مؤشرات الصلابة العضلية كمحددات لبناء دالة رقمية للتنبؤ بالقدرة الانفجارة للرباعين المتقدمين (13)

Muscle Stiffness Indicators as Determinants for Developing a Predictive Digital Function of Explosive Power in Advanced Weightlifters

م.م نورا محمد مصطفى

A. L. NOORA MOHAMMED MUSTAFA

مديرية تربية ديالى

Diyala Directorate of Education

nooramohamedphd24@uodiyala.edu.iq

م.م عمر ناظم علوان **عبدالله قاسم محمد**

A. L. OMER NADIM ALWAN **ABDULLAH QSIM MOHAMMED**

مديرية تربية ديالى **رئاسة جامعة ديالى**

Diyala Directorate of Educat

Presidency of the University of Diyala

omernadumphd24@uodiyala.edu.iq

abdalaah199948@gmail.com

الكلمات المفتاحية : الميوتومترية، العضلات الهيكلية، البايوميكانيك، الوظيفة العصبية العضلية، صلابة العضلات، رياضات القوة.

Keywords: Myotonometry, muscle stiffness, viscoelasticity, neuromuscular performance, structural equation modeling, weightlifting.

ملخص البحث :

يعد فهم كيفية تأثير الخصائص العضلية في إنتاج القوة من القضايا المهمة في رياضات القوة لما لها من دور مباشر في تحديد مستوى الأداء الرياضي. جاءت هذه الدراسة لتوضيح طبيعة العلاقة بين الخصائص الميكانيكية للعضلات ومؤشرات الأداء العصبي العضلي المتمثل بالقدرة العضلية لدى رافعي

الأثقال المتقدمين من خلال بناء نموذج معادلة تنبؤية تهدف إلى تفسير الارتباطات القائمة بين هذه المتغيرات. شملت الدراسة ثلاثين رياضيًا من الرباعين المتقدمين جرى قياس مجموعة من الخصائص العضلية باستخدام جهاز الميوتون تضمنت الصلابة العضلية والنغمة والمرونة وزمن الاسترخاء والانسيابية. وتم تطبيق هذه القياسات على أربع عضلات رئيسية هي: العضلة الرباعية الفخذية وثنائية الرؤوس الفخذية والعضلة شبه المنحرفة والعضلة ذات الرأسين العضدية. كما تم تقييم الأداء الانفجاري من خلال اختبارات القوة الثابتة للسحب من منتصف الفخذ واختبار القفز العمودي من الثبات بالاسفل إضافة إلى قياس زمن الوصول إلى عتبة الانقباض العضلي. أظهرت نتائج النموذج أن متغيري الصلابة العضلية وزمن الاسترخاء يمتلكان قدرة تنبؤية معنوية بمستوى الأداء الانفجاري، في حين لم تُظهر متغيرات النغمة والمرونة والانسيابية ارتباطًا ذا دلالة إحصائية. وأوضح النموذج النهائي ملاءمة مرتفعة تعزز من موثوقية نتائجه ودقّتها التفسيرية. تؤكد هذه النتائج أهمية القياسات المستخلصة من جهاز الميوتون ولا سيما الصلابة العضلية وزمن الاسترخاء في متابعة الرياضيين وتوجيه برامج التدريب وفق خصائصهم الفردية. كما تفتح المجال أمام تصميم استراتيجيات تدريبية أكثر تخصيصًا تهدف إلى تحسين إنتاج القوة وتعزيز الأداء في رياضات القوة.

ABSTRACT

Understanding how muscle mechanical properties affect force production is crucial for optimizing performance in strength sports. This study aimed to develop a predictive equation model that links myotonometric indicators of muscle viscoelasticity with neuromuscular explosive power in advanced weightlifters. Thirty male athletes (mean age = 24.1 ± 2.8 years) participated. Muscle properties including stiffness, tone, elasticity, relaxation time, and creep were measured using the MyotonPRO device in four major muscles: Vastus Lateralis, Biceps Femoris, Upper Trapezius, and Biceps Brachii. Explosive performance was assessed through the rate of force development (RFD), countermovement jump (CMJ), and time to contraction threshold (TCT). Structural equation modeling (SEM) was applied via AMOS 26 to identify direct and indirect relationships among latent variables representing muscle function and performance outcomes. Results revealed that muscle stiffness and relaxation time were the strongest predictors of explosive capacity ($p < 0.05$), while tone, elasticity, and creep showed no significant relationships. The model demonstrated excellent fit indices ($\chi^2/df = 1.37$, CFI = 0.97, TLI = 0.95, RMSEA = 0.049), confirming its reliability and explanatory accuracy. These findings highlight the diagnostic and monitoring potential of myotonometric parameters especially stiffness and relaxation time for individualizing training

and recovery programs in strength athletes. The study supports integrating mechanical muscle assessment tools with performance metrics to enhance the precision of athlete monitoring and to design personalized interventions that optimize force production and reduce injury risk.

1-المقدمة :

يتطلب تحسين أداء انقباض العضلات لدى الرياضيين النخبة فهمًا عميقًا للجوانب البيوميكانيكية والفسيولوجية التي تشكل الأساس لوظائف العضلات (Hirata et al., 2021; Azzam et al., 2023).ففي رياضات مثل رفع الأثقال والقوة البدنية، تعَد القدرة على إنتاج أقصى قوة خلال محاولات قصيرة ومتكررة أو مستمرة أمرًا أساسيًا لتحقيق النجاح وضمان الاستشفاء الفعال (Tucker et al., 2020).وعلى الرغم من أن اختبارات القوة التقليدية تستخدم على نطاق واسع إلا أنها غالبًا ما تخفق في تقديم رؤية دقيقة للسلوك الميكانيكي التفصيلي للعضلات أثناء الجهود الديناميكية أو في ظروف الأداء الميدانية.(Baiget et al., 2022)

