليكن $x,y \in L$ بحيث إن $0 \neq xy \leq q$، عندئذٍ $s^*x \leq q$ أو $s^*y \leq \sqrt{q}$. بما أن $s^* \in S^*$، فإنه يوجد عنصر متراص $t \in L$ بحيث إن $s^*t \in S$. لنضع $s^*t = s$ فيكون $sx = s^*tx \leq s^*x \leq q$ أو $sy = s^*ty \leq s^*y \leq \sqrt{q}$ . ومنه $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$.

**قضية 2-6.** لتكن $L$ $K-$ شبكة عنصرها الأكبر $I$ متراص و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$، وليكن $q \in L$ عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L$. إذا كان $p$ عنصرًا ما من $L$ لأجله يوجد $t \in S$ بحيث $t \leq p$، فإن كلًا من $pq$ و $p \wedge q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$.

**البـرهـان.** بما أن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$ ، فإن $t \nleq q$ لكل $t \in S$، ومنه $t \nleq p \wedge q$ و $t \nleq pq$ لكل $t \in S$. ليكن $a,b \in L$ بحيث إن $0 \neq ab \leq pq$ عندئذٍ $0 \neq ab \leq q$ . بما أن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$، فإنه يوجد $s \in S$ بحيث إنه إما $sa \leq q$ أو $sb \leq \sqrt{q}$. لنأخذ $t_1 \in S$ بحيث إن $t_1 \leq p$، عندئذ إما $t_1sa \leq pq$ أو $t_1sb \leq \sqrt{pq}$، ومنه $pq$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$. لنبرهن أن $p \wedge q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$ . ليكن $c,d \in L$ بحيث إن $0 \neq cd \leq p \wedge q$، عندئذٍ $0 \neq cd \leq q$. بما أن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$، فإنه يوجد $s \in S$ بحيث إن $sc \leq q$ أو $sd \leq \sqrt{q}$. لنأخذ $t_2 \in S$ بحيث إن $t_2 \leq p$، عندئذ إما $t_2sc \leq pq \leq p \wedge q$ أو $t_2sd \leq \sqrt{q}p \leq \sqrt{q} \wedge \sqrt{p} \leq \sqrt{p \wedge q}$. ومنه $p \wedge q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$ .

**قضية 2 – 7.** لتكن $L$ $K-$ شبكة عنصرها الأكبر $I$ متراص و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ وبفرض $q_1, \dots, q_n$ عناصر $S-$ ابتدائية ضعيفة في $L$. إذا كان $\sqrt{q_i} = \sqrt{q_j}$ لكل $i,j = 1, \dots, n$ ، فإن $q = \wedge_{i=1}^{n} q_i$ يكون عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L$. وبشكل خاص، إذا كانت $q_1, \dots, q_n$ ليست عناصر $S-$ ابتدائية في $L$، فإن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$.

**البـرهـان.** بما أن $q_1, \dots, q_n$ عناصر $S-$ ابتدائية ضعيفة في $L$ ، فإن $t \nleq q_i$ $(i = 1, \dots, n)$ لكل $t \in S$، ومنه $t \nleq q = \wedge_{i=1}^{n} q_i$ لكل $t \in S$. من جهة أخرى، من أجل أي عنصرين $a,b \in L$

يحققان $0 \neq ab \leq q_i$ يوجد $s_i \in S$ يكون لأجله إما $s_i a \leq q_i$ أو $s_i b \leq \sqrt{q_i}$ . لنضع $s = s_1\, s_2 \dots s_n$، وليكن $x, y \in L$ بحيث إن $0 \neq xy \leq q$ ، ولنفرض أن $sx \nleq q$، عندئذ يوجد دليل $j$ بحيث إن $sx \nleq q_j$. إذا كان $s_j x \leq q_j$ فإن $sx \leq s_j x \leq q_j$ وهذا يناقض كون $sx \nleq q_j$، وبالتالي فإن $s_j x \nleq q_j$. إذاً $s_j y \leq \sqrt{q_j}$ . بما أن $\sqrt{q_i} = \sqrt{q_j}$ وذلك لكل $i, j = 1, \dots, n$ ، فإن $\sqrt{q} = \sqrt{\Lambda_{i=1}^{n} q_i} = \Lambda_{i=1}^{n} \sqrt{q_i} = \sqrt{q_i}$ لكل $i = 1, \dots, n$ [1, Lemma 1.]. ومنه $s_j y \leq \sqrt{q}$، وهذا يؤدي إلى أن $sy \leq s_j y \leq \sqrt{q}$ . إذاً $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$.

