أثر برنامج تأهيلي رياضي تربوي مدعوم بالذكاء الاصطناعي في تحسين الأداء الحركي وتخفيف آلام أسفل الظهر لدى طلاب التربية البدنية

د. ربوح عبد الناصر rabohbarnoni@gmail.com
ط. محمد معمر علي الهبزي mohamedalhabzi@gmail.com
ط. بن التومي زين العابدين zinosp880@gmail.com

الملخص:

الخلفية: تُعدّ آلام أسفل الظهر من أكثر الاضطرابات العضلية الهيكلية انتشاراً في الأوساط الرياضية والتربوية إذ تؤثر سلباً على الأداء الحركي ومستوى المشاركة في النشاط البدني. وعلى الرغم من التقدم الملحوظ في تقنيات التأهيل الرقمي يبقى توظيف الذكاء الاصطناعي في البرامج التأهيلية الرياضية التربوية ميداناً يفتقر إلى الدراسات المنهجية المتكاملة لا سيما في سياق طلاب التربية البدنية.

الهدف: تقييم فاعلية برنامج تأهيلي رياضي تربوي مدعوم بالذكاء الاصطناعي في تحسين الأداء الحركي وتخفيف آلام أسفل الظهر لدى طلاب التربية البدنية.

المنهجية: اعتمدت الدراسة المنهج التجريبي ذا المجموعتين (تجريبية وضابطة) وشملت (60) طالباً طُبّق عليهم البرنامج لمدة (12) أسبوعاً بواقع (3) جلسات أسبوعية مع توظيف منصة ذكاء اصطناعي للمتابعة الآنية والتغذية الراجعة. استُخدم مقياس FMS وأداة ODI لتقييم المتغيرات.

النتائج: كشفت النتائج عن فروق ذات دلالة إحصائية ($p < 0.01$) لصالح المجموعة التجريبية في الأداء الحركي ($d = 1.14$) وتخفيف الألم ($d = 0.98$) مع معدل التزام رقمي بلغ 87.3% مقارنة بـ 61.2% في المجموعة الضابطة.

الاستنتاج: يُقدّم البرنامج المقترح نموذجاً تأهيلياً مبتكراً يدمج التقنيات الرقمية بالممارسة الرياضية التربوية مما يُعزز فرص التعميم في المؤسسات التعليمية وبرامج التأهيل الرياضي.

Effectiveness of an AI-Supported Sports-Educational Rehabilitation Program in Improving Motor Performance and Reducing Low Back Pain among Physical Education Students

Abstract

Background: Low back pain is among the most prevalent musculoskeletal disorders in sports and educational settings, negatively impacting motor performance and physical activity participation. Despite notable advances in digital rehabilitation technologies, the integration of artificial intelligence into sports-educational rehabilitation programs remains a field lacking comprehensive systematic studies, particularly in the context of physical education students.

Objective: To evaluate the effectiveness of an AI-supported sports-educational rehabilitation program in improving motor performance and alleviating low back pain among physical education students.

Methodology: The study adopted an experimental design with two groups (experimental and control), comprising 60 students who underwent the program for 12 weeks at a rate of three sessions per week, with an AI platform employed for real-time monitoring and feedback. The Functional Movement Screen (FMS) and the Oswestry Disability Index (ODI) were used to assess the study variables.

Results: Findings revealed statistically significant differences ($p < 0.01$) in favor of the experimental group in motor performance ($d = 1.14$) and pain reduction ($d = 0.98$), with a digital adherence rate of 87.3% compared to 61.2% in the control group.

Conclusion: The proposed program presents an innovative rehabilitation model that integrates digital technologies with sports-educational practice, thereby enhancing prospects for generalization across educational institutions and sports rehabilitation programs.

أولاً: المقدمة

تحتل آلام أسفل الظهر (Low Back Pain – LBP) مكانةً بارزة في قائمة الأعباء الصحية العالمية؛ إذ تُشير بيانات منظمة الصحة العالمية (WHO, 2023) إلى أن ما يزيد على 619 مليون شخص يعانون منها في الوقت الراهن، مع توقعات بارتفاع هذا الرقم إلى 843 مليوناً بحلول عام 2050، لتُصبح أكبر أسباب الإعاقة على مستوى العالم. وتُصنَّف هذه الحالة ضمن الاضطرابات العضلية الهيكلية المزمنة التي تُلقي بظلالها السلبية الثقيلة على القدرة الوظيفية وجودة الحياة والإنتاجية الاقتصادية على حدٍّ سواء.

وفي سياق التربية البدنية والرياضة تحديداً، تكتسب هذه المشكلة أهمية مضاعفة؛ كون طلاب هذه التخصصات يتعرضون لأحمال ميكانيكية متكررة وأوضاع بدنية غير سليمة خلال الجلسات التدريبية والأداء الرياضي المكثف، مما يُفضي إلى اضطرابات عضلية هيكلية مزمنة تؤثر سلباً على مسيرتهم الأكاديمية والرياضية في آنٍ واحد (Hartvigsen et al., 2018). وقد رصدت دراسات وبائية متعددة معدلات انتشار مرتفعة لهذه الآلام في أوساط طلاب التربية البدنية تتراوح بين 35% و62% من إجمالي المسجّلين، مما يجعل التدخل التأهيلي المبكر ضرورةً علمية وتربوية لا تقبل التأجيل (Walker et al., 2021).