شهدت السنوات الأخيرة تطورًا كبيرًا في أدوات القياس غير التداخلية (التي تستخدم ميدانياً بدون تداخل جراحي) إذ أدخلت تقنيات مثل الميوتومترية (Myotonometry) التي تتيح قياسًا واضحًا ودقيقًا للخصائص الأساسية للعضلة بما في ذلك الصلابة والنغمة العضلية والمرونة وزمن الاسترخاء والانسيابية (Creep) (Cè et al., 2022; Garcia-Garcia et al., 2021).ويعد جهاز Myoton PRO من أبرز هذه التقنيات إذ أثبت فعاليته العالية في تقديم بيانات ثابتة وموضوعية تعكس قدرة العضلة وحالتها من الإجهاد العضلي ومدى تكيفها مع متطلبات التدريب .(Lohr et al., 2020) وتعد هذه القياسات ذات أهمية بالغة بالنسبة لرافعي الأثقال حيث إن الأحمال التدريبية الكبيرة تفرض إجهادًا عصبيًا عضليًا يستوجب مراقبة دقيقة.(Hirata et al., 2021; Baiget et al., 2022) وعلى الرغم من التوسع في استخدام تحليل الخصائص الميكانيكية للعضلات ما زال هناك نقص في الأدبيات العلمية التي تقدم نماذج تكاملية تفسر كيفية تأثير هذه الخصائص مجتمعة في الأداء الرياضي (Zhang et al., 2023).ومن هنا يبرز دور نموذج المعادلة الهيكلية(SEM) ، والذي يعد من الأساليب الإحصائية الدقيقة لدراسة العلاقات المباشرة وغير المباشرة بين المتغيرات الظاهرة والغير ظاهرة في الأنظمة البيولوجية المعقدة باستخدام برنامج.(Zhang et al., 2023) AMOS تهدف هذه الدراسة إلى بناء نموذج هيكلي يربط بين الخصائص العضلية القابلة للقياس باستخدام تقنية Myoton ومؤشرات الأداء والاستشفاء لدى رافعي الأثقال المحترفين (Garcia-Garcia et al., 2021; Cè et al., 2022).

ومن خلال دراسة العضلات الرئيسية المشاركة في الاداء المثبت في الاختبارات وهي: العضلة الرباعية الفخذية والعضلة ثنائية الرؤوس الفخذية والعضلة شبه المنحرفة والعضلة ذات الرأسين العضدية تسعى هذه الدراسة إلى توضيح كيفية مساهمة الخصائص الداخلية للعضلات في تحديد مستوى القوة العضلية المقاسة (Villaseca-Vicuña, R et al., 2024). وقد توفر النتائج المستخلصة أساسًا علميًا لتطوير برامج تدريب فردية أكثر دقة، ودعم استراتيجيات تحقيق الأداء الأمثل في رياضات القوة (Azzam et al., 2023).

2- منهج البحث وإجراءاته الميدانية :

2-1 منهج البحث

هدفت الدراسة الى اعتماد المنهج الوصفي بالاسلوب المسحي لملائمته مشكلة البحث اضافة الى ان خصوصية الاختبارات المنفذة مطبيعة بناة معادلة هيكلية تتطلب هذا الاسلوب العلمي في العمل.

في حين ان مجتمع البحث تم تحديده بالرباعين العراقيين المتقدمين من فئات وزنية مختلفة واعتماد القياسات النسبية لاحقاً. وبلغت عينة البحث من ثلاثين رباعاً وكما مبن في الجدول ادناه:

المتغيرات	القيم
حجم العينة	30
العمر بالسنين	24.1 ± 2.8
الكتلة (كغم)	78.6 ± 6.4
العمل التدريبي التنافسي (سنة)	5.2 ± 1.3
الوحدات التدريبي الاسبوعية	5وحدة/اسبوع
المستوى التنافسي	اقليمي (n=18), دولي(n=12)
الجانب المفضل	يمين (n=26), يسار(n=4)

جدول (1) يبين مواصفات العينة

2-2 مجتمع وعينة البحث :

تم تحديد حجم العينة في هذه الدراسة استنادًا إلى متطلبات نمذجة المعادلات الهيكلية .(SEM) ووفقًا للإرشادات التي قدمها(2015) Kline ، فإن النسبة المقبولة تتراوح بين 5 إلى 10 مشاركين لكل معامل مقدّر في حين أوصى Wolf وآخرون (2013) بضرورة توفر ما لا يقل عن 200 ملاحظة في النماذج المعقدة أو 20 مشاركًا على الأقل لكل متغير كامن في النماذج الأصغر المبنية على نظرية قوية مع معاملات تحميل عالية.

نظرًا لأن النموذج المستخدم في هذه الدراسة تضمن متغيرات متعددة تمثل الخصائص العضلية والقوة العصبية العضلية الانفجارية منها ستة متغيرات ملاحظة هي: الصلابة النغمة العضلية زمن الاسترخاء اختبار القفز العمودي(CMJ) معدل تطور القوة(RFD) وزمن الوصول إلى عتبة الانقباض(TCT) فقد

عد أن عينة مكوّنة من 30 لاعب رفع أثقال مدرب تمثل حجمًا مناسبًا لإجراء تحليل استكشافي بنموذج معادلة هيكلية قائم على أساس نظري متين. وبما أن هذه الدراسة لم تصمم لاختبار فرضية محددة مسبقًا ذات حجم تأثير مستهدف فقد تم إجراء تحليل قدرة إحصائية وبافتراض مستوى دلالة ($\alpha = 0.05$) وقدرة إحصائية (Power = 0.80) واستخدام اختبارات ارتباط ثنائية الاتجاه تبيّن أن أدنى حجم تأثير يمكن اكتشافه هو $r = 0.47$ مما يشير إلى أن العلاقات المتوسطة إلى الكبيرة يمكن اكتشافها بثقة داخل هذه العينة.

اختيار العضلات ومواقع القياس:

تم اختيار أربع عضلات لتمثل سلسلة حركية متكاملة تعد أساسية في أداء رفع الأثقال. شملت هذه العضلات كلًّا من العضلة المتسعة الوحشية (Vastus Lateralis) التابعة للعضلة الرباعية الفخذية والعضلة ذات الرأسين الفخذية (Biceps Femoris) التابعة لأوتار المأبض لتمثيل إنتاج القوة في الطرف السفلي واستقرار السلسلة الخلفية للجسم. كما شملت العضلة شبه المنحرفة العلوية (Upper Trapezius)والعضلة ذات الرأسين العضدية (Biceps Brachii) بهدف قياس انتقال الحمل في الطرف العلوي والتحكم في لوح الكتف وتثبيت مفصل المرفق. وقد تم اختيار هذه التشكيلة العضلية نظرًا لدورها الجماعي في توليد القوة العمودية والسيطرة على البار وتحقيق التناغم العصبي العضلي أثناء أدائي رفعتي النتر (Clean & Jerk) والخطف.(Snatch)

أُجريت جميع القياسات على الطرف المهيمن لدى الرياضيين باستخدام علامات تشريحية معيارية لضمان الاتساق وإمكانية تكرار النتائج بدقة. كما تم اختيار مواقع القياس بعناية لتوفير أفضل إمكانية وصول وسطح مناسب لتطبيق جهاز Myoton بما يتوافق مع الإرشادات المنهجية الحديثة (Lohr et al., 2020; Cè et al., 2022).

