



**Akademia Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego  
w Warszawie**

**Karol Jaskulski**

**Zintegrowane podejście diagnostyczne i treningowe w prewencji  
urazów narządu ruchu u sportowców**

**Promotor rozprawy doktorskiej**

**dr hab. Ida Wiszomirska prof. AWF**

**Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej**

**dr Patrycja Adamska**

Rozprawa doktorska

w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu

*w dyscyplinie nauki o kulturze fizycznej*

Warszawa, Grudzień 2025

## Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

1. Świadom/a odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca doktorska na temat:

.....

### Zintegrowane podejście diagnostyczne i treningowe w prewencji urazów narządu ruchu u sportowców

.....

została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

2. Oświadczam, że praca doktorska nie narusza praw autorskich na podstawie ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. 2019 poz. 1231 z późn. zm.) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym.

3. Oświadczam ponadto, że treść pracy przekazanej na zewnętrznym nośniku elektronicznym jest identyczna z wersją przyjętą przez promotora i dostarczoną w formie papierowej.

4. Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia doktora.

#### Ponczenie:

Zgodnie z art. 193 ust. 5 ustawy z dnia 18 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 1668 z późn. zm.) w przypadku niedopuszczenia do obrony rozprawy doktorskiej albo wydania decyzji o odmowie nadania stopnia doktora, ta sama rozprawa nie może być podstawą do ponownego ubiegania się o nadanie stopnia doktora

04.11.2025

Data

  
podpis autora pracy

04.11.2025

Data

  
podpis promotora pracy przyjmującego oświadczenie

# Wykaz publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej

Wykaz czterech spośród jedenastu opublikowanych prac, które stanowią podstawę w ubieganiu się o stopień doktora nauk o kulturze fizycznej, opublikowanych po uzyskaniu stopnia magistra, objętych wspólnym tytułem:

## „Zintegrowane podejście diagnostyczne i treningowe w prewencji urazów narządu ruchu u sportowców”.

W trzech, monotematycznych pracach cyklu doktorant jest pierwszym autorem, z decydującym wkładem, na każdym etapie powstawania i pisania pracy (tworzenie koncepcji, przeprowadzenie badań, analiza wyników, pisanie artykułu). W jednej pracy z zakresu tej samej tematyki doktorant jest drugim autorem.

1. **Jaskulski, K.**, & Starczewski, M.– opublikowany zał.1 (2024). **A Systematic Review Evaluating Diagnosis Methods and Treatment Protocols for Achilles Tendinopathy.** *Acta Kinesiologica*, (N3 2024), 17–26.  
<https://doi.org/10.51371/issn.1840-2976.2024.18.3.03>  
Impact Factor: 1.600 Punktacja MNiSW: 140.000
2. Kapinski, N., **Jaskulski, K.**, Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczanski, B., Zdrodowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starczewski, M.– opublikowany zał.2 (2024). **Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach.** *Sports Medicine - Open*, 10(1).  
<https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>  
Impact Factor: 5.900 Punktacja MNiSW: 20.000
3. **Jaskulski, K.**, Bobowik, P., Wysoczański, B., & Starczewski, M opublikowany – zał.3 (2024). **8-week additional sensomotoric warm-up drills improves motor performance and postural stability in high-performance female Rugby-7 players.** *Acta Kinesiologica*, 18(N4 2024), 72–78.  
<https://doi.org/10.51371/issn.1840-2976.2024.18.4.9>  
Impact Factor: 1.600 Punktacja MNiSW: 140.000

4. **Jaskulski, K.**, Bobowik, P., Wysoczański, B., Predkelienė a & Starczewski, M. opublikowany – zał.4 (2025). **Knee Armor Training Program: An 8-Week Sensorimotor Approach to Reducing Knee Injury Risk in Women’s Rugby** *Journal of Clinical Medicine*, 14(11) 2025.  
<https://doi.org/10.3390/jcm14113779>

Impact Factor: 2.900 Punktacja MNiSW: 140.000

**Bibliometryczne podsumowanie jednotematycznego cyklu czterech prac naukowych:**

**IF = 12.000, MNiSW/MEiN = 440**

**Wykaz publikacji w cyklu wraz z wniesionym wkładem  
współautorów**

Warszawa, 24.10.2025

Miejscowość, data

mgr Karol Jaskulski

### Oświadczenie autora publikacji<sup>1</sup>

Oświadczam, iż mój udział w przygotowaniu publikacji:

Jaskulski, K., & Starczewski, M.– opublikowany zał. 1 (2024). a Systematic Review Evaluating Diagnosis Methods and Treatment Protocols for Achilles Tendinopathy. *Acta Kinesiologica*, (N3 2024), 17–26. <https://doi.org/10.51371/issn.1840-2976.2024.18.3.03>

Impact Factor: 1.600 Punktacja MNiSW: 140.000

Wchodzącej w skład mojej rozprawy doktorskiej polegał na <sup>2,3</sup>:  
opracowaniu koncepcji badań, zebraniu materiału badawczego, przeglądu literatury,  
gromadzenie danych, pomocy w wykonywaniu analiz statystycznych, napisania maszynopisu  
pracy i odpowiedzi na recenzje pracy,  
co określam jako 70% udziału w przygotowaniu wyżej wymienionej publikacji.  
Ponadto udział współautora/-ki<sup>4</sup>:

Michał Starczewski określam jako 30% w zakresie: przeglądu literatury i opisu wniosków,  
zebranie materiału badawczego.

.....*K. Jaskulski*..... Podpis  
autora rozprawy doktorskiej (czytelny)

*Starczewski*  
.....

Podpis promotora  
(czytelny)

<sup>1</sup> Do oświadczenia dołącza się oświadczenia wszystkich współautorów.

<sup>2</sup> W co najmniej trzech pracach monotematycznego cyklu doktorant musi być pierwszym autorem, z jego decydującym wkładem na każdym etapie powstawania i pisania prac (tworzenie koncepcji, przeprowadzenie badań, analiza wyników oraz pisanie artykułu).

<sup>3</sup> W przypadku każdej z włączonych do cyklu prac wymaga się złożenie oświadczenia przez autora wskazujące na jego merytoryczny oraz procentowy wkład w powstanie pracy [np. twórca hipotezy badawczej, pomysłodawca badań, wykonanie specyficznych badań (np. przeprowadzenie konkretnych doświadczeń, opracowanie i zebranie danych, wykonanie zestawień statystycznych itp.), wykonanie analizy wyników, przygotowanie manuskryptu artykułu, i inne]. Określenie wkładu autora powinno być na tyle precyzyjne, aby umożliwić dokładną ocenę jego udziału i roli w powstaniu każdej z prac.

<sup>4</sup> Dodać zapis udziału % i rodzaj wniesionego wkładu wszystkich współautorów na podstawie własnych oświadczeń współautorów.