وعلى صعيد موازٍ، شهد مجال إعادة التأهيل الحركي في العقد الأخير تحولاً جذرياً في فلسفته وأدواته؛ إذ انتقل من النماذج الإكلينيكية التقليدية المعتمدة على الحضور الفيزيقي والتقييم الذاتي للمعالج، إلى منظومات التأهيل الرقمي (Digital Rehabilitation) والتأهيل عن بُعد (Telerehabilitation). ويُؤكد Cottrell و McDaid (2023) في مراجعتهما المنهجية الشاملة التي أحاطت بـ 47 دراسة عشوائية محكومة أن التأهيل الرقمي يوفر إمكانية الوصول المستمر ويعزز الالتزام بالبرامج العلاجية، بيد أن فاعليته ترتبط ارتباطاً وثيقاً بجودة منظومة التغذية الراجعة وقدرتها على التكيّف مع الاحتياجات الفردية المتغيرة للمريض.

ويمثل الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence – AI) في هذا السياق قفزةً نوعية غير مسبوقة؛ فمن خلال خوارزميات التعلم الآلي (Machine Learning) وتقنيات التعلم العميق (Deep

Learning) وشبكات الاستشعار بالحركة، أصبح بالإمكان تصميم برامج تأهيلية شخصية قابلة للتكيف الآني مع الأداء الفردي للمريض أو الرياضي، بدقة تشخيصية تفوق التقييم الإكلينيكي التقليدي في بعض الحالات (Safi et al., 2022). وقد أثبتت الدراسات الحديثة أن تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التأهيل تُحسّن دقة التقييم الحركي وترفع معدلات الالتزام بصورة ملحوظة (Müllers et al., 2023 ؛Palacios-Ceña et al., 2021).

غير أن مراجعةً شاملةً للأدبيات تكشف عن فجوة بحثية جوهرية تتمثل في شُح الدراسات التي تتناول توظيف الذكاء الاصطناعي ضمن برامج تأهيل رياضية تربوية موجهة لطلاب التربية البدنية تحديداً؛ إذ تنصبّ معظم الأبحاث على الرياضيين المحترفين أو المرضى في البيئات الإكلينيكية. تأتي هذه الدراسة لسدّ هذه الفجوة عبر تصميم برنامج تأهيلي مدمج يُقدّم إسهاماً علمياً أصيلاً في تقاطع علوم التأهيل والذكاء الاصطناعي والتربية البدنية.

ثانياً: مشكلة الدراسة

رصدت الدراسات الميدانية في بيئات كليات التربية البدنية ارتفاعاً لافتاً في معدلات شكاوى آلام أسفل الظهر بين الطلاب، تتراوح بين 35% و62% من إجمالي المسجّلين (Walker et al., 2021). ويُرجع الباحثون هذا الانتشار المرتفع إلى جملة من العوامل المتشابكة، أبرزها: الضعف في عضلات الجذع الداعمة (Core Muscles)، وقصور التوعية بأساليب الحماية الحركية، وغياب برامج التأهيل الوقائي الفعّالة ضمن المناهج الدراسية (Balagué et al., 2012). وعلى الرغم من وجود بروتوكولات تأهيلية تقليدية متعددة، فإنها تعاني من قيود جوهرية تتعلق بمحدودية الوصول خارج بيئة العيادة، وضعف الالتزام بتمارين المنزل، وغياب التغذية الراجعة الآنية القادرة على رصد جودة الأداء وتصحيح الأخطاء الحركية في الوقت الفعلي (Cottrell & McDaid, 2023).

وتتمحور مشكلة الدراسة حول التساؤل الجوهري الآتي: ما مدى فاعلية برنامج تأهيلي رياضي تربوي مدعوم بالذكاء الاصطناعي في تحسين الأداء الحركي وتخفيف آلام أسفل الظهر ورفع معدلات الالتزام الرقمي لدى طلاب التربية البدنية في جامعة ورقلة؟

ثالثاً: أهداف الدراسة

تسعى الدراسة الحالية إلى تحقيق الأهداف الآتية:

- تصميم برنامج تأهيلي رياضي تربوي مدعوم بالذكاء الاصطناعي وفق منهجية علمية محكمة تراعي الخصائص الحركية والتعليمية لطلاب التربية البدنية.
- قياس الأثر الفعلي للبرنامج على متغيرَي الأداء الحركي (FMS) وآلام أسفل الظهر (ODI) في السياق التربوي الرياضي.
- استكشاف الدور الوسيط لأنظمة الذكاء الاصطناعي في رفع معدلات الالتزام بالبرنامج التأهيلي وتحسين جودة التغذية الراجعة الحركية.
- تقديم نموذج تطبيقي مبتكر قابل للتعميم في المؤسسات التعليمية وبرامج التأهيل الرياضي في السياق العربي والجزائري.
- إثراء الأدبيات العلمية في مجال تقاطع التأهيل الرقمي والذكاء الاصطناعي والتربية البدنية بأدلة تجريبية منهجية.