2-3 ادوات وأجهزة ووسائل جمع المعلومات:

تم تقييم الخصائص الميكانيكية للعضلات الهيكلية باستخدام جهاز MyotonPRO® من شركة (Myoton AS إستونيا) وهو أداة رقمية غير تداخلية موثوقة وشائعة الاستخدام لقياس الخصائص الكمية للأنسجة العضلية السطحية (Aird et al., 2012; Cè et al., 2022). يعمل هذا الجهاز من خلال إرسال نبضة ميكانيكية قصيرة منخفضة الشدة إلى العضلة بواسطة مسبار يدوي ثم يقوم بتسجيل الاهتزازات الناتجة عن النسيج العضلي باستخدام مستشعر تسارع مدمج. تتيح هذه الطريقة إجراء قياسات سريعة وقابلة للتكرار وموضوعية لخصائص العضلات في الظروف المعزولة مما يجعلها مناسبة للغاية للأغراض البحثية والإكلينيكية التي لا يمكن فيها استخدام الإجراءات التداخلية أو تسجيل النشاط الكهربائي العضلي (Lohr et al., 2020; Garcia-Garcia et al., 2021). وكما مبينة بالشكل (1)

شكل (1) يبين جهاز تسجيل الخصائص العضلية

المتغيرات المعتمدة في القياس:

تم تسجيل خمسة متغيرات حيوية للعضلات معبرة عن خصائصها رئيسية لكل عضلة على حدة وهي كما يأتي:

الصلابة العضلية (نيوتن/متر):

تمثل مقاومة العضلة للتشوه عند تعرضها لقوة خارجية. وتشير القيم العالية للصلابة إلى زيادة المقاومة الميكانيكية مما قد يعكس جاهزية العضلة للأداء أو حالتها من التحميل الزائد أو حتى بوادر مبكرة للإجهاد العصبي العضلي.(Hirata et al., 2021; García-Manso et al., 2011)

النغمة العضلية (هرتز):

تشير إلى التوتر الداخلي الموجود في العضلة أثناء حالة السكون ويتم قياسها من خلال تردد الاهتزاز الطبيعي للأنسجة العضلية. وتُعدّ مؤشرًا بديلًا عن النشاط العصبي العضلي الأساسي ودرجة توتّر العضلة في حالتها غير المنقبضة.(Aird et al., 2012)

المرونة (الانخفاض اللوغاريتمي):

تُعرّف بأنها قدرة العضلة على العودة إلى شكلها الأصلي بعد التعرض للتشوه. ويتم قياسها من خلال معدل فقدان الطاقة أثناء الاهتزاز حيث تشير القيم المنخفضة إلى تعاف أكثر كفاءة ومقاومة داخلية أقل (Lohr et al., 2020; Cè et al., 2022).

زمن الاسترخاء (ميلي ثانية):

وهو المدة الزمنية التي تستغرقها العضلة للعودة إلى وضعها الأصلي بعد تعرضها للإزاحة الميكانيكية. ويعد طول زمن الاسترخاء مؤشرًا على تراجع قدرة العضلة على الاستشفاء أو ارتفاع مستوى الإجهاد العصبي العضلي.(Hirata et al., 2021; García-Manso et al., 2011)

الانسيابية (نسبة التشوه):

تعبر عن الاستطالة التدريجية للعضلة عند تعرضها لتوتر ثابت وتقدم فهماً دقيقًا للسلوك اللزج المرن للأنسجة الرخوة مع مرور الوقت مما يساعد في تقييم قدرة العضلة على التكيف مع الأحمال الميكانيكية المستمرة (Lohr et al., 2020; Cè et al., 2022).

تم تكرار كل قياس ثلاث مرات متتالية في نفس الموقع ثم تم اعتماد المتوسط الحسابي للقيم الثلاث لأغراض التحليل الإحصائي اللاحق. تم وضع المشاركون في وضعية الاستلقاء على الظهر أو البطن تبعًا للموقع التشريحي للعضلة المستهدفة وطُلب منهم الاسترخاء التام لتجنب حدوث أي انقباضات عضلية لا إرادية قد تؤثر في دقة النتائج. تم تحديد موقع القياس بدقة باستخدام قلم جلدي طبي استنادًا إلى المعالم التشريحية الظاهرة وتم التأكد من صحة الموقع عبر الفحص بالتحسس اليدوي المعياري لضمان إمكانية إعادة القياسات بنفس الدقة في جميع الجلسات (Tillin et al., 2010). أُجريت جميع القياسات بواسطة فاحص واحد مدرّب خضع مسبقًا لعملية معايرة منهجية باستخدام جهاز Myoton وذلك بهدف تقليل التباين بين المقيمين ورفع مستوى الصدق الداخلي للبيانات (Aird et al., 2012).

مؤشرات الأداء: لغرض تحليل العلاقة بين الخصائص الميكانيكية للعضلات ومستوى الأداء الرياضي تم تسجيل مجموعة من المؤشرات التي شملت:

أفضل إنجاز شخصي للرياضيين في رفعتي النتر (Clean & Jerk) والخطف (Snatch) خلال آخر دورة تنافسية.

4-2 اجراءات البحث الميدانية

اختبارات القوة الوظيفية والتي تضمنت:

- اختبار السحب لقياس القوة القصوى ومعدل تطور القوة (Rate of Force Development – RFD).
- اختبار القفز العمودي مع ثبات في الاسفل (Countermovement Jump – CMJ) لتقييم القوة الانفجارية العمودية.
- زمن الوصول إلى عتبة الانقباض العضلي (Time to Contraction Threshold – TCT) الذي تم قياسه باستخدام أجهزة قياس الشد (tensiometry) أو منصات القوة عالية الحساسية لرصد سرعة الاستجابة العصبية العضلية.