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr Michał Starczewski

### **Oświadczenie współautora publikacji**

Jako współautor pracy pt. Jaskulski, K., & Starczewski, M.– opublikowany zał. 1 (2024). a Systematic Review Evaluating Diagnosis Methods and Treatment Protocols for Achilles Tendinopathy. *Acta Kinesiologica*, (N3 2024), 17–26. <https://doi.org/10.51371/issn.1840-2976.2024.18.3.03>

Impact Factor: 1.600 Punktacja MNiSW: 140.000

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Przeгляд literatury i opis wniosków, zebranie materiału badawczego.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 30%

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.



/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa, 24.10.2025

Miejscowość, data

mgr Karol Jaskulski

### Oświadczenie autora publikacji<sup>1</sup>

Oświadczam, iż mój udział w przygotowaniu publikacji:

Kapinski, N., Jaskulski, K., Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczanski, B., Zdrodowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starczewski, M.– opublikowany zał.2 (2024). Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach. *Sports Medicine - Open*, 10(1).

<https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>

Impact Factor: 5.900 Punktacja MNiSW: 20.000

Wchodzącej w skład mojej rozprawy doktorskiej polegał na <sup>2,3</sup>:

Zbieraniu danych, interpretacji, przeglądzie literatury, pisanie manuskryptu co określam jako 40.0% udziału w przygotowaniu wyżej wymienionej publikacji.

Ponadto udział współautora/-ki<sup>4</sup>:

Norbert Kapiński określam jako 17.0% w zakresie: Projekt badania, zbieranie danych, interpretacja, przegląd literatury, pisanie i redakcja manuskryptu.

Michał Starczewski określam jako 5.0% w zakresie: Projekt badania, zbieranie danych, interpretacja, przegląd literatury, pisanie manuskryptu.

Justyna Witkowska określam jako 8.0% w zakresie: Analiza danych, statystyka, przegląd literatury, pisanie i redakcja manuskryptu.

Adam Kozłowski określam jako 5.0% w zakresie: Analiza danych, eksperymenty ML, pisanie manuskryptu.

Paweł Adamczyk określam jako 5.0% w zakresie: Interpretacja danych, przegląd literatury.

Bartosz Wysoczański określam jako 5.0% w zakresie: Zbieranie danych, interpretacja, przegląd literatury.

Agnieszka Zdrodowska określam jako 5.0% w zakresie: Zbieranie danych, interpretacja, przegląd literatury.

Adam Niemaszuk określam jako 5.0% w zakresie: Zbieranie danych, interpretacja, przegląd literatury.

Beata Ciszowska-Lyson określam jako 5.0% w zakresie: Interpretacja danych, przegląd literatury.

.....  


Podpis autora rozprawy doktorskiej (czytelny)

.....  


Podpis promotora (czytelny)

---

<sup>1</sup> Do oświadczenia dołącza się oświadczenia wszystkich współautorów.

<sup>2</sup> W co najmniej trzech pracach monotematycznego cyklu doktorant musi być pierwszym autorem, z jego decydującym wkładem na każdym etapie powstawania i pisania prac (tworzenie koncepcji, przeprowadzenie badań, analiza wyników oraz pisanie artykułu).

<sup>3</sup> W przypadku każdej z włączonych do cyklu prac wymaga się złożenie oświadczenia przez autora wskazujące na jego merytoryczny oraz procentowy wkład w powstanie pracy [np. twórca hipotezy badawczej, pomysłodawca badań, wykonanie specyficznych badań (np. przeprowadzenie konkretnych doświadczeń, opracowanie i zebranie danych, wykonanie zestawień statystycznych itp.), wykonanie analizy wyników, przygotowanie manuskryptu artykułu, i inne]. Określenie wkładu autora powinno być na tyle precyzyjne, aby umożliwić dokładną ocenę jego udziału i roli w powstaniu każdej z prac.

<sup>4</sup> Dodać zapis udziału % i rodzaj wniesionego wkładu wszystkich współautorów na podstawie własnych oświadczeń współautorów.

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

*dr Norbert Kapiński*

***Oświadczenie współautora publikacji***

*Jako współautor pracy pt. Kapinski, N., Jaskulski, K., Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczanski, B., Zdrowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starczewski, M.– opublikowany zał.2 (2024). Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach. Sports Medicine - Open, 10(1).  
<https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>  
Impact Factor: 5.900 Punktacja MNiSW: 20.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Projekt badania, zbieranie danych, interpretacja, przegląd literatury, pisanie i redakcja manuskryptu.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 17%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.



.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr Justyna Witkowska

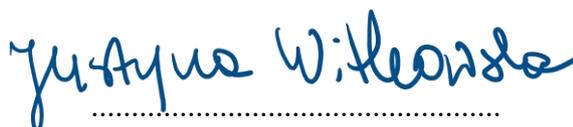
***Oświadczenie współautora publikacji***

*Jako współautor pracy pt. Kapinski, N., Jaskulski, K., Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczanski, B., Zdrowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starczewski, M. – opublikowany zał.2 (2024). Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach. Sports Medicine - Open, 10(1).  
<https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>  
Impact Factor: 5.900 Punktacja MNiSW: 20.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Analiza danych, statystyka, przegląd literatury, pisanie i redakcja manuskryptu.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 8%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.



.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

mgr inż. Adam Kozłowski

***Oświadczenie współautora publikacji***

*Jako współautor pracy pt. Kapinski, N., Jaskulski, K., Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczanski, B., Zdrodowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starzewski, M. – opublikowany zał.2 (2024). Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach. Sports Medicine - Open, 10(1).  
<https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>  
Impact Factor: 5.900 Punktacja MNiSW: 20.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to: Analiza danych, eksperymenty ML, pisanie manuskryptu.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 5%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.



.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej**  
**AWF Warszawa**  
**Przewodniczący**  
**Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr n. med. Paweł Adamczyk

### **Oświadczenie współautora publikacji**

*Jako współautor pracy pt. Kapinski, N., Jaskulski, K., Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczanski, B., Zdrodowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starczewski, M. – opublikowany zał.2 (2024). Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach. Sports Medicine - Open, 10(1).  
<https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>  
Impact Factor: 5.900 Punktacja MNiSW: 20.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Interpretacja danych, przegląd literatury.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 5%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.



.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr Bartosz Wysoczański

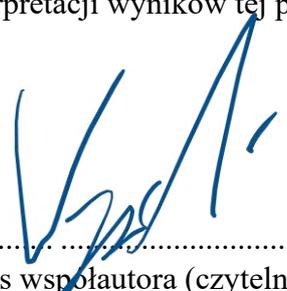
***Oświadczenie współautora publikacji***

*Jako współautor pracy pt. Kapinski, N., Jaskulski, K., Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczański, B., Zdrowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starczewski, M.– opublikowany zał.2 (2024). Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach. Sports Medicine - Open, 10(1).  
<https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>  
Impact Factor: 5.900 Punktacja MNiSW: 20.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Zbieranie danych, interpretacja, przegląd literatury.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 5%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.