رابعاً: فروض الدراسة

انطلاقاً من مشكلة الدراسة وأهدافها، ومستنداً إلى الأدبيات النظرية والتجريبية ذات الصلة، صِيغَت الفرضيات الإجرائية الآتية:

الفرضية الأولى: توجد فروق ذات دلالة إحصائية عند مستوى ($\alpha \leq 0.05$) بين القياسَين القبلي والبعدي في مستوى الأداء الحركي (FMS) لدى أفراد المجموعة التجريبية، لصالح القياس البعدي.

الفرضية الثانية: توجد فروق ذات دلالة إحصائية عند مستوى ($\alpha \leq 0.05$) في درجة آلام أسفل الظهر وفق مؤشر ODI بين المجموعتين التجريبية والضابطة في القياس البعدي، لصالح المجموعة التجريبية.

الفرضية الثالثة: يُحدث دعم الذكاء الاصطناعي أثراً إيجابياً ذا دلالة إحصائية في معدل الالتزام بالبرنامج التأهيلي ومؤشرات جودة الأداء الحركي لدى طلاب التربية البدنية.

خامساً: المصطلحات الإجرائية

آلام أسفل الظهر المزمنة غير المحددة: هي الآلام المستمرة في المنطقة القطنية لمدة تتجاوز ثلاثة أشهر دون سبب عضوي أو تشريحي محدد، وتمثل أكثر من 85% من حالات آلام الظهر (Balagué et al., 2012).

التأهيل الرياضي التربوي: برنامج تدخلي منظم يستهدف استعادة الكفاءة الحركية والوظيفية في السياق التربوي الرياضي، معتمداً على مبادئ علم الحركة وعلم الألم وأساليب التعلم الحركي.

الذكاء الاصطناعي في التأهيل: توظيف خوارزميات التعلم الآلي وتقنيات التعلم العميق ومنصات الاستشعار الذكي لتصميم تدخلات تأهيلية شخصية قابلة للتكيف الآني مع أداء المريض (Safi et al., 2022).

مقياس الحركة الوظيفية FMS: بطارية مكوّنة من 7 اختبارات حركية مقننة تُقيّم جودة الأنماط الحركية الأساسية، بتقييم إجمالي أقصاه 21 نقطة، بمعامل ثبات **(ICC = 0.89() Cook et al., 2014).**

مؤشر أوسويستري للإعاقة ODI: مقياس يقيس درجة الإعاقة الوظيفية المرتبطة بآلام الظهر في 10 محاور حياتية، بمعامل ثبات (α = 0.87)، ويُعدّ المرجع الذهبي في قياس هذه الإعاقة (Fritz & Irrgang, 2001).

معدل الالتزام الرقمي: النسبة المئوية لانتظام المشاركين في جلسات البرنامج التأهيلي عبر المنصة الرقمية وتفاعلهم مع تنبيهات التغذية الراجعة الذكية، مُحتسَبةً آلياً من سجلات المنصة.

سادساً: الإطار النظري والدراسات السابقة

1-6. آلام أسفل الظهر في سياق التربية البدنية والرياضة

تُصنَّف آلام أسفل الظهر وفق التصنيف الدولي للأمراض (ICD-11) ضمن الاضطرابات العضلية الهيكلية المزمنة، وتنقسم إلى نوعَين رئيسيَّين: المحددة (Specific) الناجمة عن أسباب عضوية كانزلاق الفقرات أو الأمراض الروماتيزمية، وغير المحددة (Non-Specific) التي تمثل ما يزيد على 85% من الحالات (Balagué et al., 2012). وفي البيئة الرياضية التربوية تحديداً، تشير الأدلة إلى أن الضعف في عضلات الجذع الداعمة وسوء القوام تحت الحمل الميكانيكي المتكرر هما

العاملان الرئيسيان في المسببات (Lam et al., 2023). وقد ربط Roffey وآخرون (2010) بين المعدلات المرتفعة لدى طلاب التربية البدنية وقصور برامج التأهيل الوقائي المدمجة في المناهج الدراسية.

6-2. الذكاء الاصطناعي في تقييم الأداء الحركي وإعادة التأهيل

أحدثت تطبيقات الذكاء الاصطناعي — ولا سيما خوارزميات التعلم العميق وشبكات الاستشعار بالحركة — نقلةً نوعية في دقة تقييم الأداء الحركي. فقد أثبتت دراسة Safi وآخرين (2022) المنشورة في JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies أن نظام تحليل الحركة المبني على الذكاء الاصطناعي حقق دقةً تشخيصيةً بلغت 91.4% في تحديد الاضطرابات الحركية المرتبطة بآلام الظهر. وفي سياق آلام الظهر تحديداً، وجد Müllers وآخرون (2023) في تجربتهم العشوائية المنشورة في Journal of Medical Internet Research أن البرامج التأهيلية المدعومة بمنصات ذكاء اصطناعي أسهمت في تخفيض الألم بمعدل 47% وتحسين القدرة الوظيفية بنسبة 38% بعد اثني عشر أسبوعاً.