قياس مؤشرات الأداء:

معدل تطور القوة:(RFD)

تم تقييم هذا المؤشر باستخدام اختبار السحب متساوي القياس من منتصف الفخذ. وقف المشاركون على منصة قوة مُعايرة مع ثني الركبتين والوركين بزاوية تقارب 125 درجة وطُلب منهم السحب عموديًا بأقصى سرعة وقوة ممكنة دون تنفيذ حركة الرفع الفعلية. تم تسجيل معدل زيادة القوة خلال أول 200 مللي ثانية من الانقباض باستخدام نظام إلكتروني لجمع البيانات. يعكس هذا المؤشر قدرة الجهاز العصبي العضلي على توليد القوة بسرعة وهو عامل حاسم في رياضات القوة (Aagaard et al., 2002; Cormie et al., 2011).

ارتفاع القفزة المضادة للحركة:(CMJ)

تم قياس الارتفاع العمودي للقفز باستخدام منصة قوة. نفذ الرياضيون قفزة عمودية قصوى من وضع الوقوف مع حركة نزول تحضيرية دون استخدام الذراعين. تم حساب ارتفاع القفزة من زمن الطيران المسجل بين مرحلتي الانطلاق والهبوط. يعد هذا الاختبار أحد أكثر الوسائل شيوعًا في تقييم القوة الانفجارية للطرف السفلي.(McMahon et al., 2018)

زمن الوصول إلى عتبة الانقباض:(TCT)

تم تسجيل هذا المؤشر باستخدام منصة قوة متصلة ببرنامج تسجيل عالي السرعة. ويعرف زمن الوصول إلى عتبة الانقباض بأنه الفترة الزمنية الممتدة من التحفيز الأولي وحتى بداية الانقباض العضلي القابل للقياس أثناء الحركة الانفجارية. وهو يعبرعنه بوحدة المللي ثانية (ms)، ويعد مؤشرًا على كفاءة الاستجابة العصبية العضلية وسرعة الإرسال العصبي الحركي (Wagle et al., 2017).

2-5 التحليل الإحصائي:

تم اجراء الاحصاء الوصفي لجميع متغيرات العضلات ومؤشرات الأداء كما استخدم معامل ارتباط بيرسون للكشف عن العلاقات بين المتغيرات المختلفة. وتم تنفيذ تحليل نمذجة المعادلات الهيكلية (SEM)باستخدام برنامج AMOS الإصدار (IBM Corp.)26.0 ، بهدف تقدير المتغيرات الكامنة والعلاقات المباشرة وغير المباشرة بينها. جرى تقييم مدى مطابقة النموذج (Model Fit) من خلال مجموعة من المؤشرات الإحصائية المعتمدة، شملت: مؤشر المطابقة المقارن (CFI) ومؤشر المطابقة التزايدي (TLI) وجذر متوسط مربع الخطأ التقريبي (RMSEA) بالإضافة إلى نسبة مربع كاي إلى درجات الحرية (χ^2/df). وتم تحديد مستوى الدلالة الإحصائية عند $p < 0.05$.

المرحلة الأولى: إعداد البيانات وتعريف المتغيرات

تم تجميع البيانات مبدئيًا باستخدام برنامج SPSS من مصدرين رئيسيين:

الخصائص الميكانيكية للعضلات المقاسة بواسطة جهازMyotonPRO والتي شملت: الصلابة (نيوتن/متر) النغمة العضلية (هرتز) المرونة (الانخفاض اللوغاريتمي) زمن الاسترخاء (مللي ثانية) والانسيابية (نسبة التشوه) وذلك لأربع عضلات رئيسية هي: العضلة الرباعية الفخذية وثنائية الرؤوس الفخذية والعضلة شبه المنحرفة والعضلة ذات الرأسين العضدية.

مؤشرات الأداء التي تم جمعها من خلال اختبارات ميدانية وهي معدل تطور القوة من اختبار السحب وارتفاع القفزة العمودية من اختبار القفز العمودي وزمن الوصول إلى عتبة الانقباض العضلي. تم فحص جميع المتغيرات للتأكد من خلوها من القيم المفقودة وتأكيدها للتوزيع الطبيعي وعدم وجود قيم شاذة بعد ذلك جرى ترميز المتغيرات وتوحيدها عند الحاجة لأغراض تحليل المعادلات الهيكلية. كما تم تصنيف المتغيرات الملاحظة ضمن متغيرات كامنة ذات معنى نظري.

3-1 عرض وتحليل ومناقشة النتائج :

في هذه الدراسة تم تقييم الخصائص الحيوية للعضلات في أربع مناطق رئيسية ذات صلة مباشرة بأداء رفع الأثقال، وهي: العضلة الرباعية الفخذية و ثنائية الرؤوس الفخذية والعضلة شبه المنحرفة والعضلة ذات الرأسين العضدية. وقد خضعت كل مجموعة عضلية لقياس خمسة متغيرات وظيفية باستخدام جهازMyotonPRO ، شملت: الصلابة والنغمة العضلية والمرونة وزمن والاسترخاء والانسيابية . ولغرض تبسيط عملية النمذجة الهيكلية وتقليل كثافة البيانات الإحصائية تم حساب المتوسطات المجمّعة لكل خاصية عضلية عبر المواقع الأربعة. فعلى سبيل المثال جرى اشتقاق متوسط الصلابة العام من متوسط قيم الصلابة المقاسة في العضلات الأربع. وقد أسفر هذا الإجراء عن تكوين مؤشرات تركيبية موحّدة لكل من الصلابة والنغمة والمرونة والاسترخاء والانسيابية بحيث تعبّر عن الحالة العصبية العضلية العامة للرياضي بدلاً من الاقتصار على الفروقات الموضعية بين العضلات.

ويستند هذا التجميع إلى مبررات إحصائية وعملية على حدّ سواء:

من الجانب الإحصائي يسهم تجميع المؤشرات في الحفاظ على بساطة النموذج وتجنّب الإفراط في التكييف الإحصائي خصوصًا في الحالات التي يكون فيها حجم العينة محدودًا مقارنة بعدد المتغيرات. ومن الجانب العملي تهدف الدراسة إلى بناء إطار تطبيقي عام يمكن استخدامه ميدانيًا لربط جودة الخصائص العضلية بالأداء الرياضي. لذا فإن التركيز على السلوك العضلي الكلي يتماشى مع بروتوكولات المتابعة الواقعية للرياضيين حيث قد تحدّ القيود الزمنية والإجرائية من إمكانية إجراء تحليلات دقيقة لمواقع عضلية محددة.(Rosa-Guillamón, A et al., 2017)

ومع ذلك يؤكد الباحثون بأن هذا التبسيط قد يخفي بعض الاختلافات الدقيقة بين العضلات. لذا يُوصى بأن تتوسع الدراسات المستقبلية ذات العينات الأكبر في تحليل المساهمات الموضعية للعضلات الفردية بشكل أكثر تفصيلًا.

