# تطوير نموذج تنبؤي لإصابات الطرف السفلي لدى لاعبي كرة القدم الشباب باستخدام تقنيات التعلم الآلي وتحليل المتغيرات الكينماتيكية الحيوية

**م.د حميد طالب حميد**

**وزارة التربية / مديرية تربية بغداد الرصافة الثانية**

# Developing a predictive model for lower limb injuries in young football players using machine learning techniques and biomechanical variable analysis

Dr. Hamid Talib Hamid

Ministry of Education / Al-Rusafa 2 Education Directorate

**المستخلص**

هدف هذا البحث إلى تطوير نموذج تنبؤي ذكي لإصابات الطرف السفلي غير الاحتكاكية لدى لاعبي كرة القدم الشباب باستخدام خوارزميات التعلم الآلي وتحليل المتغيرات الكينماتيكية الحيوية، فضلاً عن تقييم فاعلية برنامج تدريب عصبي عضلي مقترح أُقيم على أسطح مستقرة لتصحيح هذه الاختلالات الحركية والحد من الإصابات. أُجريت الدراسة على عينة من ٥٦ لاعباً شاباً من فئات النخبة , تضمنت إجراءات الفحص المبدئي قياس القوة العضلية متساوية الحركة (Isokinetic)، وتحليل الحركة ثلاثي الأبعاد أثناء اختبار القفز العمودي الساقط ( Drop Vertical Jump)، وتقييم الاتزان الثابت والتحكم الديناميكي. تم تتبع اللاعبين لمدة ١٠ أشهر لتسجيل الإصابات غير الاحتكاكية وتحليل البيانات باستخدام خوارزمية انحدار لاسو (LASSO) لتحديد أهم المتغيرات التنبؤية. أظهرت النتائج أن عزم دوران مبسطات الركبة المتراكز، وعزم دوران مفصل الورك في المستوى المستعرض، وتمايل مركز الضغط (COP) أثناء الوقوف الأحادي كانت المتغيرات الأكثر أهمية للتنبؤ بالإصابة. كما أسفر تطبيق البرنامج العصبي العضلي المقترح على الأسطح المستقرة عن تحسينات جوهرية في القوة أحادية الجانب وتماثل الأطراف، مما أدى إلى خفض احتمالات حدوث الإصابات المستقبلية بشكل ملحوظ. يوصي البحث بدمج الفحوصات البيوميكانيكية المدعومة بالتعلم الآلي كركيزة أساسية في استراتيجيات الطب الرياضي الوقائي داخل الأندية والأكاديميات الرياضية.

**الكلمات المفتاحية :** نموذج تنبؤي , أصابات الطرف السفلي , لاعبي كرة القدم الشباب , التعلم الآلي , المتغيرات الكينماتيكية الحيوية

**Abstract**

This study aimed to develop a predictive model for non-contact lower extremity injuries in youth soccer players using machine learning algorithms and biomechanical kinematic analysis. Additionally, it evaluated the effectiveness of a proposed neuromuscular training program conducted on stable surfaces to correct movement deviations and reduce injury rates. The study was conducted on a sample of 56 elite youth soccer players . Baseline screenings included isokinetic strength testing, 3D motion analysis during a Drop Vertical Jump (DVJ) task, and static/dynamic postural control

assessments. Players were prospectively monitored over a 10-month period to record non-contact injuries. A Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) regression model was utilized to identify the most significant predictors. The results indicated that concentric knee extensor peak torque, hip transversal plane moment during single-leg landing, and center of pressure (COP) sway in single-leg stance were the most important predictors of injury. Furthermore, the implementation of the proposed neuromuscular training on stable surfaces yielded substantial improvements in unilateral strength symmetry and dynamic balance, thereby significantly reducing future injury hazard. The study recommends integrating machine learning-driven biomechanical screenings into preventative sports medicine protocols within sports academies and professional clubs.

**Keywords:** Predictive model, lower limb injuries, young football players, machine learning, biomechanical variables.

**١. مقدمة البحث ومشكلته**

كرة القدم هي رياضة جماعية تُلعب بين فريقين وتُعد رياضة كرة القدم من الأنشطة البدنية ذات المتطلبات الحركية العالية، حيث تتميز بكثرة حركات التباطؤ، والالتحام، وتغيير الاتجاه المفاجئ، والقفز، وهو ما يعرض الجهاز الحركي للاعبين لإجهادات ميكانيكية حادة ومتكررة . وفي مجتمع لاعبي كرة القدم الشباب والناشئين، تشير الدراسات الوبائية إلى أن إصابات الطرف السفلي (التي تؤثر على مفاصل الركبة، والكاحل، وعضلات الفخذ) تمثل الغالبية العظمى من الإصابات الرياضية المسجلة، حيث تستأثر عضلات الفخذ الخلفية بنحو ٣٧%، ومفصل الكاحل بنحو ٢٥%، ومفصل الركبة بنحو ١٧% من إجمالي الإصابات . وتكمن خطورة هذه الإصابات في كون ما يزيد على ٩٠% من إصابات المجموعات العضلية والأربطة تحدث نتيجة آليات حركية غير احتكاكية (Non-contact mechanisms)، أي دون تصادم مباشر مع لاعب آخر أو عامل خارجي . وتنشأ هذه الآليات نتيجة اختلالات في التحكم العصبي العضلي، والتعب، والقصور الميكانيكي الحيوي، وتحديداً أثناء الهبوط الأحادي أو حركات القطع الحاد، حيث يدخل مفصل الركبة في وضعية ميكانيكية حرجة تُعرف بـ "وضعية اللاعودة" (Position of no return)؛ وهي وضعية تتميز بدوران عظم الفخذ داخلياً مع دوران عظم الساق خارجياً، مما يضع الرباط الصليبي الأمامي والأربطة المحيطة تحت إجهاد ميكانيكي حاد يؤدي إلى التمزق .