  
.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr n. kf. Agnieszka Zdrodowska

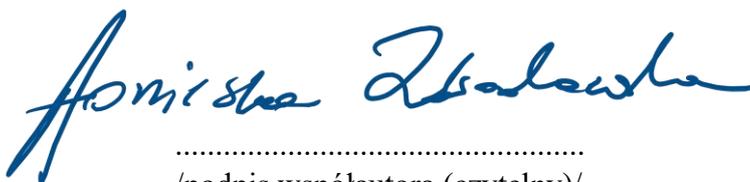
***Oświadczenie współautora publikacji***

*Jako współautor pracy pt. Kapinski, N., Jaskulski, K., Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczanski, B., Zdrodowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starczewski, M.– opublikowany zał.2 (2024). Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach. Sports Medicine - Open, 10(1).  
<https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>  
Impact Factor: 5.900 Punktacja MNiSW: 20.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Zbieranie danych, interpretacja, przegląd literatury.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 5%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.



.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

mgr Adam Niemaszyk

***Oświadczenie współautora publikacji***

*Jako współautor pracy pt. Kapinski, N., Jaskulski, K., Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczanski, B., Zdrowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starczewski, M.– opublikowany zał.2 (2024). Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach. Sports Medicine - Open, 10(1).*

*<https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>*

*Impact Factor: 5.900 Punktacja MNiSW: 20.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Zbieranie danych, interpretacja, przegląd literatury.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 5%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.

  
.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej**  
**AWF Warszawa**  
**Przewodniczący**  
**Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr n. med. Beata Ciszowska-Lyson

### **Oświadczenie współautora publikacji**

*Jako współautor pracy pt. Kapinski, N., Jaskulski, K., Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczanski, B., Zdrodowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starczewski, M.– opublikowany zał.2 (2024). Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach. Sports Medicine - Open, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>  
Impact Factor: 5.900 Punktacja MNiSW: 20.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Interpretacja danych, przegląd literatury.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 5%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.

  
.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr Michał Starczewski

*Oświadczenie współautora publikacji*

*Jako współautor pracy pt. Kapinski, N., Jaskulski, K., Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczanski, B., Zdrodowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starczewski, M. – opublikowany zał.2 (2024). Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach. Sports Medicine - Open, 10(1).*

<https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>

*Impact Factor: 5.900 Punktacja MNiSW: 20.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Projekt badania, zbieranie danych, interpretacja, przegląd literatury, pisanie manuskryptu.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 5%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.



.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa, 24.10.2025

Miejscowość, data

mgr Karol Jaskulski

### Oświadczenie autora publikacji<sup>1</sup>

Oświadczam, iż mój udział w przygotowaniu publikacji:

Jaskulski, K., Bobowik, P., Wysoczański, B., & Starczewski, M  
opublikowany – zał.3 (2024). 8-week additional sensomotoric warm-up drills improves motor  
performance and postural stability in high-performance female Rugby-7 players. *Acta  
Kinesiologica*, 18(N4 2024), 72–78. <https://doi.org/10.51371/issn.1840-2976.2024.18.4.9>  
Impact Factor: 1.600 Punktacja MNiSW: 140.000

Wchodzącej w skład mojej rozprawy doktorskiej polegał na <sup>2,3</sup>:  
Wstępnym projekcie, gromadzeniu, analizie i interpretacji danych co określam jako 68%  
udziału w przygotowaniu wyżej wymienionej publikacji.

Ponadto udział współautora/-ki<sup>4</sup>:

Michał Starczewski określam jako 7% w zakresie: Gromadzenia, analizy i interpretacji danych.

Patrycja Bobowik określam jako 20.0% w zakresie: Wstępny projekt, gromadzenia, analizy i  
interpretacji danych.

Bartosz Wysoczański określam jako 5.0% w zakresie: Gromadzenia, analizy i interpretacji  
danych.

  
.....

Podpis autora rozprawy doktorskiej (czytelny)

  
.....

Podpis promotora (czytelny)

---

<sup>1</sup> Do oświadczenia dołącza się oświadczenia wszystkich współautorów.

<sup>2</sup> W co najmniej trzech pracach monotematycznego cyklu doktorant musi być pierwszym autorem, z jego  
decydującym wkładem na każdym etapie powstawania i pisania prac (tworzenie koncepcji, przeprowadzenie

*badania, analiza wyników oraz pisanie artykułu).*

<sup>3</sup> *W przypadku każdej z włączonych do cyklu prac wymaga się złożenie oświadczenia przez autora wskazujące na jego merytoryczny oraz procentowy wkład w powstanie pracy [np. twórca hipotezy badawczej, pomysłodawca badań, wykonanie specyficznych badań (np. przeprowadzenie konkretnych doświadczeń, opracowanie i zebranie danych, wykonanie zestawień statystycznych itp.), wykonanie analizy wyników, przygotowanie manuskryptu artykułu, i inne]. Określenie wkładu autora powinno być na tyle precyzyjne, aby umożliwić dokładną ocenę jego udziału i roli w powstaniu każdej z prac.*

<sup>4</sup> *Dodać zapis udziału % i rodzaj wniesionego wkładu wszystkich współautorów na podstawie własnych oświadczeń współautorów.*

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej**  
**AWF Warszawa**  
**Przewodniczący**  
**Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr Patrycja Bobowik

### **Oświadczenie współautora publikacji**

*Jako współautor pracy Jaskulski, K., Bobowik, P., Wysoczański, B., & Starczewski, M  
opublikowany – zał.3 (2024). 8-week additional sensomotoric warm-up drills improves motor performance and  
postural stability in high-performance female Rugby-7 players. Acta Kinesiologica, 18(N4 2024), 72–78.  
<https://doi.org/10.51371/issn.1840-2976.2024.18.4.9>  
Impact Factor: 1.600 Punktacja MNiSW: 140.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Wstępny projekt, gromadzenie, analiza i interpretacja danych.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 20%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.

  
.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr Bartosz Wysoczański

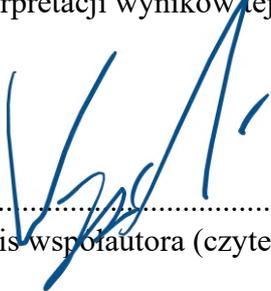
### **Oświadczenie współautora publikacji**

*Jako współautor pracy Jaskulski, K., Bobowik, P., Wysoczański, B., & Starczewski, M  
opublikowany – zał.3 (2024). 8-week additional sensomotoric warm-up drills improves motor performance and  
postural stability in high-performance female Rugby-7 players. Acta Kinesiologica, 18(N4 2024), 72–78.  
<https://doi.org/10.51371/issn.1840-2976.2024.18.4.9>  
Impact Factor: 1.600 Punktacja MNiSW: 140.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Gromadzenie, analiza i interpretacja danych.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 5%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.