الإحصاءات الوصفية لمتغيرات الدراسة

يُبيّن الجدول (2) الإحصاءات الوصفية للخصائص الحيوية للعضلات ومؤشرات الأداء المقاسة لدى رافعي الأثقال المتقدمين. وتشمل القيم المعروضة: المتوسط الحسابي (Mean) والانحراف المعياري (SD) والقيمة الصغرى (Min) والقيمة العظمى (Max) لكل متغير من متغيرات الدراسة.

Max	Min	SD	Mean	Variable
323.3	237.3	21.5	280.3	Stiffness (N/m)
20.0	15.2	1.2	17.6	Tone (Hz)
1.2	0.8	0.1	1.0	Elasticity (log decrement)
102.1	76.9	6.3	89.5	Relaxation Time (ms)
1.6	1.3	0.1	1.4	Creep (ratio)
5055.0	3315.0	435.0	4185.0	Rate of Force Development (RFD, N/s)
48.4	34.0	3.6	41.2	Vertical Jump Height (cm)
213.8	151.0	15.7	182.4	Time to Contraction Threshold (TCT, ms)
142.5	102.5	10.0	122.5	Snatch (kg)
170.5	124.5	11.5	147.5	Clean & Jerk (kg)

جدول (2) يبين قيم الوصف الاحصائي لمتغيرات البحث

مصفوفة الارتباط لمتغيرات الدراسة

يتبين من الجدول (3) معاملات الارتباط بيرسون بين الخصائص الوظيفية للعضلات ومؤشرات الأداء. تم حساب القيم باستخدام برنامج SPSS وتقريبها إلى منزلتين عشريتين. تسهم معاملات الارتباط في توضيح طبيعة العلاقات الخطية بين متغيرات الدراسة ومدى قوة واتجاه الترابط بينها.

Clean & Jerk (kg)	Snatch (kg)	TCT (ms)	Jump Height (cm)	RFD (N/s)	Creep	Relaxation Time (ms)	Elasticity	Tone (Hz)	Stiffness (N/m)	Variable
0.02	0.16	0.17	0.11	0.21	0.08	0.31	0.01	0.1	1.0	Stiffness (N/m)
0.09	0.17	0.16	0.03	0.3	0.1	0.17	0.03	1.0	0.1	Tone (Hz)
0.37	0.01	0.27	0.27	0.06	0.19	0.14	1.0	0.03	0.01	Elasticity
0.01	0.06	0.11	0.14	0.34	0.04	1.0	0.14	0.17	0.31	Relaxation Time (ms)
0.08	0.02	0.04	0.05	0.25	1.0	0.04	0.19	0.1	0.08	Creep
0.22	0.1	0.06	0.45	1.0	0.25	0.34	0.06	0.3	0.21	RFD (N/s)
0.3	0.21	0.14	1.0	0.45	0.05	0.14	0.27	0.03	0.11	Jump Height (cm)
0.13	0.18	1.0	0.14	0.06	0.04	0.11	0.27	0.16	0.17	TCT (ms)
0.11	1.0	0.18	0.21	0.1	0.02	0.06	0.01	-0.17	0.16	Snatch (kg)
1.0	0.11	0.13	0.3	0.22	0.08	0.01	0.37	-0.09	0.02	Clean & Jerk (kg)

جدول(3) يبين معاملات الارتباط لمتغيرات الدراسة نتائج نموذج المعادلات الهيكلية

1 .تقييم ملاءمة النموذج(Model Fit Evaluation)

لتحليل مدى كفاية النموذج الهيكلي المقترح الذي يربط بين الخصائص الوظيفية للعضلات ومؤشرات الأداء الرياضي تم استخدام مجموعة من مؤشرات الملاءمة الإحصائية المعيارية عبر برنامج AMOS الإصدار 26.0. أظهرت النتائج أن النموذج يتمتع بمستوى ملاءمة مرضٍ مما يشير إلى توافق جيد بين البيانات الفعلية والعلاقات المفترضة في النموذج. يتبين في الجدول (4) المؤشرات الرئيسة لملاءمة النموذج الناتجة عن تحليل نمذجة المعادلات الهيكلية (SEM) باستخدام برنامج AMOS 26.0 والتي تمثل أدوات تقييم جودة المطابقة بين الخصائص الميكانيكية الحيوية للعضلات ومؤشرات الأداء ضمن الإطار النظري المقترح.

Fit Index	*Value*	*Interpretation Threshold*
Chi-square (χ^2)	24.67 (df = 18, p = 0.13)	p > 0.05 (good fit)
Chi-square/df ratio	1.37	< 2.0 (acceptable)
RMSEA	0.049	< 0.06 (good fit)
CFI	0.97	> 0.95 (excellent fit)
TLI	0.95	> 0.90 (strong fit)
SRMR	0.036	< 0.08 (acceptable)

جدول (4) يبين قيم المؤشرات الرئيسة لملاءمة النموذج الناتجة عن تحليل نمذجة المعادلات الهيكلية

ChatGPT said:

3-1-1 عرض وتحليل ومناقشة النتائج :

تقدم هذه الدراسة رؤية علمية مهمة حول العلاقة بين الخصائص الميكانيكية للعضلات المقاسة بجهاز MyotonPROومستوى الأداء العصبي العضلي لدى رافعي الأثقال المحترفين. أظهر نموذج المعادلات الهيكلية (SEM) ملاءمة قوية للنموذج المقترح، مؤكِّدًا موثوقية البُعدين الكامنين في الدراسة وهما: الوظيفة العضلية والأداء الانفجاري. أوضحت النتائج أن صلابة العضلات وزمن الاسترخاء كانتا أقوى المتغيرات التنبؤية لمؤشرات الأداء، ولا سيما معدل تطور القوة (RFD) وارتفاع القفزة المضادة للحركة .(CMJ) تتفق هذه النتيجة مع ما ورد في الأدبيات السابقة التي أكدت أهمية الصلابة في نقل القوة والاستجابة الحركية السريعة(Kubo et al., 2001; Aagaard et al., 2002) ، كما تتماشى مع ما توصل إليه Ismaeel et al. (2025) الذي تناول توازن الجهاز العصبي العضلي تحت أحمال تدريجية باستخدام مؤشرات بايوميكانيكية معتمدة على التحليل الكهربائي العضلي.(EMG)