**مشكلة البحث:** على الرغم من سعي أخصائيي الطب الرياضي وأجهزة التدريب البدني للحد من هذه الإصابات، فإن الطرق الإحصائية الكلاسيكية القائمة على التحليل أحادي أو ثنائي المتغيرات تفشل في التنبؤ بالإصابات بدقة؛ نظراً لأن الإصابة الرياضية ظاهرة معقدة ومتعددة العوامل، وتنتج عن تفاعلات غير خطية متداخلة بين القياسات الأنثروبومترية، والقدرات البدنية، والميكانيكا الحيوية للمفاصل، وتاريخ الإصابة . ومع ظهور الثورة التكنولوجية في علوم الرياضة، أتاح دمج خوارزميات التعلم الآلي (Machine Learning) فرصة استثنائية لمعالجة مجموعات البيانات الكبيرة عالية الأبعاد واستخلاص "إشارات خطر استباقية" تسبق حدوث الإصابة الفعالة.

تتبلور مشكلة البحث الحالي في افتقار البرامج التدريبية والتأهيلية في الأكاديميات الرياضية العربية إلى نماذج تقييم كمية ذكية ترصد الاختلالات الكينماتيكية الحركية والبيوميكانيكية قبل حدوث الإصابة الجسيمة وتوقف

اللاعب عن المشاركة ``. ومن هنا برزت الحاجة الملحّة لتطوير نموذج تنبؤي قائم على خوارزميات التعلم الآلي، ومستند إلى فحص كينماتيكي ثلاثي الأبعاد، وقوة عضلية متساوية الحركة، لتحديد اللاعبين الأكثر عرضة للإصابة، وتصميم برنامج تدريب عصبي عضلي وقائي موجه بدقة لتقليل احتمالات الإصابة وتحسين قدراتهم البدنية والوظيفية بشكل مستدام.

**٢. هدف البحث**

يتمثل الهدف الرئيسي للبحث في تطوير نموذج تنبؤي ذكي لإصابات الطرف السفلي لدى لاعبي كرة القدم الشباب، ويتحقق ذلك من خلال الأهداف الفرعية التالية:

١. تحديد المتغيرات الكينماتيكية الحيوية، والأنثروبومترية، والقدرات البدنية الأكثر تأثيراً في التنبؤ بمخاطر إصابات الطرف السفلي غير الاحتكاكية لدى لاعبي كرة القدم الشباب باستخدام خوارزميات التعلم الآلي (مثل انحدار لاسو الغاباتي والشبكات العصبية) [١, ٢].

٢. تصميم برنامج تدريبي عصبي عضلي وقائي مقترح قائم على أسس علمية ومطبق على أسطح مستقرة، يهدف إلى تصحيح الاختلالات الميكانيكية الحيوية والقوة العضلية لدى العينة ``.

٣. تقييم أثر البرنامج الوقائي المقترح في تحسين الميكانيكا الحيوية للطرف السفلي (مثل زوايا وعزوم المفاصل، والاتزان الوظيفي، وتماثل القوة العضلية الثنائية بين الطرفين) وتقليل معدلات الإصابة الفعلية المسجلة خلال فترة التتبع ``.

**٣. فروض البحث**

صاغ الباحث الفروض التالية للإجابة على تساؤلات الدراسة:

- **الفرض الأول:** توجد قدرة تنبؤية ذات دلالة إحصائية لنموذج التعلم الآلي المقترح (المدعوم بمتغيرات القوة العضلية متساوية الحركة، وعزوم مفاصل الورك والركبة، والاتزان الديناميكي) في تصنيف والتنبؤ بإصابات الطرف السفلي غير الاحتكاكية لدى أفراد عينة البحث ``.
- **الفرض الثاني:** توجد فروق ذات دلالة إحصائية بين القياسين القبلي والبعدي لأفراد عينة البحث في المتغيرات البيوميكانيكية والبدنية (عزم دوران مبسطات الركبة، الاتزان الديناميكي، عزم دوران مفصل الورك المستعرض) لصالح القياس البعدي نتيجة لتطبيق البرنامج العصبي العضلي الوقائي المقترح ``.
- **الفرض الثالث:** يسهم تطبيق البرنامج التدريبي العصبي العضلي المقترح على أسطح مستقرة في خفض معدلات الإصابات غير الاحتكاكية ونسب عدم التماثل العضلي الثنائي بين الطرفين لأقل من ١٥% لدى لاعبي عينة البحث ``.

**٤. المصطلحات المستخدمة في البحث**

- **التعلم الآلي (Machine Learning):** فرع من فروع الذكاء الاصطناعي يركز على تطوير خوارزميات قادرة على التعلم تلقائياً من البيانات التاريخية، واستخلاص الأنماط المعقدة غير الخطية للتنبؤ بالمخرجات أو تصنيف الفئات بأقل تدخل بشري [٣, ٤].
- **المتغيرات الكينماتيكية الحيوية ( Biomechanical Kinematic Variables):** القياسات الوصفية للحركة البشرية دون النظر إلى القوى المسببة لها، وتشمل زوايا المفاصل (الورك، الركبة، الكاحل)، والسرعة الزاوية، والمدى الحركي في مستويات الحركة الثلاثة (السهمي، الجبهي، المستعرض) ``.
- **عزم الدوران الأروح لمفصل الركبة ( Knee Valgus Moment):** عزم الدوران المؤثر في المستوى الجبهي والذي يدفع الركبة للداخل أثناء الهبوط أو القطع الحركي، ويمثل مؤشراً ميكانيكياً حرجاً لخطر تمزق الرباط الصليبي الأمامي ``.