  
.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr Michał Starczewski

### **Oświadczenie współautora publikacji**

*Jako współautor pracy Jaskulski, K., Bobowik, P., Wysoczański, B., & Starczewski, M  
opublikowany – zał.3 (2024). 8-week additional sensomotoric warm-up drills improves motor performance and  
postural stability in high-performance female Rugby-7 players. Acta Kinesiologica, 18(N4 2024), 72–78.  
<https://doi.org/10.51371/issn.1840-2976.2024.18.4.9>  
Impact Factor: 1.600 Punktacja MNiSW: 140.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Gromadzenie, analiza i interpretacja danych.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 7%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.



.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa, 24.10.2025

Miejscowość, data

mgr Karol Jaskulski

### Oświadczenie autora publikacji<sup>1</sup>

Oświadczam, iż mój udział w przygotowaniu publikacji:

Jaskulski, K., Bobowik, P., Wysoczański, B., Predkeliene a & Starczewski, M. opublikowany –  
zał.4 (2025). Knee Armor Training Program: An 8-Week Sensorimotor Approach to Reducing  
Knee Injury Risk in Women’s Rugby, *Journal of Clinical Medicine*, 14(11) 2025.

<https://doi.org/10.3390/jcm14113779>

Impact Factor: 2.900 Punktacja MNiSW: 140.000

Wchodzącej w skład mojej rozprawy doktorskiej polegał na <sup>2,3</sup>:

Projekt i koncepcja pracy, korekta pracy, gromadzenie, analiza i interpretacja danych, co  
określam jako 66.0% udziału w przygotowaniu wyżej wymienionej publikacji.

Ponadto udział współautora/-ki<sup>4</sup>:

Michał Starczewski określam jako 9% w zakresie: Gromadzenie, analiza i interpretacja  
danych.

Patrycja Bobowik określam jako 15% w zakresie: Projekt i koncepcja pracy, korekta pracy,  
gromadzenie, analiza i interpretacja danych.

Bartosz Wysoczański określam jako 5.0% w zakresie: Gromadzenie, analiza i interpretacja  
danych.

Agne Predkeliene określam jako 5.0% w zakresie: Gromadzenie, analiza i interpretacja  
danych.

  
.....

Podpis autora rozprawy doktorskiej (czytelny)

  
.....

Podpis promotora (czytelny)

<sup>1</sup> Do oświadczenia dołącza się oświadczenia wszystkich współautorów.

<sup>2</sup> W co najmniej trzech pracach monotematycznego cyklu doktorant musi być pierwszym autorem, z jego decydującym wkładem na każdym etapie powstawania i pisania prac (tworzenie koncepcji, przeprowadzenie badań, analiza wyników oraz pisanie artykułu).

<sup>3</sup> W przypadku każdej z włączonych do cyklu prac wymaga się złożenie oświadczenia przez autora wskazujące na jego merytoryczny oraz procentowy wkład w powstanie pracy [np. twórca hipotezy badawczej, pomysłodawca badań, wykonanie specyficznych badań (np. przeprowadzenie konkretnych doświadczeń, opracowanie i zebranie danych, wykonanie zestawień statystycznych itp.), wykonanie analizy wyników, przygotowanie manuskryptu artykułu, i inne]. Określenie wkładu autora powinno być na tyle precyzyjne, aby umożliwić dokładną ocenę jego udziału i roli w powstaniu każdej z prac.

<sup>4</sup> Dodać zapis udziału % i rodzaj wniesionego wkładu wszystkich współautorów na podstawie własnych oświadczeń współautorów.

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr Patrycja Bobowik

### **Oświadczenie współautora publikacji**

*Jako współautor pracy Jaskulski, K., Bobowik, P., Wysoczański, B., Predkeliene a & Starczewski, M. opublikowany – zał.4 (2025). Knee Armor Training Program: An 8-Week Sensorimotor Approach to Reducing Knee Injury Risk in Women's Rugby, Journal of Clinical Medicine, 14(11) 2025.*

<https://doi.org/10.3390/jcm14113779>

*Impact Factor: 2.900 Punktacja MNiSW: 140.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:

Projekt i koncepcja pracy, korekta pracy, gromadzenie, analiza i interpretacja danych.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 15%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.

  
.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr Bartosz Wysoczański

### **Oświadczenie współautora publikacji**

*Jako współautor pracy Jaskulski, K., Bobowik, P., Wysoczański, B., Predkeliene a & Starczewski, M. opublikowany – zał.4 (2025). Knee Armor Training Program: An 8-Week Sensorimotor Approach to Reducing Knee Injury Risk in Women's Rugby, Journal of Clinical Medicine, 14(11) 2025.*

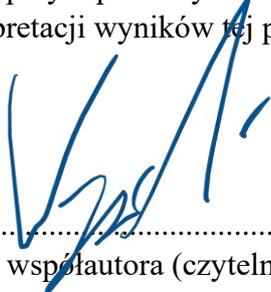
<https://doi.org/10.3390/jcm14113779>

*Impact Factor: 2.900 Punktacja MNiSW: 140.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Gromadzenie, analiza i interpretacja danych.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 5%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.

  
.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr Agne Predkeliene

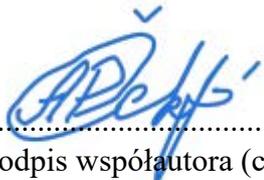
### **Oświadczenie współautora publikacji**

*Jako współautor pracy Jaskulski, K., Bobowik, P., Wysoczański, B., Predkeliene a & Starczewski, M. opublikowany – zał.4 (2025). Knee Armor Training Program: An 8-Week Sensorimotor Approach to Reducing Knee Injury Risk in Women's Rugby, Journal of Clinical Medicine, 14(11) 2025.  
<https://doi.org/10.3390/jcm14113779>  
Impact Factor: 2.900 Punktacja MNiSW: 140.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Gromadzenie, analiza i interpretacja danych.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 5%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.

  
.....  
/podpis współautora (czytelny)/

Warszawa 13.11.2025 r.