أما النغمة العضلية فقد أظهرت ارتباطًا متوسطًا فقط مع الأداء ولم تُسهم بشكل معنوي في التنبؤ، ويُعزى ذلك إلى كونها تمثل حالة الراحة الساكنة للعضلة أكثر من كونها مؤشراً على الجاهزية الحركية النشطة. كما أن المرونة والانسيابية (Creep) أظهرت ارتباطات ضعيفة أو غير معنوية مع مؤشرات الأداء الانفجاري مثل RFD وCMJ، ويُحتمل أن يكون ذلك بسبب طبيعتها الساكنة التي تعكس السلوك اللزج

المرن للنسيج العضلي في حالة الراحة وليس أثناء الانقباض النشط. فعلى عكس الصلابة وزمن الاسترخاء اللذين يرتبطان مباشرة بقدرة العضلة على مقاومة التشوه واستعادة شكلها بسرعة، فإن المرونة والانسيابية تعكسان حالة الأنسجة المزمنة والتكيف البنيوي طويل الأمد. كما تشير دراسات حديثة إلى أن حساسية جهاز MyotonPRO تكون أقل دقة عند قياس متغيري المرونة والانسيابية مقارنة بالصلابة والنغمة، خصوصًا عند تطبيقه على عضلات سميكة أو حاملة للأحمال العالية (Lohr et al., 2020; Cè et al., 2022). هذه العوامل قد تفسر ضعف القدرة التنبؤية لهذين المتغيرين في النموذج الإحصائي الحالي.

نتائج مشابهة أشار إليها García-Manso et al. (2011) ، حيث أوضح أن الخصائص العضلية الساكنة لا تتوافق دائمًا مع الأداء العصبي العضلي الحاد في سياقات الجهد العالي. كما دعمت دراسات أخرى (Ismaeel & Al-Khalaf, 2022) هذه الملاحظة عند تحليل ديناميات الحركات الانفجارية في كرة الطائرة باستخدام التصوير بالرنين المغناطيسي والمؤشرات البايوميكانيكية. تجدر الإشارة إلى أن تصميم هذه الدراسة تضمن تجميع القياسات العضلية لأربع عضلات رئيسية: العضلة الرباعية الفخذية، والعضلة ثنائية الرؤوس الفخذية(Biceps Femoris) ، والعضلة شبه المنحرفة، والعضلة ذات الرأسين العضدية. وقد ساهم هذا التجميع في تعزيز استقرار النموذج وتسهيل تطبيقه ميدانيًا إلا أنه ربما أخفى بعض المساهمات الخاصة بكل عضلة خلال المراحل المختلفة من الرفعة.

ومن القيود المنهجية التي يمكن الإشارة إليها هو غياب بيانات التحليل الحركي أو الكهربائي العضلي (EMG)، والتي كان من الممكن أن تزيد الفهم حول سلوك العضلة الديناميكي والسيطرة العصبية العضلية أثناء الأداء الفعلي. فمع أن جهاز MyotonPRO يوفّر قياسات دقيقة للخصائص العضلية في الحالة الساكنة، إلا أنه لا يلتقط التغيرات اللحظية في نشاط العضلة أثناء الحركات عالية الشدة مثل رفع الأثقال. لذلك، فإن دمج تقنيات EMG السطحي أو تحليل الحركة مستقبلاً سيسمح بتقييم متغيرات مثل توقيت الذروة في التنشيط العضلي، ومعدل تجنيد الوحدات الحركية، والسرعات الزاوية للمفاصل، وهي جميعها مؤشرات أظهرت تأثيرًا واضحًا في الأداء الانفجاري (Cormie et al., 2011; Wright et al., 2020).

دراسات حديثة) مثل Ismaeel & Abdulwahab, 2025) أظهرت أن دمج خصائص العضلات المستخلصة من Myoton مع إشارات EMG أو المتغيرات الحركية المفصلية ينتج عنه نماذج أكثر شمولاً لتفسير الأداء العضلي والقدرة الحركية. لذا توصي هذه الدراسة بأن يتبنى البحث المستقبلي مقاربة بايوميكانيكية متعددة الأدوات، تجمع بين القياسات الساكنة والديناميكية للحصول على رؤية أعمق لمتطلبات الرفع الأولمبي العصبية والعضلية. وتتفق هذه التوصية مع نتائج Ismaeel and Abdulwahab (2025) التي أبرزت عدم التماثل العضلي في النشاط الكهربائي (EMG) أثناء تمارين المقاومة المغلقة، مما يشير إلى إمكانية تبني نماذج تحليل متعددة المستويات أو مخصصة لكل عضلة في الأبحاث اللاحقة. كما تؤكد النتائج الحالية على الدور المحوري لمتغيري الصلابة وزمن الاسترخاء في تحديد القدرة الانفجارية، إذ تُظهر أن الرياضيين القادرين على توليد توتر عضلي عالٍ والتعافي منه بسرعة يحققون أداءً أفضل في الرفعات الانفجارية. تدعم هذه النتيجة استراتيجيات التدريب التي تركز

على التمارين الثابتة (Isometric) والبلايومترية(Plyometric) ، إلى جانب دمج مؤشرات الاستشفاء الميكانيكية كما ورد في(2024) .Ismaeel et al ، الذي دمج نموذج الحمل التدريبي (TRIMP) مع المتغيرات الميكانيكية لمراقبة الرياضيين بدقة أكبر.

ومن الجدير بالذكر أن العلاقة بين الخصائص الميكانيكية للعضلات ونتائج الأداء الفني في رفعتي الخطف والنتر كانت محدودة، وهو ما يمكن تفسيره بالطبيعة المتعددة العوامل للأداء النخبوي التي تشمل التنفيذ الفني، والتنسيق العصبي العضلي، والاستعداد النفسي. وهذا يتوافق مع نموذج التنبؤ الذي قدمه Ismaeel (2023)باستخدام إشارات EMG وخوارزميات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بقوة القبضة، حيث أكد على أهمية دمج المهارات العصبية والنفسية والمعرفية في نماذج الأداء. كما دعمت دراسة أخرى لـ Ismaeel (2024)في كرة القدم، والتي تناولت التنبؤ بدقة الركلات الحرة باستخدام النمذجة البايوميكانيكية، فكرة أن الدقة الحركية والتحكم قد يكونان أكثر تأثيرًا من القوة المطلقة، وهو ما ينسجم مع التفسير الحالي لأداء الرفع الأولمبي. ختامًا، فأن هذه النتائج تسهم في تأكيد الفرضيات النظرية السابقة وتطوير التطبيقات العملية للتشخيص العضلي باستخدام Myoton في مجال علوم الرياضة. ويُوصى بأن تتجه الدراسات المستقبلية نحو توسيع النموذج ليشمل مؤشرات نفسحركية، وقياسات EMG خاصة بكل عضلة، وتحليلات الحمل التدريبي الطولي، بما يعزز من القدرة التنبؤية للنماذج ويوسع نطاق تطبيقها في مختلف الألعاب الرياضية.