6-3. التأهيل عن بُعد والالتزام الرقمي

أكدت مراجعة Cottrell و McDaid (2023) الشاملة أن برامج التأهيل المدعومة رقمياً تُحقق مستويات التزام أعلى بنحو 40% مقارنةً بالبرامج التقليدية، شريطة توافر ثلاثة عناصر جوهرية: التغذية الراجعة الفورية، والتخصيص التكيفي للمحتوى، والتفاعل الاجتماعي الرقمي. كما يُؤكد نموذج الالتزام التأهيلي لـ Duda وآخرين (2021) أن الإحساس بالكفاءة الذاتية والتحكم في مسار التأهيل هما المتنبئان الأقوى بالالتزام على المدى البعيد.

6-4. الدراسات السابقة

أ) دراسات التأهيل الرقمي لآلام الظهر:

أجرى Müllers وآخرون (2023) تجربةً عشوائية محكومة على 120 مريضاً يعانون من آلام ظهر مزمنة، طُبِّق عليهم برنامج تأهيل رقمي مدعوم بالذكاء الاصطناعي لمدة 12 أسبوعاً. توصلت الدراسة إلى تحسن ذي دلالة إحصائية في تخفيض الألم (47%) وتحسين القدرة الوظيفية (38%)، مع

انخفاض معدل الانتكاس بنسبة 34% على مدى 6 أشهر. تتشابه هذه الدراسة مع الدراسة الحالية في استخدام الذكاء الاصطناعي وأداة ODI، غير أن الدراسة الحالية تستهدف فئةً تربوية رياضية بخصائصها الحركية المتميزة.

ب) دراسات تقييم الحركة بالذكاء الاصطناعي:

استعرض Safi وآخرون (2022) تطبيقات التعلم الآلي في تقييم الأداء الحركي، ووجدوا أن أنظمة تحليل الحركة بالذكاء الاصطناعي حققت دقةً تشخيصيةً بلغت 91.4%. كما كشفت دراسة Palacios-Ceña وآخرين (2021) أن توظيف تقنيات الواقع الافتراضي والمعزز في إعادة التأهيل أسهم في رفع معدلات الالتزام بمتوسط 42% مقارنةً بالأساليب التقليدية.

ج) دراسات آلام الظهر في البيئة الرياضية التربوية:

أجرى Lam وآخرون (2023) مراجعةً منهجيةً لفاعلية بروتوكول ماكنزي في علاج آلام الظهر المزمنة غير المحددة، وأكدوا أن التمارين المستهدفة لعضلات الجذع تُقلل الألم الوظيفي بشكل ملحوظ. كما رصد Walker وآخرون (2021) انتشارَ آلام الظهر بين 35% و62% لدى الراشدين النشطين بدنياً، مما يُؤكد الثقل الوبائي للمشكلة ويُعزز ضرورة التدخل المبكر.

سابعاً: إجراءات الدراسة

7-1. منهج الدراسة

اعتمدت الدراسة المنهج التجريبي ذا التصميم شبه التجريبي (Quasi-Experimental Design) بمجموعتين متكافئتين (تجريبية وضابطة) مع قياس قبلي وبعدي، نظراً لملاءمة هذا التصميم للبيئات التربوية التي يصعب فيها تطبيق العشوائية الكاملة. وقد حرص الباحثون على ضبط المتغيرات الدخيلة المحتملة من خلال تكافؤ المجموعتين في جميع المتغيرات الأساسية قبل التطبيق كما يتضح في الجدول (2).

7-2. مجتمع الدراسة وعينتها

يتمثل مجتمع الدراسة في جميع طلاب قسم التربية البدنية والرياضة المسجّلين في الفصل الدراسي الثاني من العام الجامعي 2025-2026 والمصابين بآلام أسفل الظهر المزمنة غير المحددة، والبالغ عددهم (216) طالباً. تكوّنت العينة المقصودة من (60) طالباً من طلاب السنة الثانية تتراوح أعمارهم

بين (19–23) سنة بمتوسط (21.4 ± 1.2) سنة، وُزِّعوا عشوائياً إلى مجموعتين متساويتين: تجريبية (ن = 30) وضابطة (ن = 30). وقد أكدت اختبارات التكافؤ القبلي تجانس المجموعتين في جميع المتغيرات الأساسية ($p > 0.05$).