**Rada Nauk o Kulturze Fizycznej  
AWF Warszawa  
Przewodniczący  
Prof. dr hab. Andrzej Mastalerz**

dr Michał Starczewski

### **Oświadczenie współautora publikacji**

*Jako współautor pracy Jaskulski, K., Bobowik, P., Wysoczański, B., Predkeliene a & Starczewski, M. opublikowany – zał.4 (2025). Knee Armor Training Program: An 8-Week Sensorimotor Approach to Reducing Knee Injury Risk in Women's Rugby, Journal of Clinical Medicine, 14(11) 2025.*

<https://doi.org/10.3390/jcm14113779>

*Impact Factor: 2.900 Punktacja MNiSW: 140.000*

Oświadczam, iż mój własny wkład merytoryczny w przygotowanie, przeprowadzenie i opracowanie badań oraz przedstawienie pracy w formie publikacji to:  
Gromadzenie, analiza i interpretacja danych.

Procentowy udział w jego powstanie określam na 9%.

Oświadczam, iż samodzielna i możliwa do wyodrębnienia część ww. pracy wykazuje indywidualny wkład mgr Karola Jaskulskiego przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy.



.....  
/podpis współautora (czytelny)/

## Spis treści

Wykaz publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej.....	3
Wykaz publikacji w cyklu wraz z wniesionym wkładem współautorów.....	4
Streszczenie w języku polskim:.....	33
Streszczenie w języku angielskim:.....	34
<b>1. WSTEP.....</b>	<b>35</b>
1.1. Wprowadzenie do problematyki.....	35
1.2. Znaczenie technologii diagnostycznych w ocenie ryzyka urazów.....	37
1.3. Rola interwencji treningowych w zapobieganiu urazom.....	39
1.4. Uzasadnienie podjęcia tematu badawczego.....	42
<b>2. CEL PRACY, PYTANIA BADAWCZE I HIPOTEZY.....</b>	<b>44</b>
Pytania badawcze:.....	44
Hipotezy badawcze:.....	44
<b>3. MATERIAŁ I METODY.....</b>	<b>45</b>
3.1 Materiał badawczy.....	45
3.2. Metody badawcze.....	46
3.2.1. Analiza metod diagnostycznych i protokołów leczenia tendinopatii Achillesa (art. 1).....	46
3.2.2 Określenie relacji pomiędzy strukturalną oceną ścięgna Achillesa a jego funkcją (art. 2).....	47
3.2.3. Interwencja treningowa.....	48
3.2.4. Analiza wpływu treningu „KAT” na stabilność posturalną i momenty sił mięśniowych zawodniczek Rugby-7 (art. 3).....	52
3.2.5. Ocena wpływu protokołu „KAT” na współczynnik RSI i dynamiczną stabilizację stawów kolanowych (art. 4).....	54
a) Pomiar współczynnika RSI (Reactive Strength Index).....	55
b) Analiza dynamicznego kąta koślawości kolan (DKV).....	56
<b>4. Wyniki.....</b>	<b>60</b>
<b>5. Dyskusja.....</b>	<b>63</b>
<b>6. Wnioski.....</b>	<b>68</b>
<b>7. Ograniczenia badań.....</b>	<b>69</b>
<b>SPIS PIŚMIENNICTWA.....</b>	<b>72</b>
<b>Prace będące podstawą rozprawy doktorskiej (załączniki):.....</b>	<b>82</b>
Artykuł: A Systematic Review Evaluating Diagnosis Methods and Treatment Protocols for Achilles.....	82
Artykuł: Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning.....	82
Artykuł: 8-week additional sensomotoric warm-up drills improves motor performance and postural stability in high-performance female Rugby-7 players.....	82

Artykuł: Knee Armor Training Program: An 8-Week Sensorimotor Approach to Reducing Knee Injury Risk in Women's Rugby .....	82
<b>Wykaz innych osiągnięć naukowych doktoranta .....</b>	<b>83</b>
<b>Publikacje naukowe: .....</b>	<b>83</b>
<b>Wystąpienia czynne na konferencjach naukowych .....</b>	<b>84</b>

### Wykaz skrótów:

- ACL – więzadło krzyżowe przednie (ang. *Anterior Cruciate Ligament*)
- AI – sztuczna inteligencja (ang. *Artificial Intelligence*)
- APSI – przednio-tylny wskaźnik stabilności (ang. *Anterior-Posterior Stability Index*)
- BBS – system oceny równowagi Biodex (ang. *Biodex Balance System*)
- COP – środek nacisku stóp na podłoże (ang. *center of pressure*)
- DJ – skok zeskoku (ang. *Drop Jump*)
- EC – oczy zamknięte (ang. *Eyes Closed*)
- EO – oczy otwarte (ang. *Eyes Open*)
- ECC – ekscentryczny trening mięśni (ang. *Eccentric Training*)
- FRI – wskaźnik ryzyka upadku (ang. *Fall Risk Index*)
- FPPA – kąt projekcji w płaszczyźnie czołowej (ang. *Frontal Plane Projection Angle*)
- GRE – gradientowe echo (rodzaj sekwencji MRI; ang. *Gradient-Recalled Echo*)
- HSR – trening oporowy z dużym obciążeniem i małą prędkością (ang. *Heavy Slow Resistance*)
- KAT – autorski program „Knee Armor Training” (ang. *Knee Armor Training*)
- MLSI – przyśrodkowo-boczny wskaźnik stabilności (ang. *Medial-Lateral Stability Index*)
- MRI – rezonans magnetyczny (ang. *Magnetic Resonance Imaging*)
- MVC – maksymalny dowolny skurcz mięśni (ang. *Maximum Voluntary Contraction*)
- NMI – znormalizowana informacja wzajemna (ang. *Normalized Mutual Information*)
- NOS – skala oceny jakości badań Newcastle–Ottawa (ang. *Newcastle–Ottawa Scale*)
- OSI – ogólny wskaźnik stabilności (ang. *Overall Stability Index*)
- PCA – analiza głównych składowych (ang. *Principal Component Analysis*)

- PICO – pacjent, interwencja, porównanie, wynik (ang. *Patient, Intervention, Comparison, Outcome*)
- PRISMA – preferowane elementy raportowania dla przeglądów systematycznych i metaanaliz (ang. *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*)
- PST – test stabilności posturalnej (ang. *Postural Stability Test*)
- RoB 2 – narzędzie oceny ryzyka błędu systematycznego (ang. *Risk of Bias 2 Tool*)
- ROM – zakresy ruchomości (ang. *Range of Motion*)
- RSI – wskaźnik siły reaktywnej (ang. *Reactive Strength Index*)
- SCT – strukturalne zmiany wewnątrz ścięgna (ang. *Structural Changes in Tendon*)
- SSC – cykl rozciągnięcie–skurcz (ang. *Stretch-Shortening Cycle*)
- STE – ostrość brzegów ścięgna (ang. *Sharpness of Tendon Edges*)
- TE – obrzęk ścięgna (ang. *Tendon Edema*)
- TisE – obrzęk tkanek otaczających (ang. *Tissue Edema*)
- TT – pogrubienie ścięgna (ang. *Tendon Thickening*)
- TU – jednorodność struktury ścięgna (ang. *Tendon Uniformity*)
- *T2 GRE\** – sekwencja rezonansu magnetycznego z echem gradientowym (ang. *T2 Gradient Echo\**)
- VISA-A – kwestionariusz oceny funkcji ścięgna Achillesa (ang. *Victorian Institute of Sport Assessment – Achilles*)