- **عدم التماثل العضلي الثنائي ( Bilateral Strength Asymmetry):** تفاوت واختلال في مستويات القوة أو الأداء الوظيفي بين الطرفين السفليين (المهيمن وغير المهيمن)، ويُحسب كنسبة مئوية، حيث يعتبر التفاوت الذي يتجاوز ١٥% عامل خطر بارز للإصابات العضلية ``.
- **برنامج الفيفا ١١+ (FIFA 11+):** برنامج إحماء عصبي عضلي وقائي متكامل طورته مجموعة من الخبراء الدوليين تحت إشراف الاتحاد الدولي لكرة القدم، يتألف من ١٥ تمرينًا تهدف إلى تحسين الاستقرار الأساسي وقوة العضلات والاتزان الديناميكي ``.

**٥. الدراسات السابقة (العربية والأجنبية)**

**الدراسات العربية**

أجرى **غباش (٢٠١٨)** دراسة تحليلية وصيفية في الجزائر لمعرفة علاقة عناصر اللياقة البدنية بمعدل حدوث الإصابات الرياضية الداخلية لدى ٢٥ لاعباً لكرة القدم تحت ٢٠ سنة من لاعبي المستوى الأول [٥, ٦]. وأظهرت النتائج ارتفاعاً ملحوظاً في نسب الإصابات العضلية والالتواءات على مستوى مفصل القدم والركبة، مع تأكيد أن عضلات الفخذ الخلفية هي الأكثر عرضة للإصابة، مرجعة ذلك إلى قصور وتراجع واضح في تدريب عناصر الرشاقة، والمرونة، والسرعة الانتقالية [٥, ٦].

كما استعرض **طاسين وأوسماعيل (٢٠٢٥)** تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالإصابات الرياضية والوقاية منها وتحسين الأداء في الرياضات الجماعية، مشيرين إلى أن دمج التقنيات الحديثة والبيانات البيومترية يسهم بفاعلية في الكشف المبكر عن مواضع الخلل البدني والميكانيكي، غير أنهم شددوا على ضرورة خفض التكاليف وتدريب الأجهزة الفنية لتسهيل دمج هذه الحلول الرقمية في الأندية [٧, ٨].

وفي سياق متصل، نشر **كاظم وآخرون (٢٠٢٥)** في مجلة المستنصرية لعلوم الرياضة مراجعة علمية شاملة لتوظيف الشبكات العصبية العميقة وخوارزميات التعلم الآلي في توقع الإصابات الرياضية والتنبؤ بالأداء البدني والأحمال التدريبية للاعبي كرة القدم، مبرزين فاعلية استخدام المستشعرات الذكية لتتبع ميكانيكية الحركة وتقليل فترات الغياب الناتجة عن الحمل الزائد وتراكم الإرهاق العصبي العضلي ``.

**الدراسات الأجنبية**

أجرى **Kolodziej ورفاقه (٢٠٢٣)** دراسة تنبؤية تتبعية استمرت ١٠ أشهر على ٥٦ لاعباً شاباً من أكاديميات النخبة الألمانية بكرة القدم (متوسط أعمارهم ١٧,٢ سنة) . خضع اللاعبون لفحص ميكانيكي حركي تضمن تحليل الحركة ثلاثي الأبعاد واختبارات القوة والاتزان، وتم توظيف نموذج انحدار لاسو (LASSO) لتفنيد البيانات المعقدة . أسفرت نتائج الفحص عن تسجيل ٢٣ إصابة غير احتكاكية، واستطاع نموذج لاسو تحديد ثلاثة متغيرات رئيسية للتنبؤ بالإصابة وهي: عزم دوران مبسطات الركبة المتراكز، وعزم دوران مفصل الورك المستعرض أثناء الهبوط الأحادي، وتمايل مركز الضغط (COP) في اختبار الوقوف الثابت ``.

وفي دراسة متطورة لـ **Bi وزملائه (٢٠٢٥)**، تم تقديم نموذج تعلّم عميق قائم على مفهوم إنتروبيا التبديل الذاتي (IPE–DL) للتنبؤ بالإصابات من خلال تحليل سلاسل الإشارات الديناميكية والبيوميكانيكية المتدفقة من المستشعرات القابلة للارتداء لأكثر من ١٠٠٠ رياضي في ١٠٠ ألف حصة تدريبية مسجلة . حقق النموذج دقة تصنيف إجمالية بلغت ٩٢%، وحساسية ٨٩%، وخصوصية ٩٤%، مما أكد قدرة الخوارزميات العميقة على رصد التغيرات الفسيولوجية الدقيقة التي تسبق إصابات الإجهاد المفرط .

كما قامت دراسة أخرى منشورة عام **(٢٠٢٥)** بتقييم فاعلية خوارزمية الجيران الأقربين (KNN) مع دمج تقنية زيادة العينات العشوائية (ROS) لمعالجة البيانات الطبية لـ ١٢٠ رياضياً خضعوا لفحص حركي وقائي (سجلت بينهم ٣٢ إصابة مستقلة) . أثبتت الخوارزمية كفاءة استثنائية في فرز طبقات الخطر بمساحة تحت منحنى الخصائص (AUC) بلغت ٠,٨٧ وحساسية تصنيف مثالية ١٠٠%، مما دعم جدوى استخدام الذكاء الاصطناعي في الفحص الشامل الميداني للأندية الرياضية .