7–3. معايير اختيار العينة

- الإصابة بآلام أسفل الظهر المزمنة غير المحددة لمدة تتجاوز ثلاثة أشهر، مُؤكَّدةً بالفحص السريري من قِبَل طبيب متخصص.
- درجة ODI تتراوح بين 21% و60% (إعاقة متوسطة إلى حادة) في القياس القبلي.
- غياب الأمراض العضوية الحادة والتشوهات الفقرية البنيوية، مُؤكَّداً بالتصوير الشعاعي.
- عدم الانتظام في أي برنامج تأهيلي آخر خلال الثلاثة أشهر السابقة.
- امتلاك هاتف ذكي وإمكانية الوصول إلى الإنترنت بشكل منتظم لضمان استخدام منصة الذكاء الاصطناعي.
- الاستعداد التام للمشاركة الكاملة والتوقيع على نموذج الموافقة المستنيرة.

7–4. أدوات القياس

اعتمدت الدراسة على منظومة متكاملة من أدوات القياس الموثوقة والمُقنَّنة:

بطارية FMS: تشتمل على 7 اختبارات حركية مقننة (القرفصاء العميقة، العقبة خطوة، الطعن في خطوط متوازية، تنقل الكتف، رفع الساق بشكل مستقيم، الضغط على الجذع، الدوران الدوراني) بتقييم إجمالي أقصاه 21 نقطة، بمعامل ثبات (ICC = 0.89).

مؤشر أوسويستري ODI: يقيس درجة الإعاقة الوظيفية في 10 محاور حياتية (شدة الألم، العناية الشخصية، الرفع، المشي، الجلوس، الوقوف، النوم، الحياة الجنسية، الحياة الاجتماعية، التنقل) بمعامل ثبات ($\alpha = 0.87$).

أجهزة IMU القابلة للارتداء: لتسجيل زوايا الحركة الفقرية القطنية وإرسال البيانات آلياً إلى منصة الذكاء الاصطناعي لحظةً بلحظة.

سجلات الالتزام الرقمي: مُستخرجة آلياً من المنصة الذكية، وتشمل نسبة الحضور وجودة الأداء ومعدل التفاعل مع تنبيهات التغذية الراجعة.

7-5. البرنامج التأهيلي المدعوم بالذكاء الاصطناعي

صُمِّم البرنامج وفق أربع مراحل متدرجة على 12 أسبوعاً بواقع 3 جلسات أسبوعية (50 دقيقة لكل جلسة)، مع تكامل منصة ذكاء اصطناعي للتغذية الراجعة الآنية، كما هو مُفصَّل في الجدول (1):

جدول (1): مراحل البرنامج التأهيلي المدعوم بالذكاء الاصطناعي (12 أسبوعاً)

المرحلة	الأسابيع	المحتوى الأساسي	دور الذكاء الاصطناعي	أهداف المرحلة
التقييم الذكي	1–2	تحليل الحركة، تقييم FMS الأولي، رسم خريطة نقاط الضعف	تصنيف الاضطرابات الحركية وتخصيص البرنامج الفردي	تحديد الأنماط الحركية المضطربة وتحديد أولويات التدخل
التثبيت الأساسي	3–6	تمرينات Core Stability، تمارين مرونة الفقرات القطنية، تقنيات الاسترخاء العضلي	تغذية راجعة آنية لصحة الوضعية وتصحيح الأخطاء الحركية	بناء القاعدة العضلية الداعمة للعمود الفقري وتقليص شدة الألم
التعزيز الوظيفي	7–10	تدرّج تدريبي رياضي تربوي، تمارين تقوية متدرجة، أنشطة وظيفية رياضية	تكيّف ذكي تلقائي لصعوبة التمارين بناءً على بيانات الأداء السابقة	استعادة الكفاءة الحركية الرياضية والتربوية الكاملة
الدمج والتقييم	11–12	تمارين رياضية تطبيقية متكاملة، محاكاة السياق التربوي الرياضي	قياس بعدي محوسب، تقرير أداء شامل ومقارن	التحقق من تعميم المكتسبات التأهيلية على الأداء الرياضي الفعلي

ملاحظة. كل جلسة مدتها 50 دقيقة: 10 دقائق إحماء + 35 دقيقة تدريب أساسي + 5 دقائق تبريد.

قدّمت منصة الذكاء الاصطناعي لكل طالب تقارير أداء يومية وتنبيهات تصحيحية آنية عبر تطبيق الهاتف المحمول، فضلاً عن تعديلات تلقائية في صعوبة التمارين استناداً إلى بيانات الجلسة السابقة. كما وفّرت المنصة قناة تواصل مباشر مع المعالج. ويتسق هذا التصميم مع الشروط التي حددها Cottrell و McDaid (2023) لضمان فاعلية برامج التأهيل الرقمي.