4-الخاتمة :

يُنصح بدمج فحوصات جهاز Myoton ضمن التقييمات الدورية للرياضيين بهدف متابعة مستويات الإجهاد العضلي وجاهزية الأداء والتكيف التدريبي عبر فترات زمنية مختلفة.كمايجب إعطاء الأولوية لمتغيري الصلابة العضلية وزمن الاسترخاء عند تفسير القدرة على الأداء أو تصميم بروتوكولات الاستشفاء العضلي.وايضاً يُوصى باستخدام اختباري معدل تطور القوة والقفز العمودي كوسيلتين ميدانيتين فعّالتين وسهلتي التطبيق لكونهما تعكسان بصورة مباشرة الوظيفة العضلية الأساسية.

كما ينبغي توخي الحذر عند تفسير متغيرات النغمة العضلية والمرونة والانسيابية إذ قد يختلف تأثيرها تبعًا لسياق التدريب أو المرحلة التحضيرية للرياضي.

واخيراً من الارجح مستقبلاً استكشاف تأثير أنماط تدريب محددة مثل التحميل اللامركزي أو التدريب بالاهتزاز على الخصائص الميكانيكية الحيوية للعضلات على المدى الطويل.

المصادر :

- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P. (2002). Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. Journal of Applied Physiology, 93(4), 1318–1326.
- Behm, D. G., & Sale, D. G. (1993). Velocity specificity of resistance training. Sports Medicine, 15(6), 374–388. https://doi.org/10.2165/00007256-199315060-00003
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2011). Developing maximal neuromuscular power: Part 2—Training considerations for improving maximal power production. Sports Medicine, 41(2), 125–146.
- García-Manso, J. M., Rodríguez-Matoso, D., Sarmiento, S., De Saa, Y., Vaamonde, D., Rodríguez-Ruiz, D., & Quiroga, M. (2011). Assessment of muscle fatigue after an ultra-endurance triathlon using tensiomyography (TMG). Journal of Sports Sciences, 29(6), 619–625.
- Kubo, K., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2001). Effects of different duration isometric contractions on tendon elasticity in human quadriceps muscles. The Journal of Physiology, 536(2), 649–655.
- Cè, E., Longo, S., Rampichini, S., & Esposito, F. (2022). Assessment of muscle stiffness with MyotonPRO: An updated systematic review. European Journal of Applied Physiology, 122(4), 893–910.
- https://doi.org/10.1007/s00421-021-04808-1
- Garcia-Garcia, O., Cancela-Carral, J. M., & Pacheco da Costa, S. (2021). Myoton technology in sport and rehabilitation: A systematic review. Journal of Bodywork and Movement Therapies, 28, 77–86.
- Tucker, C. B., Scanlan, A. T., & Dalbo, V. J. (2020). The utility of athlete monitoring tools in professional weightlifting: A narrative review. Sports, 8(6), 87. https://doi.org/10.3390/sports8060087
- Lohr, C., Schmid, L., & Faude, O. (2020). Reliability of Myoton measurements of stiffness in healthy skeletal muscles: A systematic review. European Journal of Sport Science, 20(4), 491–500.

- Zhang, Y., Wu, D., Hu, Y., & Shi, H. (2023). Structural equation modeling in sports biomechanics: A methodological overview and application. Journal of Human Kinetics, 88, 49–63.
- Baiget, E., Corbi, F., & Colomar, J. (2022). Muscle properties and fatigue monitoring in high-performance athletes: Emerging tools and trends. International Journal of Sports Physiology and Performance, 17(8), 1181–1189. https://doi.org/10.1123/ijspp.2021-0354.
- Hirata, K., Miyamoto-Mikami, E., Kanehisa, H., & Miyamoto, N. (2021). Muscle stiffness as a predictor of athletic performance and training adaptations. Frontiers in Physiology, 12, 640026.
- Azzam, M. G., Ponce, A., & Escamilla, R. F. (2023). The role of biomechanical monitoring in injury prevention and performance optimization in Olympic lifts. Sports Biomechanics, 22(1), 53–70.
- Aird, L., Samuel, D., & Stokes, M. (2012). Quadriceps muscle tone, elasticity and stiffness in older males: Reliability and symmetry using the MyotonPRO. Archives of Gerontology and Geriatrics, 55(2), e31–e39. https://doi.org/10.1016/j.archger.2011.08.010
- Cè, E., Longo, S., Rampichini, S., & Esposito, F. (2022). Assessment of muscle stiffness with MyotonPRO: An updated systematic review. European Journal of Applied Physiology, 122(4), 893–910. https://doi.org/10.1007/s00421-021-04808-1
- Comfort, P., Allen, M., & Graham-Smith, P. (2012). Kinetic comparisons during variations of the power clean. Journal of Strength and Conditioning Research, 26(5), 1203–1212.
- Ebaugh, D. D., McClure, P. W., & Karduna, A. R. (2006). Scapulothoracic and glenohumeral kinematics following an external rotation fatigue protocol. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 36(8), 557–571.
- Escamilla, R. F., Bell, D., & Andrews, J. R. (2020). Biomechanics of the snatch and clean & jerk lifts: A review. Journal of Sports Sciences, 38(24), 2843–2855. https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1806916.