لنفرض الآن أن $q_1 , \dots, q_n$ ليست عناصر $S-$ ابتدائية في $L$ ، فإنه حسب (3) من المبرهنة $2-1$ يكون $\sqrt{q_i} = \sqrt{0}$ لكل $i = 1, \dots, n$، ومنه $\sqrt{q_i} = \sqrt{q_j}$ لكل $i, j = 1, \dots, n$ ، وبالتالي فإن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي ضعيف في $L$ .

**قضية 2-8.** لتكن $L$ $K-$ شبكة و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ و ليكن $k \in L$ عنصراً متراصاً في $L$، عندئذ تكون $\bar{S} = \{\bar{s} = s \vee k \,;\, s \in S\}$ مجموعة ضربية مغلقة في $L/_k$ .

**البرهان.** ليكن $k \in L$ عنصرًا متراصًا في $L$ ، عندئذٍ $\bar{s} = s \vee k \in \bar{S}$ عنصر متراص في $L/_k$ لكل $s \in S$، ومنه جميع عناصر $\bar{S}$ متراصة في $L/_k$. لنبرهن أن $\bar{S}$ مغلقة بالنسبة لعملية الضرب $\circ$ المعرفة في $L/_k$. ليكن $\bar{x}, \bar{y} \in \bar{S}$، عندئذٍ:

$$\bar{x} \circ \bar{y} = (x \vee k) \circ (y \vee k) = (x \vee k)(y \vee k) \vee k = xy \vee xk \vee yk \vee k^2 \vee k$$
$$= xy \vee k \in \bar{S}$$

مما سبق نجد أن $\bar{S}$ هي مجموعة ضربية في $L/_k$ .

**مبرهنة 2-3.** لتكن $L$ $K-$شبكة عنصرها الأكبر $I$ متراص و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $L$ وليكن $q, k \in L$ بحيث إن $k$ عنصر متراص في $L$ و $k \leq q$ عندئذ القضايا الآتية صحيحة:

(1) إذا كان $q$ عنصراً $S-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L$ فإن $q \vee k = \bar{q}$ عنصر $\bar{S}-$ ابتدائي ضعيف في شبكة الخارج $L/_k$.

(2) إذا كان $k$ عنصراً $S-$ ابتدائياً في $L$ ، و $q \vee k = \bar{q}$ عنصراً $\bar{S}-$ ابتدائياً ضعيفاً في شبكة الخارج $L/_k$ ، فإن $q$ عنصر $S-$ ابتدائي في $L$.

(3) إذا كان $k$ عنصراً $S$– ابتدائياً ضعيفاً في $L$ و $q \vee k = \bar{q}$ عنصراً $\bar{S}$– ابتدائياً ضعيفاً في شبكة الخارج $L/_k$ ، فإن $q$ عنصر $S$– ابتدائي ضعيف في $L$.

**البـرهـان.**

(1) لدينا $\bar{t} \nleq \bar{q}$ لكل $\bar{t} \in \bar{S}$، لأنه لو وجد $\overline{t_1} \in \bar{S}$ بحيث إن $t_1 \vee k = \overline{t_1} \leq \bar{q}$ و $t_1 \in S$ لكان $t_1 \leq q$، وهذا تناقض مع كون $q$ عنصراً $S$– ابتدائياً ضعيفاً في $L$ ، ومنه $\bar{t} \nleq \bar{q}$ لكل $\bar{t} \in \bar{S}$ . ليكن $\bar{a}, \bar{b} \in L/_k$ بحيث إن $k \neq \bar{a} \circ \bar{b} \leq \bar{q}$ ، عندئذ يكون $k \neq ab \vee k \leq q \vee k$، وبما أن $k \leq q$ نجد أن $k \neq ab \leq q$، ومن كون $q$ عنصراً $S$– ابتدائياً ضعيفاً في $L$، فإنه يوجد $s \in S$ بحيث إنه إما $sa \leq q$ أو $sb \leq \sqrt{q}$. ومن ثم يكون إما $\bar{s} \circ \bar{a} = (s \vee k)(a \vee k) \vee k = sa \vee k \leq q \vee k = \bar{q}$ أو

$$\bar{s} \circ \bar{b} = (s \vee k)(b \vee k) \vee k = sb \vee k \leq \sqrt{q} \vee k \leq \overline{\sqrt{q}}$$

مما سبق نجد أن $\bar{q}$ عنصر $\bar{S}$– ابتدائي ضعيف في $L/_k$ .