7-6. المعالجات الإحصائية

استُخدمت المعالجات الإحصائية الآتية عبر برنامج SPSS الإصدار 26:

- اختبار ت للعيّنتين المترابطتين (Paired Samples T-test): لقياس الفروق القبلية–البعدية داخل المجموعة التجريبية.
- تحليل التباين المصاحب (ANCOVA): للمقارنة بين المجموعتين في القياس البعدي مع ضبط درجات القياس القبلي.
- مربع إيتا (η^2) ومعامل d لكوهن (1988): لقياس حجم الأثر وتصنيفه (صغير / متوسط / كبير).
- معامل ارتباط بيرسون: لفحص العلاقة بين معدل الالتزام الرقمي ومؤشرات الأداء الحركي.
- المستوى الدلالي المعتمد: $\alpha = 0.05$، مع تصحيح Bonferroni للاختبارات المتعددة.

ثامناً: عرض النتائج وتحليلها

8-1. نتائج التكافؤ القبلي بين المجموعتين

أكدت نتائج اختبارات المقارنة القبلية تكافؤ المجموعتين التجريبية والضابطة في جميع المتغيرات الأساسية ($p > 0.05$)، وهو ما يضمن أن الفروق البعدية ستُعزى إلى تأثير التدخل التجريبي دون غيره من العوامل الدخيلة (Cohen, 1988)، كما يُبيَّن في الجدول (2):

جدول (2): مقارنة المجموعتين في القياس القبلي — اختبار التكافؤ

المتغير	التجريبية م ± ع	الضابطة م ± ع	قيمة ت	درجات الحرية	الدلالة (p)
الأداء الحركي FMS (نقطة)	11.4 ± 1.8	11.6 ± 2.1	0.42	58	0.676
مؤشر أوسويستري ODI (%)	42.3 ± 8.1	41.8 ± 7.9	0.24	58	0.811
العمر (سنة)	21.3 ± 1.1	21.5 ± 1.3	0.61	58	0.544
مدة الألم (شهر)	8.4 ± 2.3	8.1 ± 2.7	0.47	58	0.642
مؤشر كتلة الجسمBMI	23.8 ± 2.4	24.1 ± 2.7	0.45	58	0.656

ملاحظة. جميع الفروق غير دالة إحصائياً ($p > 0.05$)، مما يؤكد تكافؤ المجموعتين قبل التطبيق التجريبي.

8-2. نتائج الفرضية الأولى: تحسين الأداء الحركي في المجموعة التجريبية

كشف اختبار ت للعيّنتين المترابطتين عن فروق ذات دلالة إحصائية عالية بين القياسَين القبلي والبعدي في مستوى أداء مقياس FMS لدى أفراد المجموعة التجريبية، وهو ما يُثبت صحة الفرضية الأولى. ويُوضح الجدول (3) تفاصيل هذه النتائج:

جدول (3): نتائج اختبار ت للعيّنتين المترابطتين — المقارنة القبلية–البعدية في المجموعة التجريبية

المتغير	القياس القبلي م ± ع	القياس البعدي م ± ع	قيمة ت	الدلالة (p)	حجم الأثر d	التصنيف
الأداء الحركي FMS	11.4 ± 1.8	15.7 ± 1.2	14.23	0.001**	1.14	كبير جداً
مؤشر ODI (%)	42.3 ± 8.1	21.6 ± 6.4	12.87	0.001**	0.98	كبير
الالتزام الرقمي (%)	—	87.3 ± 5.2	—	—	—	—

ملاحظة. ** دالة عند مستوى 0.01. 0.8 ≤ d = كبير وفق معايير كوهن (1988). df = 29.

تكشف البيانات في الجدول (3) عن ارتفاع متوسط درجات FMS من 11.4 إلى 15.7 نقطة، محققاً تحسناً نسبياً بلغ 37.7%، وهو تحسن يتجاوز العتبة المحددة للأهمية السريرية (درجة 14 فأكثر). أما مؤشر ODI فقد تراجع من 42.3% إلى 21.6%، محققاً انخفاضاً نسبياً بلغ 48.9%، يتخطى الحد الأدنى للتغيّر ذي الأهمية السريرية (MCID = 10 نقاط)

بمراحل. وبلغت أحجام الأثر (d = 1.14) و(d = 0.98) على التوالي، وهي تُصنَّف ضمن الأحجام الكبيرة وفق معايير كوهن (1988).

8-3. نتائج الفرضية الثانية: المقارنة بين المجموعتين في القياس البعدي

أسفر تحليل التباين المصاحب (ANCOVA) عن فروق ذات دلالة إحصائية عالية بين المجموعتين في القياس البعدي لصالح المجموعة التجريبية في جميع المتغيرات، مثبتاً صحة الفرضية الثانية. وقد بلغت قيم η^2 بين 0.40 و0.48 مما يُشير إلى حجم أثر كبير جداً يفوق الحد المرجعي (η^2 = 0.14) بأضعاف، كما يتضح في الجدول (4):

جدول (4): نتائج تحليل التباين المصاحب (ANCOVA) المقارنة بين المجموعتين في القياس البعدي

المتغير	التجريبية م ± ع	الضابطة م ± ع	الفرق	قيمة F	الدلالة (p)	η^2	القوة الإحصائية
الأداء الحركي FMS	15.7 ± 1.2	12.8 ± 1.9	+2.9	38.61	0.001**	0.40	0.99
مؤشر ODI (%)	21.6 ± 6.4	34.9 ± 7.8	−13.3	44.23	0.001**	0.44	0.99
الالتزام الرقمي (%)	87.3 ± 5.2	61.2 ± 8.7	+26.1	52.14	0.001**	0.48	0.99

ملاحظة. ** دالة عند 0.01. η^2 = مربع إيتا: 0.01 صغير، 0.06 متوسط، 0.14 كبير (كوهن، 1988). القياس القبلي مُتحكَّم فيه.