## **Streszczenie w języku polskim:**

Celem niniejszej pracy jest ocena skuteczności zintegrowanego podejścia diagnostyczno-treningowego w prewencji urazów narządu ruchu u sportowców, ze szczególnym uwzględnieniem kończyny dolnej. Badania obejmowały cztery komplementarne etapy: (1) systematyczny przegląd literatury dotyczący metod diagnostycznych i protokołów leczenia tendinopatii ścięgna Achillesa, (2) analizę relacji pomiędzy parametrami strukturalnymi ścięgna Achillesa ocenianymi w rezonansie magnetycznym (MRI) wspieranym algorytmami sztucznej inteligencji (AI) a funkcją dynamiczną kończyn dolnych, (3) ocenę wpływu autorskiego programu „Knee Armor Training” (KAT) na stabilność posturalną i siłę mięśniową zawodniczek Rugby-7 oraz (4) analizę efektów programu „KAT” na wskaźnik siły reaktywnej (*Reactive Strength Index – RSI*) i dynamiczną stabilizację stawów kolanowych (*Dynamic Knee Valgus – DKV*). Wyniki wskazują, że algorytmy AI zwiększają precyzję oceny struktury ścięgna w MRI i mogą wspierać predykcję funkcji motorycznych. Program „KAT”, oparty na ćwiczeniach sensomotorycznych, ekscentrycznych i plyometrycznych, istotnie poprawił stabilność posturalną, siłę mięśniową oraz parametry dynamiczne (RSI, DKV), co może przyczynić się do redukcji ryzyka urazów kończyn dolnych. Zintegrowane podejście diagnostyczno-treningowe stanowi obiecującą strategię w profilaktyce urazów w sporcie wyczynowym.

**Słowa kluczowe:** MRI; sztuczna inteligencja; prewencja urazów; ścięgno Achillesa; stabilność posturalna; RSI; Knee Armor Training; KAT; trening sensomotoryczny; Rugby-7; analiza biomechaniczna.

## **Streszczenie w języku angielskim:**

The aim of this study is to evaluate the effectiveness of an integrated diagnostic and training approach in preventing musculoskeletal injuries among athletes, with particular emphasis on the lower limb. The research comprised four complementary stages: (1) a systematic review of the literature on diagnostic methods and treatment protocols for Achilles tendinopathy, (2) analysis of the relationship between structural parameters of the Achilles tendon assessed via magnetic resonance imaging (MRI) supported by artificial intelligence (AI) algorithms and the dynamic function of the lower limbs, (3) evaluation of the impact of the original “Knee Armor Training” (KAT) program on postural stability and muscle strength in female Rugby-7 players, and (4) assessment of the effects of the KAT program on the Reactive Strength Index (RSI) and dynamic knee stabilization (Dynamic Knee Valgus – DKV). The findings indicate that AI algorithms enhance the precision of tendon structure assessment in MRI and may support the prediction of motor function. The KAT program, based on sensorimotor, eccentric, and plyometric exercises, significantly improved postural stability, muscle strength, and dynamic parameters (RSI, DKV), which may contribute to reducing the risk of lower limb injuries. The integrated diagnostic-training approach represents a promising strategy for injury prevention in elite sports.

**Keywords:** MRI; artificial intelligence; injury prevention; Achilles tendon; postural stability; Reactive Strength Index; Knee Armor Training; sensorimotor training; Rugby-7; biomechanical analysis.

# 1. WSTĘP

## 1.1. Wprowadzenie do problematyki

W obliczu dynamicznego rozwoju medycyny sportowej oraz rosnących wymagań dotyczących skutecznej prewencji urazów, istnieje konieczność poszukiwania innowacyjnych metod diagnostyki i optymalizacji treningu.

Kontuzje sportowe stanowią jedno z głównych zagrożeń dla zawodników, zarówno na poziomie amatorskim jak i profesjonalnym. Do najczęściej występujących urazów należą uszkodzenia więzadeł i ścięgien, które mogą skutkować długotrwałą rehabilitacją i ograniczeniem zdolności motorycznych sportowców. Jednym z częstszych urazów w wielu dyscyplinach sportowych jest uszkodzenie ścięgna Achillesa (Santacaterina i wsp., 2021). Jest to dysfunkcja obejmująca zarówno zmiany degeneracyjne w strukturze kolagenowej ścięgna, jak i zaburzenia jego funkcji mechanicznej, prowadzące do bólu, osłabienia siły i ograniczenia możliwości lokomocyjnych. Szczególnie narażeni na tego typu kontuzje są zawodnicy kontaktowych sportów zespołowych (Barden i wsp., 2022; O'Brien i wsp., 2021), wymagających intensywnych zmian kierunku ruchu, nagłych przyspieszeń i wysokich przeciążeń stawowych, takich jak piłka nożna, koszykówka czy rugby. Poszukuje się więc różnych interwencji, aby zminimalizować skutki obciążeń wymuszonych przez uprawianie danego sportu. Natomiast, aby można było zaaplikować odpowiedni trening poprawiający stan funkcjonalny sportowca, należy dostosować go nie tylko do dyscypliny, ale także do potrzeb i możliwości danego zawodnika (O'Brien i wsp., 2021), dlatego niezbędna w tym procesie jest trafna i najlepiej szybka diagnoza. W ostatnich latach rośnie zainteresowanie wykorzystaniem nowoczesnych technologii diagnostycznych (Alghamdi i wsp., 2022; Haller i wsp., 2023), takich jak obrazowanie rezonansu magnetycznego (MRI) (Siriwanarangsun i wsp., 2016; Zubrod & Barrett, 2007) oraz algorytmy sztucznej inteligencji, które pozwalają na bardziej precyzyjną ocenę strukturalnych zmian w tkankach miękkich (Gan i wsp., 2019; Kapiński i wsp., 2019; Ramkumar i wsp., 2022). Badania sugerują, że analiza MRI wspomagana uczeniem maszynowym umożliwia wykrywanie subtelnych zmian w ścięgnach, które mogą predysponować do kontuzji, zanim pojawią się objawy kliniczne (Kapinski i wsp., 2018; Kapiński i wsp., 2019; Szaro & Ghali Gataa, 2021). Takie podejście otwiera nowe perspektywy

w kontekście profilaktyki urazów oraz monitorowania skuteczności programów rehabilitacyjnych (Kapinski i wsp., 2019).