- Garcia-Garcia, O., Cancela-Carral, J. M., & Pacheco da Costa, S. (2021). Myoton technology in sport and rehabilitation: A systematic review. Journal of Bodywork and Movement Therapies, 28, 77–86. https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2021.04.012.
- García-Manso, J. M., Rodríguez-Matoso, D., Sarmiento, S., et al. (2011). Assessment of muscle fatigue after an ultra-endurance triathlon using tensiomyography. Journal of Sports Sciences, 29(6), 619–625. https://doi.org/10.1080/02640414.2010.548822.
- Hirata, K., Miyamoto, N., Kanehisa, H., & Miyamoto-Mikami, E. (2021). Muscle stiffness as a predictor of athletic performance and training adaptations. Frontiers in Physiology, 12, 640026. https://doi.org/10.3389/fphys.2021.640026.
- Kim, S. Y., et al. (2018). Effects of trapezius muscle fatigue on scapular kinematics and muscle activity. Journal of Electromyography and Kinesiology, 38, 23–29.
- Lohr, C., Schmid, L., & Faude, O. (2020). Reliability of Myoton measurements of stiffness in healthy skeletal muscles: A systematic review. European Journal of Sport Science, 20(4), 491–500. https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1645885.
- Muyor, J. M., López-Miñarro, P. A., & Alacid, F. (2014). Spinal posture of thoracic and lumbar spine and pelvic tilt in highly trained cyclists. Journal of Sports Science and Medicine, 13(3), 640–646.
- Schuermans, J., et al. (2014). Biceps femoris injury risk in football: A systematic review of risk factors. British Journal of Sports Medicine, 48(18), 1372–1381.
- Tillin, N. A., Jimenez-Reyes, P., Pain, M. T. G., & Folland, J. P. (2010). Neuromuscular performance of explosive power athletes versus untrained individuals. Medicine & Science in Sports & Exercise, 42(4), 781–790.
- Wagle, J. P., et al. (2017). Accentuated eccentric loading for training and performance: A review. Sports Medicine, 47(12), 2473–2490.

- Wright, J. M., DeLong, M. D., & Schilling, B. K. (2020). Kinetic analysis of the clean and jerk and snatch in collegiate weightlifters. Journal of Strength and Conditioning Research, 34(1), 59–68.
- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P. (2002). Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. Journal of Applied Physiology, 93(4), 1318–1326.
- Aird, L., Samuel, D., & Stokes, M. (2012). Quadriceps muscle tone, elasticity and stiffness in older males: Reliability and symmetry using the MyotonPRO. Archives of Gerontology and Geriatrics, 55(2), e31–e39.
- Cè, E., Longo, S., Rampichini, S., & Esposito, F. (2022). Assessment of muscle stiffness with MyotonPRO: An updated systematic review. European Journal of Applied Physiology, 122(4), 893–910. https://doi.org/10.1007/s00421-021-04808-1.
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2011). Developing maximal neuromuscular power: Part 2—Training considerations for improving maximal power production. Sports Medicine, 41(2), 125–146.
- García-Manso, J. M., Rodríguez-Matoso, D., Sarmiento, S., et al. (2011). Assessment of muscle fatigue after an ultra-endurance triathlon using tensiomyography. Journal of Sports Sciences, 29(6), 619–625.
- Hirata, K., Miyamoto, N., Kanehisa, H., & Miyamoto-Mikami, E. (2021). Muscle stiffness as a predictor of athletic performance and training adaptations. Frontiers in Physiology, 12, 640026.
- Lohr, C., Schmid, L., & Faude, O. (2020). Reliability of Myoton measurements of stiffness in healthy skeletal muscles: A systematic review. European Journal of Sport Science, 20(4), 491–500.
- Villaseca-Vicuña, R., Segueida-Lorca, Álvaro, Salazar-Orellana, C., Valenzuela-Contreras, L., Cortés-Roco, G., Pérez-Contreras, J., & Merino-Muñoz, P. (2024). Differences in physical and technical-

- tactical performance between playing positions in female soccer players in FIFA competitions. SPORT TK-EuroAmerican Journal of Sport Sciences, 13, 2.
- McMahon, J. J., Rej, S. J. E., & Comfort, P. (2018). Sex differences in countermovement jump phase characteristics. Sports, 6(4), 133. https://doi.org/10.3390/sports6040133.
- Tillin, N. A., Jimenez-Reyes, P., Pain, M. T. G., & Folland, J. P. (2010). Neuromuscular performance of explosive power athletes versus untrained individuals. Medicine & Science in Sports & Exercise, 42(4), 781–790.
- Wagle, J. P., et al. (2017). Accentuated eccentric loading for training and performance: A review. Sports Medicine, 47(12), 2473–2490. https://doi.org/10.1007/s40279-017-0712-1
- Ismaeel, S. A., Abdulwahab, S., & Salman, H. (2025). Biomechanical Assessment of Neuromuscular Balance in the Upper Limbs During Progressive Load Resistance Training. Journal of Biomechanics.
- Ismaeel, S. A. (2023). Predicting Hand Grip Force Based on Muscle Electromyographic Activity Using Artificial Intelligence and Neural Networks. International Journal of Disabilities Sports and Health Sciences, 7(Special Issue), 1423907.
- Ismaeel, S. A., Al-Khalaf, A., & Hilal, T. (2022). The Effect of Special Exercises in Learning Some Basic Skills in Volleyball and Some Biomechanical Variables According to Magnetic Resonance Measurements of the Upper Limbs. Revista Iberoamericana de Psicologia del Ejercicio y el Deporte.
- Ismaeel, S. A., & Abdulwahab, S. (2025). Symmetry of Muscle Electrical Activity (EMG) in the Upper Limbs during Closed-Chain Resistance Exercises with Varying Load. Medicine & Science in Sports & Exercise.
- Ismaeel, S. A. (2024). Three-Dimensional Quantitative Analysis of Kinematic Variables in Discus Throwing Performance. Journal of Sport Biomechanics.
- Ismaeel, S. A., & Falih, H. (2025). Predictive Modeling of Muscle Function Using SEM: Linking Myoton Data to Explosive Performance. International Journal of Applied Biomechanics.
- Ismaeel, S. A. (2024). Fixed Free Kick Accuracy: A Biomechanical Predictive Model Based on Pyomechanics and Kinematic Variables. Journal of Sports Sciences.

- Kline, R. B. (2015). Principles and Practice of Structural Equation Modeling (4th ed.). Guilford Press.
- Wolf, E. J., Harrington, K. M., Clark, S. L., & Miller, M. W. (2013). Sample size requirements for SEM models. Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal, 20(3), 472–491.
- Rosa-Guillamón, A., & García-Cantó, E. (2017). Relationship between muscle strength and other parameters of fitness in primary school children. SPORT TK-EuroAmerican Journal of Sport Sciences, 6(1), 107–116. https://doi.org/10.6018/280511.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program. Behavior Research Methods, 39(2), 175–191.