(2) لنفرض أن $\bar{q}$ عنصر $\bar{S}$– ابتدائي في $L/_k$ ، و $k$ عنصر $S$– ابتدائي في $L$ . إن $t \nleq q$ لكل $t \in S$ ، لأنه لو وجد $t_1 \in S$ بحيث إن $t_1 \leq q$ لكان $t_1 \vee k \in \bar{S}$ وكان أيضاً $\overline{t_1} = t_1 \vee \mathrm{k} \leq q \vee k = \bar{q}$، وبالتالي يوجد $\overline{t_1} \in \bar{S}$ بحيث إن $\overline{t_1} \leq \bar{q}$ وهذا تناقض مع كون $\bar{q}$ عنصراً $\bar{S}$– ابتدائياً ضعيفاً في $L/_k$ . ليكن $a, b \in L$ بحيث إن $ab \leq q$. بما أن $k \leq q$ فإن $(a \vee k)(b \vee k) \leq ab \vee k \leq q$. إذا كان $ab \leq k$ فإن $ab \vee k = k$ من $L/_k$، ومنه $(a \vee k)(b \vee k) = ab \vee k \leq k$، وبما أن $k$ عنصر $S$– ابتدائي في $L$، فإنه يوجد $t \in S$ بحيث إنه إما $t(a \vee k) \leq k \leq q$ أو $t(b \vee k) \leq \sqrt{k} \leq \sqrt{q}$ ، ومنه إما $ta \leq q$ أو $tb \leq \sqrt{q}$، أي $q$ عنصر $S$– ابتدائي في $L$. وإذا كان $ab \nleq k$ فإنه إما $k \nleq ab$ أو $k \leq ab$ . إذا كان $k \nleq ab$ فإنه $k \nleq q$ وهذا تناقض. وبالتالي $k \leq ab$ ومنه $k \neq ab \vee k \leq ab \leq q \leq q \vee k$ وبالتالي $\bar{a} \circ \bar{b} \leq \bar{q}$ ومن كون $q \vee k = \bar{q}$ عنصر $\bar{S}$– ابتدائي ضعيف في $L/_k$ فإنه يوجد $\bar{y} \in \bar{S}$ بحيث إنه إما $\bar{y} \circ \bar{a} \leq \bar{q}$ أو $\bar{y} \circ \bar{b} \leq \sqrt{\bar{q}} = \sqrt{q \vee k}$ ، ومنه إما $ya \leq ya \vee k \leq q$ أو $yb \leq yb \vee k \leq \sqrt{q}$. مما سبق ينتج أن $q$ عنصر $S$– ابتدائي في $L$ .

(3) إن $t \notin q$ لكل $t \in S$ لأنه لو وجد $t_1 \in S$ بحيث إن $t_1 \leq q$ لكان $t_1 \vee k \in \bar{S}$ وبحيث $t_1 \vee k \leq q \vee k = \bar{q}$ ، وبالتالي يوجد $\bar{t_1} \in \bar{S}$ يحقق إن $\bar{t_1} \leq \bar{q}$ وهذا يتناقض مع كون $\bar{q}$ عنصراً $\bar{S}-$ ابتدائياً ضعيفاً في $L/_k$. بالطريقة نفسها التي تم فيها برهان (2) نكمل برهان (3) ، وذلك بأخذ $a, b \in L$بحيث إن $0 \neq ab \leq q$ ، ونبرهن على وجود $s \in S$ يحقق أنه إما $sa \leq q$ أو $sb \leq \sqrt{q}$ .

**قضية 2-9.** لتكن $R$ حلقة تبديلية وواحدية و $L = L(R)$ شبكة مثاليات الحلقة $R$. إذا كانت $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $R$ ، فإن المجموعة $S_L = \{< x >;\ x \in S\}$ هي مجموعة ضربية مغلقة في الشبكة الضربية $L = L(R)$.

**البرهان.** لتكن $S$ مجموعة ضربية في $R$، ولنبرهن أن المجموعة $S_L = \{< x >;\ x \in S\}$ هي مجموعة ضربية مغلقة في الشبكة الضربية $L = L(R)$. واضح أن عناصر $S_L$ متراصة. ليكن $< x >, < y > \in S_L$ عندئذٍ $x, y \in S$ ، ومن كون $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $R$ فإن $x.y \in S$، ومنه $< x >.< y >=< xy > \in S_L$. مما سبق نجد أن $S_L$ مجموعة ضربية مغلقة في الشبكة الضربية $L = L(R)$.

**مبرهنة 2-4.** لتكن $R$ حلقة تبديلية وواحدية و $S$ مجموعة ضربية مغلقة في $R$ ، ولتكن $Q$ مثالية في $R$ منفصلة عن $S$، و $L = L(R)$ شبكة مثاليات الحلقة $R$ الضربية. عندئذ الشرط اللازم والكافي لتكون $Q$ مثالية $S-$ ابتدائية ضعيفة في $R$ هو أن تكون $Q$ عنصرًا $S_L-$ ابتدائيًا ضعيفًا في الشبكة الضربية $L = L(R)$.