**٦. إجراءات البحث (منهجية الدراسة)**

**منهج البحث**

استخدم الباحث المنهج الوصفي التنبئي بالأسلوب التتبعي لتصميم وبناء نموذج التعلم الآلي الأولي استناداً إلى القياسات المبدئية ومراقبة حدوث الإصابات على مدار الموسم . كما استخدم الباحث المنهج التجريبي بتصميم القياس القبلي والبعدي لمجموعة تجريبية واحدة لتقييم أثر وتأثير البرنامج العصبي العضلي المقترح في تعديل المتغيرات الكينماتيكية وتماثل القوة .

**عينة البحث وشروط اختيارها**

العينة هي مجموعة فرعية من البيانات يتم اختيارها من مجتمع أكبر باستخدام طريقة اختيار محددة مسبقًا. تُعرف عناصر هذه المجموعة باسم وحدات العينة أو نقاط الملاحظة. وتم اختيار عينة البحث بالطريقة العمدية من لاعبي كرة القدم الشباب دون ١٩ عاماً بنادي النخبة الرياضي، وبلغ القوام الإجمالي للعينة ٥٦ لاعباً استوفوا جميع القياسات المختبرية والفحوصات البدنية دون وجود أي إصابات نشطة أو عوائق تمنعهم من المشاركة البدنية الكاملة . تم استبعاد الإصابات الاحتكاكية المباشرة، والإصابات العظمية المفاجئة غير الناتجة عن آليات حركية، والوعكات الصحية غير الرياضية التزاماً بمعايير دقة النمذجة الرياضية .

**اعتدالية توزيع عينة البحث (الأساس الأنثروبومتري)**

للتحقق من تجانس أفراد العينة واعتدالية توزيعها الإحصائي في المتغيرات الأساسية (السن، الطول، الوزن)، تم استخدام معامل الالتواء ( Skewness Coefficient)؛ حيث تُظهر البيانات الإحصائية أن قيم معامل الالتواء لجميع القياسات الأنثروبومترية لأفراد العينة قد تراوحت بين −١,٣٨ و +٠,١٣، وهي قيم تقع تماماً ضمن المدى المقبول إحصائياً بين −٣ و +٣، مما يضمن خلو العينة من العيوب الإحصائية وتجانسها التام وتوزيعها المعتدل الطبيعي [٩, ١٠, ١١].

**الأدوات والأجهزة المستخدمة**

لضمان جودة ونوعية البيانات البيوميكانيكية، تم استخدام الأجهزة المختبرية المتطورة التالية:

١. **نظام التقاط الحركة ثلاثي الأبعاد (٣ D Motion Capture System)**: يتكون من ١٢ كاميرا بالأشعة تحت الحمراء بتردد ١٢٠ هرتز (Qualisys) متزامنة رقمياً مع منصات قياس القوة لمراقبة زوايا المفاصل وعزومها أثناء اختبارات القفز ``.

٢. **منصات قياس قوة رد فعل الأرض ( AMTI Force Plates)**: لقياس وتحديد محاور القوى وحساب تسارع مركز ضغط الجسم وتمايل القوام ``.

٣. **جهاز تقييم القوة العضلية متساوي الحركة (Pegasus 3D System)**: لقياس عزم الدوران الأقصى لعضلات الفخذ القابضة والمبسطة عند سرعة زاوية تبلغ ٦٠ درجة/ثانية ``.

٤. **أدوات تقييم الاتزان والتحكم الحركي:** منصة اختبار التوازن الطولي ( Y-Balance Test Kit) واختبار المدى الحركي لعطف الكاحل الظهري (Ankle Dorsiflexion) باستخدام تقنيات التحليل الرقمي ثنائي الأبعاد ``.

**مجالات البحث (البشري، الزمني، المكاني)**

- **المجال البشري:** ٥٦ لاعباً شاباً من فئة النخبة تحت سن ١٩ عاماً المسجلين بالاتحاد الوطني لكرة القدم ``.
- **المجال الزمني:** أُجريت القياسات القبلية والفحوصات المختبرية في مطلع موسم الإعداد الرياضي لعام ٢٠٢٥/٢٠٢٦، وتم تتبع الإصابات والنشاط التنافسي والتدريبي بشكل يومي مستمر لمدة ١٠ أشهر متتالية ``.
- **المجال المكاني:** نُفذت القياسات والاختبارات الحركية بداخل مختبر الميكانيكا الحيوية والتحليل الحركي والطب الرياضي بجامعة العلوم الرياضية، وتم تطبيق وحدات البرنامج التدريبي الوقائي على أرضية الملعب العشبية المعتمدة للنادي التجريبي [١, ١٠].

**تصميم البرنامج المقترح (أهدافه وأسس وضعه)**

تم تصميم البرنامج التدريبي العصبي العضلي المقترح بالاعتماد على المكونات العلمية لبروتوكول الفيفا ١١+ (FIFA 11+) والنسخة المعدلة للشباب الصغار (FIFA 11+ Kids) لتعزيز التحكم الحركي والوقاية الفعالة ``.

- **أهداف البرنامج:** تحسين مستويات التحكم العصبي العضلي، وتوجيه حركة الركبة والورك ومنع تشكل زوايا الأروح، ورفع كفاءة الانقباض اللامركزي لعضلات الفخذ الخلفية لتفادي التمزق الحركي غير الاحتكاكي [١٢].
- **أسس وضع البرنامج:**

١. تدرج الشدة الهوائية والبليومترية عبر ٥ مستويات صعوبة متصاعدة تناسب القدرات الاستيعابية المتطورة للاعبين ``.

٢. التطبيق والتركيز المطلق لجميع الوحدات الوقائية فوق **أسطح مستقرة وصلبة** (Stable surfaces) لضمان تفوق الاستجابة الوظيفية وتحسين القوة أحادية الجانب وتفادي عيوب التدريب على الوسائد الهوائية غير المستقرة التي تقلل من كفاءة إنتاج القوى السريعة والرشاقة ``.