Obok technologii diagnostycznych, kluczową rolę w zapobieganiu kontuzjom odgrywają odpowiednio zaprojektowane interwencje treningowe. Istnieje szereg uznanych protokołów, które wspierają trenerów i sportowców w tym zakresie. Programy stosowane w piłce nożnej takie jak FIFA 11 i FIFA 11+ skupiają się na poprawie stabilizacji stawów, siły mięśniowej i koordynacji, a ich uniwersalność pozwala na adaptację do różnych dyscyplin. Protokół Activate kładzie nacisk na ćwiczenia neuromotoryczne, kluczowe w sportach z dynamicznymi zmianami kierunku, minimalizując ryzyko urazów stawów kolanowych. Judo 9+ to specjalistyczny program dla judoków (Rawat i wsp., 2024), uczący technik upadania i wzmacniający mięśnie tułowia. Z kolei Team-sport Injury Prevention (TIP) (O'Brien i wsp., 2019) to ogólny program, który można dostosować do różnych sportów zespołowych, kładąc nacisk na ćwiczenia wzmacniające, rozciągające i poprawiające koordynację. Poprzez integrację nowoczesnych metod diagnostycznych z ukierunkowanymi interwencjami treningowymi możliwe jest skuteczniejsze zapobieganie kontuzjom, a także optymalizacja wydolności sportowej.

Niniejsza praca badawcza koncentruje się na ocenie skuteczności wykorzystania nowoczesnych technologii diagnostycznych i dedykowanego protokołu treningowego w kontekście poprawy stanu funkcjonalnego sportowców. W szczególności analizie poddane zostaną aspekty związane z oceną strukturalną i funkcjonalną ścięgna Achillesa, stabilizacją stawów kolanowych oraz wpływem autorskiego treningu sensomotorycznego na posturalną kontrolę u zawodniczek Rugby-7. Stworzony protokół treningowy, poprzedzony odpowiednią diagnostyką zawodnika, może być wykorzystywany w odniesieniu do innych dyscyplin sportowych.

## 1.2. Znaczenie technologii diagnostycznych w ocenie ryzyka urazów

Postęp technologiczny w dziedzinie diagnostyki obrazowej i analizy ruchu umożliwił dokładniejsze monitorowanie stanu zdrowia sportowców oraz identyfikację czynników ryzyka urazów. Tradycyjne metody oceny, takie jak badania manualne czy testy funkcjonalne, choć powszechnie stosowane, nie zawsze pozwalają na wczesne wykrycie mikrouszkodzeń tkanek i subtelnych zmian strukturalnych, które nie dają jeszcze zmian morfologicznych, a mogą prowadzić do kontuzji.

W związku z tym coraz większe znaczenie przypisuje się nowoczesnym narzędziom diagnostycznym, takim jak rezonans magnetyczny (MRI), analiza stabilograficzna, czy modelowanie biomechaniczne wspomagane sztuczną inteligencją (AI), które nie wymagają pobierania np. próbek histopatologicznych (Planckaert i wsp., 2025).

MRI stanowi jedno z najdokładniejszych narzędzi diagnostycznych (Siriwanarangsun i wsp., 2016; Zubrod & Barrett, 2007) umożliwiających ocenę tkanek miękkich, w tym ścięgien oraz więzadeł. W kontekście ścięgna Achillesa, które jest szczególnie narażone na przeciążenia i mikrourazy, wykorzystanie nowoczesnych technik obrazowania, pozwala na detekcję zmian strukturalnych w obrębie ścięgna jeszcze przed wystąpieniem objawów klinicznych (Kapinski i wsp., 2018). W połączeniu z algorytmami uczenia maszynowego możliwe jest stworzenie predykcyjnych modeli oceny ryzyka urazów, co umożliwia wdrożenie odpowiednich działań prewencyjnych i monitorowanie procesów leczenia (Kapiński i wsp., 2019; Kapinski i wsp., 2019; Planckaert i wsp., 2025).

Analiza biomechaniczna z wykorzystaniem urządzeń składających się z: platform równoważnych, stabilometrycznych (Arkkukangas i wsp., 2021; Phipps i wsp., 2018) i dynamometrycznych oraz stanowisk pomiarowych w warunkach izometrycznych (do pomiarów MVC); umożliwia ocenę zdolności sportowców, efektywności kontroli posturalnej oraz strategii ruchowych w warunkach statycznych i dynamicznych. Urządzenia te rejestrują m.in. przemieszczenia środka nacisku stóp na podłoże (COP), momenty sił mięśniowych (MVC) oraz siły reakcji podłoża, co pozwala na obiektywną analizę równowagi i stabilizacji dynamicznej – szczególnie istotnej w dyscyplinach kontaktowych; w których stawy kończyn dolnych są wyjątkowo narażone na przeciążenia i urazy więzadłowe.

Coraz częściej wykorzystywane są także mobilne aplikacje (Cesar i wsp., 2016; Colclough i wsp., 2018; Willson & Davis, 2008) i ich możliwości przetwarzania obrazu w zwolnionym tempie przy pomocy smartfonów czy tabletów, co umożliwiają ocenę zakresu ruchomości, tempa zmian pozycji, czy parametrów przyspieszenia bez konieczności użycia kosztownego sprzętu laboratoryjnego. Technologie te, dzięki wysokiej dostępności i wystarczającej dokładności pomiaru, stają się użytecznym narzędziem do oceny ryzyka urazowego i monitorowania postępów treningowych w warunkach codziennej praktyki sportowej.

Jednym z parametrów szeroko stosowanych w ocenie zdolności eksplozywnej kończyn dolnych jest Reactive Strength Index (RSI). Jest to wskaźnik biomechaniczny obliczany jako stosunek wysokości skoku do czasu kontaktu z podłożem w trakcie testu zeskoku (drop jump). RSI obrazuje efektywność wykorzystania cyklu rozciągnięcie–skurcz (SSC) i określa, jak szybko sportowiec potrafi przekształcić energię z fazy ekscentrycznej (lądowanie) w fazę koncentryczną (odbicie). Wyższe wartości RSI wskazują na lepszą zdolność do reaktywnego generowania siły, co może przekładać się na większą efektywność ruchową oraz niższe ryzyko urazów, zwłaszcza w obrębie stawu kolanowego (Cesar i wsp., 2016; Flanagan & Comyns., 2008).

Oprócz zaawansowanych technologii diagnostycznych, coraz większe znaczenie przypisuje się również zastosowaniu algorytmów sztucznej inteligencji (AI) do analizy danych biomechanicznych i obrazowych. Sztuczna inteligencja umożliwia automatyczną klasyfikację zmian strukturalnych w tkankach oraz predykcję ryzyka kontuzji na podstawie złożonych wzorców ruchowych. Przykładem takiego podejścia jest zastosowanie systemu SmarterOrthoMRI, który integruje analizę MRI z algorytmami uczenia maszynowego w celu identyfikacji nieprawidłowości w obrębie ścięgna Achillesa (Kapinski i wsp., 2018; Kapiński i wsp., 2019; Kapinski i wsp., 2019). Takie rozwiązania mogą znacząco zwiększyć precyzję diagnostyki oraz przyczynić się do opracowania spersonalizowanych strategii prewencyjnych w sporcie wyczynowym.