**البرهان.** لنفرض أن $Q$ مثالية $S-$ ابتدائية ضعيفة في $R$، عندئذٍ $S \cap Q = \emptyset$ ، ويكون لدينا $x \in S$ لكل $Q \nsubseteq < x >$ . ليكن $A, B \in L = L(R)$ بحيث إن $0 \neq AB \subseteq Q$، عندئذٍ ومن كون $Q$ مثالية $S-$ ابتدائية ضعيفة في $R$، فإنه يوجد $x \in S$ بحيث إنه إما $xA \subseteq Q$ أو $xB \subseteq \sqrt{Q}$، ومن ثم فإنه إما $A \subseteq Q :< x >$ أو $B \subseteq \sqrt{Q} :< x >$. مما سبق نجد أن $Q$ عنصر $S_L-$ ابتدائي ضعيف في $L = L(R)$ . وبالعكس، لنفرض أن $Q$ عنصر $S_L-$ ابتدائي ضعيف في $L = L(R)$ ، عندئذٍ $t \notin Q$

لكل $t \in S_L$ ومنه $S \cap Q = \emptyset$، لأنه لو وجد $a \in S \cap Q$، لكان $< a > \in S_L$ و $< a > \in Q$ وهذا تناقض. بما أن $Q$ عنصر $S_L-$ ابتدائي ضعيف في $L = L(R)$ فإنه يوجد $< x > \in S_L$ $(s \in S)$ بحيث إنه لأجل أي عنصرين $A, B$ من $L$ يحققان $0 \neq AB \leq Q$ ، فإنه إما $< x > A \leq Q$ أو $< x > B \leq \sqrt{Q}$، وبالتالي فإن $Q$ مثالية $S-$ ابتدائية ضعيفة في $R$.

## المـراجــع العلـمـيــة

[1] Almahdi, F. A. Bouba, E. M. and Tamekkante, M. (2021) On weakly S-prime ideals of commutative rings, Analele Stiint. Ale. Univ. Ovidius Constanta Ser. Mat., Sciiendo, 29 (2), 173-186.

[2] Anderson D. D. (1976) Abstract commutative ideal theory without chain condition, Algebra Univrs., 6, 131-145.

[3] Anderson D. D. and Smith, E. (2003) Weakly prime ideals. Houston J. Math., 29, 831-840.

[4] Atani, S. E. and Farzalipour, F. (2005) On weakly primary ideals. Georgian Mathematical Journal , 12 (3), 423-429.

[5] Ballal, S., Gophane, M. and Kharat, V. (2016) On weakly primary elements in multiplicative lattices. Southeast Asian Bulletin of Mathematics, 40 (1), 439-449.

[6] Callıalp, F., Jayaram, C. and Tekir, Ü. (2012) Weakly prime elements in multiplicative lattices. Communications in Algebra, 40 (8), 2825-2840.

[7] Celikel, E.Y. and Khashan, H., (2021). On weakly S- primary ideals of a commutative rings. Journal of Algebra Appli., 23 (10).

[8] Dilworth, R. P. (1962) Abstract commutative ideal theory, Pacific J. Math., 12, 481-498.

[9] Hamed, A. and Malek, A. (2020), S-Prime ideals of a commutative ring, Beitr. Algebra und Geom., 61(3), 533-542.

[10] Jayaram, C. and Johnson, E. W. (1995) S- Prime elements in multiplicative lattices. V. 31 (3), 201-208.

[11] Joshi, V. and Sarode, S. (2015) Beck's conjecture and multiplicative lattices. Discrete Math. 338 (3), 93-98.

[12] Massaoud, E., (2021), S- primary ideals of commutative ring, Commun. Algebra, 50 (3), 988-997.

[13] Nakkar, H. M., (1974), Localization in multiplicative lattice modules. Mat. Issledovanija, Kishinev, 2(32), 88-108.

[14] Nakkar, H. M. and Anderson, D. D. (1988) Associated and weakly associated prime elements and primary decomposition in lattice modules. Algebra Universalis, 25, 196-209.

[15] Nakkar, H. M., Al- Khouja, E. A. (1995) Noetherian lattices in which every element is a product of primary elements, Order 12, 413-420.

[16] Nakkar, H. M., Al- Khouja, E. A. (2003) Multiplicative lattices with Noetherian spectrum, Mu'tah Lil-Buhuth wad-Dirasat, V0l. 18, No. 1, 11-20.

[17] Reinhart, A. Ulucak, G. (2025) Multiplicative Lattices with absorbing factorization. Communications in Algebra, 1-19.

[18] Visweswaran, S. (2022), Some results on S- primary ideals of a commutative ring. Beitr. Algebra Geom., 63, 247-266.