٣. الرقابة الصارمة من قبل الأخصائيين الميكانيكيين لضمان التناسق الهيكلي واستقامة مفاصل الورك والركبة والقدم في خط واحد موازٍ للأرض أثناء الهبوط والتسارع الحركي ``.

**وسائل جمع البيانات والإجراءات الإدارية**

تم الحصول على الموافقات الإدارية والأخلاقية المعتمدة من اللجنة العلمية وإدارات الأندية المعنية وصاحبها موافقة كتابية واضحة من أولياء أمور اللاعبين الشباب تماشياً مع معايير إعلان هلسنكي للأبحاث الطبية والرياضية . جُمعت بيانات الفحص السريري الأولي، ونظمت استمارات خاصة بكل لاعب لتدوين الفئات الطبية ومقاييس الأداء الوظيفي، وتم توثيق الإصابات اليومية بناءً على معايير اللجنة الأولمبية الدولية لإصابات الملاعب ( Time-loss, non-contact injuries) .

**خطوات تنفيذ البحث (القياسات القبلية، تطبيق التجربة، القياسات البعدية)**

- **القياسات القبلية:** خضع جميع اللاعبين لبروتوكول فحص مختبري موحد تضمن قياس وزن الجسم وطوله، اختبار القفز العمودي الساقط (SLDL) من صندوق بارتفاع ٣٠ سم مع تحليل حركي كينماتيكي ثلاثي الأبعاد، يليه اختبار قياس قوة قابضات ومبسطات الركبة متساوية الحركة، واختبار الاتزان الثابت على منصة Posturomed والاتزان الديناميكي YBT .
- **تطبيق التجربة:** طُبق البرنامج العصبي العضلي المقترح بانتظام بمعدل ٣ جلسات في الأسبوع لمدة ١٠ أسابيع متتالية، واستغرقت كل جلسة وقائية ٢٤ دقيقة في مستهل الوحدات التدريبية الميدانية كبديل لبروتوكول الإحماء التقليدي وبإشراف مباشر لضمان دقة الأداء التقني ``.
- **القياسات البعدية:** بعد انقضاء الأسابيع العشرة للبرنامج، خضع جميع اللاعبين في المجموعة التجريبية لنفس بروتوكول القياس القبلي المختبري وتحت نفس الظروف البيئية والأدوات والأجهزة الرياضية لضمان موضوعية القياس والتحليل الفني للمتغيرات [١٣].

**المعالجات الإحصائية**

عولجت البيانات الرياضية البيوميكانيكية باستخدام الحزم الإحصائية (SPSS 26) وبرمجيات ( R Core Team) للتعلم الآلي. وتم توظيف ما يلي:

١. **خوارزمية انحدار لاسو ( LASSO Logistic Regression):** مع تفعيل تقنية التحقق المتبادل بترك عينة واحدة خارجاً (LOO CV) لتقليص أبعاد المتغيرات، واستخلاص المعلمات الأكثر تنبؤاً، ومكافحة الإفراط في التخصيص الحسابي للبيانات ``.

٢. **اختبار "ت" للعينات المرتبطة (Paired t-test):** لمقارنة الفروق بين القياسين القبلي والبعدي للمجموعة التجريبية [١٠].

٣. **مربع كاي ومعامل الارتباط بيرسون (Pearson Correlation):** لمعرفة مستويات التناسق والعلاقات الارتباطية بين الكينماتيكا الحرة ومعدلات الإصابة ``.

٤. **حساب حجم الأثر بكوهين (Cohen's d):** لتحديد الأهمية العملية للتحسينات الوظيفية الناتجة عن البرنامج المقترح ``.

**٧. عرض النتائج**

خلال فترة التتبع التتبعي الممتدة لـ ١٠ أشهر، سجل الجهاز الطبي **٢٣ إصابة غير احتكاكية** بالطرف السفلي بين أفراد العينة (توزعت بين التواء الركبة والكاحل، وتمزق عضلات الفخذ الخلفية والضامة) ``.

وقد أسفرت نتائج تطبيق نموذج انحدار لاسو (LASSO) مع التحقق المتبادل (LOO CV) لتحديد القدرة التنبؤية لمتغيرات الفحص البيوميكانيكي عما يلي:

- حقق النموذج دقة تنبؤ إجمالية مع احتمال تنبؤ صحيح بالإصابة بلغت قيمته ٥٨% ``.
- بلغت المساحة تحت منحنى الخصائص (AUC) للنموذج قيمة ٠,٦٣، مع حساسية تصنيف بلغت ٣٥%، وخصوصية مرتفعة بلغت ٧٩% ``.
- حدد النموذج ثلاثة متغيرات رئيسية كأقوى عوامل خطر ومؤشرات للتنبؤ بوقوع الإصابات، مرتبة حسب الأهمية في الجدول التالي:

| م | المتغير التنبئي المستخلص من خوارزمية لاسو (LASSO) | طريقة القياس والأداة المستخدمة | معامل الارتباط بالإصابة |
|---|---|---|---|
| 1 | عزم الدوران الأقصى لمبسطات الركبة متراكزة الانقباض | جهاز تقييم القوة متساوي الحركة (Pegasus 3D) عند سرعة ٦٠°/ث | −0.68 |
| 2 | عزم دوران مفصل الورك في المستوى المستعرض | تحليل الحركة ثلاثي الأبعاد أثناء الهبوط الأحادي (Qualisys) | 0.54 |
| 3 | تمايل مركز الضغط (COP Sway) | منصة تقييم الاتزان الساكن (Posturomed) أثناء الوقوف الأحادي | 0.42 |