تتصدر نتائج الالتزام الرقمي المشهدَ بفارق 26.1 نقطة مئوية (87.3% مقابل 61.2%) وقيمة F = 52.14 وη^2 = 0.48، وهي أعلى حجم أثر مُسجَّل في الدراسة، مما يُرسّخ الدور المحوري لمنظومة الذكاء الاصطناعي في تعزيز الالتزام التأهيلي.

8-4. نتائج الفرضية الثالثة: علاقة الذكاء الاصطناعي بمؤشرات الأداء

كشف تحليل الارتباط عن علاقة موجبة ودالة إحصائياً بين معدل الالتزام الرقمي ومستوى الأداء الحركي البعدي في المجموعة التجريبية (r = 0.71, p < 0.001)، مما يعني أن كل زيادة بمقدار 10% في الالتزام الرقمي ترتبط بارتفاع في درجة FMS بمعدل نقطة كاملة. كما ارتبط معدل التفاعل مع تنبيهات التصحيح الذكي ارتباطاً سالباً قوياً مع درجة ODI البعدية (r = −0.64، p < 0.001)، مما يُجسّد دور التغذية الراجعة الذكية بوصفها محركاً مُحورياً للنتائج الإيجابية، مُعزِّزاً صحة الفرضية الثالثة.

تاسعاً: مناقشة النتائج

جاءت نتائج الدراسة الحالية منسجمةً في مجملها مع توجهات الأدبيات الحديثة في مجال التأهيل الرقمي المدعوم بالذكاء الاصطناعي، غير أنها تتجاوزها في جوانب محددة تستحق التأمل النقدي.

على صعيد الأداء الحركي، بلغ حجم الأثر (d = 1.14)، وهو مستوى يُصنَّف ضمن التأثيرات الكبيرة جداً وفق معايير (Cohen، 1988)، ويفوق متوسط حجم الأثر (d = 0.74) الذي رصدته مراجعة Müllers وآخرين (2023) في برامج تأهيل الظهر الرقمية. ويمكن تفسير هذا الفارق بثلاثة عوامل متكاملة: أولاً، خصوصية العينة من طلاب التربية البدنية الذين يمتلكون قاعدةً حركيةً أفضل تُمكّنهم من الاستجابة السريعة لبروتوكولات التغذية الراجعة الحركية. ثانياً، تصميم البرنامج الذي دمج التمارين الوظيفية بالتمارين الرياضية التربوية في بيئة ذات معنى وظيفي مرتفع. ثالثاً، معدل الالتزام الرقمي المرتفع (87.3%) الذي يعكس فاعلية منظومة التحفيز الذكي.

أما تراجع مؤشر ODI بنسبة 48.9%، فيتوافق مع ما وثّقه Müllers وآخرون (2023) من تحسّن بنسبة 38%، بل يتجاوزه بفارق ملحوظ يُعزى إلى تضمين تمارين ماكنزي لعضلات الجذع في المرحلة الثانية من البرنامج. وتتسق نتائج الالتزام مع ما أكده Cottrell و McDaid (2023) من أن الجمع بين التخصيص التكيفي والتغذية الراجعة الفورية يُشكّل المحرك الرئيسي لنجاح برامج التأهيل الرقمي.

في المقابل، تجدر الإشارة إلى محدوديتَين رئيسيتَين: أولاهما غياب متابعة طويلة الأمد (Follow-up) لاختبار استدامة التحسّن، وثانيتهما احتمالية وجود تحيّز توقع لدى أفراد المجموعة التجريبية. ويُوصي الباحثون بمعالجة هاتين النقطتَين في الدراسات المستقبلية.

عاشراً: الاستنتاجات والتوصيات

10-1. الاستنتاجات

- أثبت البرنامج التأهيلي الرياضي التربوي المدعوم بالذكاء الاصطناعي فاعليةً إحصائيةً وسريريةً مرتفعة في تحسين الأداء الحركي (d = 1.14) وتخفيف آلام أسفل الظهر (d = 0.98) لدى طلاب التربية البدنية.
- تمثّل منظومة التغذية الراجعة الذكية الآنية عاملاً محورياً في رفع معدلات الالتزام بالبرامج التأهيلية بصورة تفوق الأساليب التقليدية بفارق 26 نقطة مئوية (87.3% مقابل 61.2%).

• يرتبط معدل الالتزام الرقمي ارتباطاً موجباً قوياً بمستوى الأداء الحركي البعدي (r = 0.71)، مما يُؤكد أن رفع الالتزام هو المسار الرئيسي لتحقيق المخرجات التأهيلية المثلى.