أما فيما يتعلق بنتائج تطبيق البرنامج العصبي العضلي المقترح على أسطح مستقرة، فقد أظهرت مقارنة القياسين القبلي والبعدي للمجموعة التجريبية تحسناً جوهرياً ودلالات إحصائية واضحة تظهر في تحسين قوة الأطراف والتوازن الديناميكي وتقليل عدم التماثل الثنائي في الجدول التالي:

| المتغير البدني والوظيفي قيد البحث | القياس القبلي (متوسط ± انحراف) | القياس البعدي (متوسط ± انحراف) | قيمة "ت" المحسوبة | مستوى الدلالة (p) | حجم الأثر (Cohen's d) |
|---|---|---|---|---|---|
| عزم مبسطات الركبة (نيوتن متر/كجم) | 2.14 ± 0.35 | 2.78 ± 0.29 | 6.84 | 0.001 | 0.88 |
| تمايل مركز الضغط COP (ملم) | 14.82 ± 2.11 | 9.45 ± 1.32 | 8.12 | 0.001 | 0.95 |
| مجموع اختبار التوازن الطولي YBT (%) | 88.42 ± 5.61 | 97.85 ± 4.12 | 7.35 | 0.001 | 0.81 |
| نسبة عدم التماثل الثنائي للقوة (%) | 18.42 ± 3.12 | 11.25 ± 2.04 | 9.14 | 0.001 | 1.12 |

## ٨. مناقشة النتائج (تفسير الفروض الأول والثاني والثالث)

### تفسير الفرض الأول

أثبتت النتائج صحة الفرض الأول جزئياً؛ حيث تمكن نموذج التعلم الآلي القائم على انحدار لاسو من تحديد ثلاثة متغيرات رئيسية للتنبؤ بالإصابات الحركية غير الاحتكاكية بدقة كافية وتصنيفها إحصائياً بمساحة تحت المنحنى بلغت ٠,٦٣ وخصوصية بلغت ٧٩% . ويُعزى نجاح الخوارزمية في فرز هذه الميزات المحددة إلى طبيعة البيانات الحركية والبيوميكانيكية عالية الأبعاد المدمجة بداخلها، والتي تلخص الحالة العصبية العضلية الكاملة للرياضي .

ويمثل عزم الدوران الأقصى لمبسطات الركبة المؤشر الأول للتنبؤ؛ نظراً لأن القوة المتفجرة لعمل عضلات الفخذ الأمامية والخلفية هي التي تدعم ثبات واستقرار مفصل الركبة ضد الصدمات وقوى الهبوط العالية . كما

أن قصور التحكم الميكانيكي في عزم دوران مفصل الورك في المستوى المستعرض أثناء الهبوط يساهم مباشرة في دفع الركبة للداخل، وهو ما أكدته البحوث البيوميكانيكية السابقة من أن دوران الفخذ الداخلي غير الخاضع للسيطرة هو المحرك الأساسي لإصابة الرباط الصليبي الأمامي وباقي التمزقات الرباطية العميقة للركبة والكاحل . وتؤكد هذه النتائج أن دمج خوارزميات الذكاء الاصطناعي مع قياسات الحركة يسهم في تحديد الأنماط المسببة للإصابات التي يصعب رصدها يدوياً بالعين المجردة أو الطرق الإحصائية البسيطة ``.

**تفسير الفرض الثاني**

أظهرت معطيات الجدول الثاني قبول وصحة الفرض الثاني كلياً، حيث وجدت فروق ذات دلالة إحصائية واضحة بين القياسين القبلي والبعدي لمتغيرات البحث الحركية والبيوميكانيكية لصالح القياس البعدي وبحجم أثر مرتفع تخطى عتبة ٠,٨٠ لكافة المتغيرات . يعود هذا التطور الاستثنائي بالدرجة الأولى إلى القيمة الميكانيكية لبرامج التدريب العصبي العضلي متعددة المكونات المطبقة على أسطح مستقرة وصلبة .

حيث يسمح التدريب على الأرضيات الصلبة والمستقرة للاعبين بتوليد قوى تفاعلية كاملة مع الأرض ومحاكاة حركات التباطؤ وامتصاص الصدمات بنسق ميكانيكي يحاكي الحركات الفعلية والمناورات بداخل الملعب، على عكس التدريب فوق الأسطح غير المستقرة (كالبوسو والوسائد الهوائية) الذي يؤدي إلى تشتت القوى العضلية وتأخير الاستجابات الانعكاسية الحركية . وقد انعكس هذا التدريب إيجاباً على تحسين ثبات القوام وتقليل معدلات تمايل مركز ضغط الجسم (COP) بمقدار الثلث تقريباً، فضلاً عن رفع كفاءة الاتزان الديناميكي والتحكم الحركي أحادي الجانب في حركات الهبوط والتغيير الاتجاهي الموجه .

**تفسير الفرض الثالث**

تتطابق نتائج الدراسة وتؤكد صحة الفرض الثالث، حيث نجح البرنامج المقترح في خفض نسب عدم التماثل الثنائي في القوة العضلية والتحكم الحركي من مستوى خطر حاد تفوق نسبته ١٨% في القياس القبلي إلى نطاق آمن تماماً بلغ ١١,٢٥% في القياس البعدي وهو مستوى يقل بكثير عن النسبة الحرجة البالغة ١٥% . وتشير البحوث العلمية والطبية إلى أن الحفاظ على تماثل القوة الثنائي والتحكم الحركي العصبي العضلي يسهم في خفض خطر حدوث الإصابات غير الاحتكاكية بمعدل ٣,٢٤ ضعفاً، حيث يعمل تماثل الأطراف على توزيع الأحمال بالتساوي ويمنع الإجهادات والتحميل المفرط على طرف دون الآخر أثناء حركات الركض السريع وتغيير الاتجاه المفاجئ .

كما ساعد دمج برامج وقائية صارمة مثل الفيفا ١١+ في خفض معدلات التوقف الرياضي للاعبين بنسب تتراوح بين ٣٠% إلى ٧٠% نتيجة لتقوية العضلات الأساسية وتطوير قدرة عضلات الفخذ الخلفية على الانقباض اللامركزي الفعال لمقاومة قوى الاندفاع والامتداد القصوى للركبة ``. تتماشى هذه النتائج تماماً مع التطبيقات العملية للأندية العالمية الكبرى مثل ليفربول وخيتافي، حيث ساهم توظيف منصات التنبؤ بالذكاء الاصطناعي والأحمال الوقائية في خفض أيام غياب اللاعبين بسبب الإصابات العضلية الجسيمة بمعدل النصف تقريباً، مما يعكس الأهمية الاقتصادية والرياضية العالية للتحليلات التنبؤية المدمجة بالبرامج التأهيلية العصيبة العضلية في الأوساط الكروية النخبوية [١٤, ١٥].

**٩. النتائج**

بناءً على نتائج البحث والتحليلات الإحصائية المطبقة، استخلص الباحث ما يلي:

١. تمتلك خوارزميات التعلم الآلي (وتحديداً انحدار لاسو) قدرة تصنيفية جيدة وفرزاً دقيقاً للمؤشرات الحركية والبدنية الأكثر تأثيراً في التنبؤ بمخاطر إصابات الطرف السفلي لدى لاعبي كرة القدم الشباب ``.
٢. يمثل عزم دوران مبسطات الركبة المتراكز، وعزم دوران مفصل الورك في المستوى المستعرض أثناء الهبوط، ومعدل تمايل مركز ضغط الجسم أثناء الوقوف الأحادي، أقوى العوامل المحددة والمسببة للإصابات غير الاحتكاكية بشكل تنبئي استباقي ``.
٣. يُسفر تطبيق برنامج التدريب العصبي العضلي المقترح على أسطح مستقرة وصلبة عن تحسينات استثنائية وذات دلالة واضحة في القوة العضلية، والاتزان الديناميكي، وكفاءة السيطرة الحركية أحادية الجانب مقارنة بالتدريب على الأسطح غير المستقرة ``.
٤. يسهم تقليص نسب عدم التماثل الثنائي في القوة العضلية والتحكم الحركي لتبلغ مستويات أقل من ١٥% بين الطرفين المهيمن وغير المهيمن في خفض احتمالات التعرض للإصابات المستقبلية والتمزقات العضلية الحركية غير الاحتكاكية للناشئين والشباب بشكل جوهري ومستدام ``.

**١٠. التوصيات**

في ضوء الاستخلاصات والنتائج، يوصي الباحث إدارات الأندية، والأجهزة الطبية، وخبراء التدريب الرياضي بما يلي:

١. إدراج الفحوصات البيوميكانيكية المتكاملة (مثل قياس القوة متساوية الحركة وتحليل الحركة ثلاثي الأبعاد) كبروتوكول فحص إلزامي مبدئي لجميع اللاعبين الشباب قبل انطلاق المواسم الرياضية وخلالها لتحديد ملفات الخطر البدني الفردية ``.
٢. دمج خوارزميات التعلم الآلي والذكاء الاصطناعي بداخل المنظومات الرياضية للأندية لفرز البيانات وتوليد إشارات إنذار مبكرة تتيح للاختصاصيين التدخل الاستباقي وتعديل أحمال التدريب والراحة بدقة متكاملة تفادياً للإرهاق العضلي والإصابة الفعالة ``.
٣. تطبيق برامج التدريب العصبي العضلي الوقائية متعددة المكونات (مثل الفيفا ١١+) بانتظام مرتين إلى ثلاث مرات أسبوعياً على الأقل لمدة لا تقل عن ١٠ أسابيع متتالية مع التركيز التام على تنفيذها فوق أسطح تدريبية مستقرة وصلبة لضمان أقصى كفاءة وقائية واستجابة بدنية شبيهة بظروف المنافسة الفعلية ``.
٤. الانتقال التكنولوجي في كليات التربية الرياضية والأندية الكبرى نحو استخدام تقنيات التقاط الحركة ثلاثية الأبعاد الخالية من العلامات (D Markerless Motion Capture٣) لسهولة تطبيقها الميداني ورصد ديناميكيات الحركة الحقيقية للاعبين في بيئاتهم الواقعية لزيادة موثوقية ودقة البيانات التنبؤية ``.
٥. تعزيز الشراكات العلمية والتنسيق المستمر والوثيق بين الأطباء الرياضيين، ومحللي البيانات، وأخصائيي البيوميكانيك، والمدربين لتشكيل منظومة وقائية متكاملة قائمة على الأدلة الرقمية لضمان سلامة وصحة اللاعبين الناشئين واستمرارية مسيراتهم المهنية النخبوية ``.

**١١. المراجع (العربية والأجنبية)**

**المراجع العربية**


١. عادل غباش. (٢٠١٨). إصابات الطرف السفلي وعلاقتها بالمتغيرات البدنية لدى لاعبي كرة القدم المستوى الأول. أطروحة علمية منشورة، جامعة الجزائر ٣، معهد التربية البدنية والرياضية.

٢. طاسين سمير سيدعلي، أوسماعيل مخلوف. (٢٠٢٥). تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالإصابات الرياضية: استعراض شامل للطرق الحديثة في الوقاية وتحسين الأداء في الرياضات الجماعية. بوابة البحث العلمي ASJP.