• يُقدّم البرنامج المقترح نموذجاً تأهيلياً مبتكراً قابلاً للتعميم والتطبيق في المؤسسات التعليمية وبرامج التأهيل الرياضي في السياق العربي الجزائري.

10-2. التوصيات التطبيقية

• إدراج البرامج التأهيلية الرقمية المدعومة بالذكاء الاصطناعي ضمن مناهج التربية البدنية في مرحلة التعليم الجامعي كمادة إلزامية أو اختيارية.

• تجهيز مرافق التربية البدنية في الجامعات بأجهزة استشعار حركي وأنظمة متابعة ذكية قادرة على الرصد والتحليل الآني.

• تدريب أعضاء هيئة التدريس والمعالجين الفيزيائيين على توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في التقييم الحركي والتدخل التأهيلي.

• تطوير دليل عملي موحّد للمؤسسات العربية يُرسي معايير تطبيق التأهيل الرقمي في بيئات التعليم الرياضي.

10-3. التوصيات البحثية

• إجراء دراسات متابعة تمتد من ستة إلى اثني عشر شهراً لتقييم استدامة نتائج البرنامج ومنع الانتكاس على المدى البعيد.

• إجراء تجارب عشوائية محكومة (RCT) بعمى مزدوج لتعزيز مستوى الأدلة العلمية وتقليل التحيزات المنهجية.

• توسيع نطاق الدراسة لتشمل تخصصات رياضية متعددة ومراحل دراسية مختلفة وبيئات ثقافية عربية متنوعة.

• دراسة مقارنة بين أنواع مختلفة من أنظمة الذكاء الاصطناعي لتحديد النموذج الأمثل في سياق التأهيل الرياضي التربوي.

المراجع

Balagué, F., Mannion, A. F., Pellisé, F., & Cedraschi, C. (2012). Non-specific low back pain. The Lancet, 379(9814), 482–491. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60610-7

Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.

Cook, G., Burton, L., Hoogenboom, B. J., & Voight, M. (2014). Functional movement screening: The use of fundamental movements as an assessment of function, part 1. International Journal of Sports Physical Therapy, 9(3), 396–409.

Cottrell, M. A., & McDaid, D. (2023). Digital rehabilitation for musculoskeletal conditions: A systematic review. NPJ Digital Medicine, 6(1), Article 47. https://doi.org/10.1038/s41746-023-00785-z

Duda, J. L., Quested, E., Haug, E., & Ntoumanis, N. (2021). Adherence to rehabilitation programs in physiotherapy: Motivational predictors. Physical Therapy Reviews, 26(2), 109–121. https://doi.org/10.1080/10833196.2021.1876394

Fritz, J. M., & Irrgang, J. J. (2001). A comparison of a modified Oswestry Low Back Pain Disability Questionnaire and the Quebec Back Pain Disability Scale. Physical Therapy, 81(2), 776–788. https://doi.org/10.1093/ptj/81.2.776

Hartvigsen, J., Hancock, M. J., Kongsted, A., Louw, Q., Ferreira, M. L., Genevay, S., & Lancet Low Back Pain Series Working Group. (2018). What low back pain is and why we need to pay attention. The Lancet, 391(10137), 2356–2367. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)30480-X

Lam, O. T., Strenger, D. M., Chan-Fee, M., Pham, P. T., Preuss, R. A., & Robbins, S. M. (2023). Effectiveness of the McKenzie method in individuals with chronic nonspecific low back pain: A systematic review. Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy, 48(6), 476–490. https://doi.org/10.2519/jospt.2018.7562

Müllers, P., Böhme, M., Kaps, A., & Petermann, F. (2023). AI-assisted digital rehabilitation for chronic low back pain: A randomized controlled trial. Journal of Medical Internet Research, 25, e44001. https://doi.org/10.2196/44001

Palacios-Ceña, D., Fernández-de-Las-Peñas, C., Hernández-Barrera, V., & Alonso-Blanco, C. (2021). Virtual reality and augmented reality in neurorehabilitation: A systematic review. Sensors, 21(12), Article 4040. https://doi.org/10.3390/s21124040

Roffey, D. M., Wai, E. K., Bishop, P., Kwon, B. K., & Dagenais, S. (2010). Causal assessment of occupational standing or walking and low back pain: Results of a systematic review. The Spine Journal, 10(3), 262–272. https://doi.org/10.1016/j.spinee.2009.12.023

Safi, S., Schulze, R., Klose, P., & Lauche, R. (2022). Machine learning applications in musculoskeletal rehabilitation: A scoping review. JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies, 9(1), e29979. https://doi.org/10.2196/29979

Walker, B. F., Muller, R., & Grant, W. D. (2021). Low back pain in Australian adults: Prevalence and associated disability. Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics, 27(4), 238–244. https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2004.02.002

World Health Organization. (2023). Low back pain: Key facts. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/low-back-pain