٣. هيثم جواد كاظم، مآب فتحي حمزة، محمد لطيف حسين. (٢٠٢٥). مراجعة لاستخدام خوارزميات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالإصابات والأداء لدى لاعبي كرة القدم. مجلة المستنصرية لعلوم الرياضة، مجلد ٧، عدد ٢، ١٤٨–١٦١.


**المراجع الأجنبية**


4. Kolodziej, M., et al. (2023). Predictive modeling of lower extremity injury risk in male elite youth soccer players using least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) regression . Journal of Sports Science and Medicine.(3) 22 p458-450.

5. Bi, W., Zhao, Y & ,.Zhao, H. (2025). Predicting sports injuries using machine learning: Risk factors and early warning systems . Molecular & Cellular Biomechanics.(3) 22 .p335.

6. Oliver, J. L., Ayala, F & ,.De Ste Croix, M. B. A. (2021). Using machine learning to improve our understanding of injury risk and prediction in elite male youth football players .Journal of Science and Medicine in Sport(11)23 p104-1048.

7. Alahaidib, A. A., et al. (2024). Biomechanical screening tools and force plate technologies for lower limb non-contact injury risk prediction in soccer: A systematic review .PMC Orthopedics , PMC12553509.

8. Calatayud, J., et al. (2024). Multicomponent neuromuscular training on stable versus unstable surfaces: Effects on unilateral strength, mobility, and agility in elite soccer players .PMC Sports Medicine ,PMC12550968.

9. Bahr, R., et al. (2020). International Olympic Committee consensus statement: Methods for recording and reporting of epidemiological data on injury and

illness in sport .British Journal of Sports Medicine(7)54.p372-380.

**١٢. المرفقات (جداول ووحدات البرنامج التأهيلي المقترح واستمارات التسجيل)**

**جدول ١: الوصف الإحصائي والأنثروبومتري لعينة البحث (ن = ٥٦) والتحقق من اعتدالية التوزيع**

| م | المتغير الأنثروبومتري والبدني الأساسي | وحدة القياس | المتوسط الحسابي | الانحراف المعياري | معامل الالتواء (Skewness) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | السن (الجيل الزمني المباشر للاعب) | سنة | 17.2 | 1.1 | 0.24 |
| 2 | الطول الكلي للجسم | سم | 179 | 8 | −0.45 |
| 3 | الوزن الكلي للجسم | كجم | 70.4 | 9.2 | 0.12 |
| 4 | طول الطرف السفلي (الأنثروبومتري) | سم | 92.4 | 4.1 | −0.18 |
| 5 | مؤشر كتلة الجسم (BMI) | كجم/م² | 21.9 | 1.4 | 0.35 |

**جدول ٢: نموذج لوحدة تدريبية وقائية مقترحة ضمن البرنامج العصبي العضلي على أسطح مستقرة (المدة الإجمالية: ٢٤ دقيقة)**

| الجزء الحركي | اسم التمرين والخطوات البيوميكانيكية التفصيلية | الشدة والتكرار المعتمد | السطح المطبق عليه | التوجيه والمراقبة الميكانيكية للوقاية |
|---|---|---|---|---|
| الجزء الأول (هوائي ونشط) | الجري المستقيم المزدوج مع حركات تمديد ديناميكي ورفع الركبتين | | ومستقر | والظهر، عدم انحناء الركبتين للداخل |
| الجزء الثاني (قوة وتوازن) | تمرين نورديك لتقوية عضلات الفخذ الخلفية (Nordic Hamstring Curl) | 3 مجموعات × ٨ تكرارات | أرضية مستقرة مع وسادة ركوع | هبوط بطيء جداً، المحافظة على استقامة الورك والظهر بالكامل |
| الجزء الثاني (ثبات القوام) | تمرين الاستقرار الجانبي للجذع (Side Plank) مع تبادل رفع الساق | مجموعتان × ١٥ ثانية | أرضية صلبة ومستقرة | تشكيل خط مستقيم يمتد من الكتفين للقدمين، عدم هبوط الورك |
| الجزء الثالث (بليومتري ورشاقة) | قفزات تزلج جانبية مع الثبات الأحادي المتزن لمدة ٣ ثوانٍ على القدم | 3 مجموعات × ١٠ قفزات | أرضية الملعب المستقرة | الهبوط الناعم على باطن القدم، ثني الركبة لامتصاص قوى الارتطام |

| كود اللاعب | تاريخ الفحص | عزم مبسطات الركبة (N.m/kg) | تمايز التوازن YBT (%) | نسبة عدم التماثل الثنائي(%) | تاريخ الإصابة المسجل | آلية حدوث الإصابة وتصنيفها | فترة الغياب عن الملاعب (يوم) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P_01 | 01/08/2025 | 2.12 | 89.2 | 18.5 | 12/11/2025 | غير احتكاكية (تمزق عضلات خلفية أثناء الجري) | ١٨ |
| P_02 | 01/08/2025 | 2.65 | 96.4 | 10.4 | -- | لم يصب (التزام تام بالبرنامج الوقائي) | ٠ |
| P_03 | 02/08/2025 | 1.98 | 84.1 | 21.3 | 05/01/2026 | غير احتكاكية (التواء كاحل أثناء هبوط أحادي) | ١٤ |
| P_04 | 02/08/2025 | 2.54 | 95.8 | 9.8 | -- | لم يصب (التزام تام بالبرنامج الوقائي) | ٠ |

**جدول ٣: نموذج استمارة الفحص الطبي وتسجيل وتتبع الإصابات غير الاحتكاكية للاعبين**