Podsumowując, wykorzystanie zaawansowanych technologii diagnostycznych stanowi istotny element oceny ryzyka urazów i planowania efektywnych interwencji prewencyjnych. Integracja nowoczesnych metod obrazowania, analizy biomechanicznej i sztucznej inteligencji pozwala na bardziej kompleksowe podejście do ochrony zdrowia sportowców oraz optymalizacji ich treningu.

### 1.3. Rola interwencji treningowych w zapobieganiu urazom

Współczesna medycyna sportowa i trening motoryczny coraz częściej koncentrują się nie tylko na leczeniu urazów, lecz także na ich zapobieganiu poprzez odpowiednio zaprogramowane interwencje treningowe. Powszechnie uznaje się, że właściwie zaplanowane ćwiczenia korekcyjno-prewencyjne mogą w istotny sposób ograniczyć ryzyko wystąpienia urazów tkanek miękkich, takich jak: ścięgna, więzadła i mięśnie; zwłaszcza w sportach zespołowych wymagających dynamicznych zmian kierunku ruchu, skoków i lądowań (Lauersen i wsp., 2014; O'Brien i wsp., 2021; Soligard i wsp., 2009).

Programy prewencyjne obejmują najczęściej zestaw ćwiczeń ukierunkowanych na poprawę propriocepcji, wzmacnianie mięśni stabilizujących stawy, ćwiczenia ekscentryczne, trening neuromotoryczny oraz elementy plyometrii i mobilności. Szczególne znaczenie przypisuje się komponentowi ekscentrycznemu, który – jak wykazano w licznych badaniach – skutecznie zwiększa odporność struktur ścięgnistych i mięśniowych na przeciążenia (Beyer i wsp., 2015; Lauersen i wsp., 2014; Mafi i wsp., 2001). Interwencje te przyczyniają się nie tylko do zmniejszenia liczby kontuzji, lecz także do poprawy stanu funkcjonalnego, takich jak stabilizacja dynamiczna, kontrola lądowania, zakresy ruchomości czy generowanie siły.

Szczególną uwagę poświęca się także roli programów profilaktycznych w prewencji uszkodzeń ścięgna Achillesa, które należą do jednych z najczęstszych i najbardziej obciążających urazów w sportach o wysokiej intensywności wysiłku ekscentrycznego.

Systematyczne przeglądy potwierdzają skuteczność protokołów opartych na ćwiczeniach ekscentrycznych z obciążeniem, w leczeniu i prewencji tendinopatii Achillesa (Lauersen i wsp., 2018; Prudêncio i wsp., 2023). Uzupełnienie takich protokołów o ćwiczenia sensomotoryczne i mobilizujące może dodatkowo zwiększyć elastyczność i adaptacyjność ścięgna, zmniejszając ryzyko mikrourazów oraz przeciążeń w wyniku powtarzanego ruchu (Gidu i wsp., 2022; Rhodes i wsp., 2021; Wang i wsp., 2016).

W kontekście kończyn dolnych, rosnącą uwagę poświęca się także profilaktyce urazów więzadła krzyżowego przedniego (ACL), zwłaszcza u zawodniczek sportów zespołowych, u których ryzyko kontuzji tego typu jest wyraźnie wyższe niż u mężczyzn (Hewett i wsp., 2006; Myer i wsp., 2008; O'Brien i wsp., 2025). Badania wykazują,

że programy treningowe ukierunkowane na poprawę wzorców ruchowych, aktywację mięśni pośladkowych i grupy tylnej uda, a także kontrolę koślawienia dynamicznego kolana, są skuteczne w redukcji częstości występowania urazów ACL nawet o 30–70% (Herrington & Munro, 2010; Mehl i wsp., 2018a; Montalvo i wsp., 2019; Redler i wsp., 2016).

Skuteczność takich interwencji została również potwierdzona w programach prewencyjnych takich jak FIFA 11+ (Brito i wsp., 2010), PEP (ang. Prevent injury and Enhance Performance) (Rodríguez i wsp., 2018) oraz Activate (Barden i wsp., 2022) – każdy z nich zawiera elementy wzmacniania mięśni stabilizujących, ćwiczenia równoważne, aktywację ekscentryczną i komponenty reaktywności nerwowo-mięśniowej. Programy te nie tylko ograniczają liczbę kontuzji, ale również przebudowują stan funkcjonalny poprzez poprawę siły eksplozywnej, zdolności do lądowania, kontroli postawy i czasu reakcji (O'Brien i wsp., 2021).

Ważną rolę w skuteczności tych programów odgrywa również regularność oraz odpowiednia intensywność treningu. W przeglądzie systematycznym przeprowadzonym przez O'Brien i wsp. (2021) podkreślono, że minimalna częstotliwość wykonywania ćwiczeń prewencyjnych powinna wynosić co najmniej dwa razy w tygodniu, przez minimum sześć tygodni, aby uzyskać zauważalne efekty redukcji urazów (O'Brien i wsp., 2021). Dodatkowo, wdrożenie prewencji powinno być zintegrowane z regularnym treningiem technicznym, a nie traktowane jako element dodatkowy.

Nie bez znaczenia jest również aspekt edukacyjny – przeszkolenie trenerów oraz zawodników w zakresie biomechaniki ruchu i prawidłowego wykonywania ćwiczeń znacząco zwiększa skuteczność całego programu. W literaturze naukowej podkreśla się znaczenie takich elementów jak: jasne instrukcje treningowe przekazywane przez trenera, informacja zwrotna oparta na analizie nagrań wideo, a także indywidualne dostosowanie ćwiczeń do specyfiki grupy sportowców i ich indywidualnego ryzyka urazowego (Bahr & Krosshaug, 2005; Barden i wsp., 2022; Etty Griffin, 2003; Harøy i wsp., 2019; Mario Bizzini i wsp., 2022).

Skuteczność interwencji treningowych w redukcji ryzyka urazów została wielokrotnie potwierdzona w badaniach naukowych i metaanalizach. Wspólne cechy najbardziej efektywnych programów obejmują: obecność ćwiczeń ekscentrycznych, komponent propriocepcji, progresję obciążeń, uwzględnienie pracy jednostronnej oraz integrację ćwiczeń

funkcjonalnych odpowiadających realiom sportowym. Interwencje te nie tylko zmniejszają częstość urazów, lecz także poprawiają kontrolę motoryczną, stabilizację dynamiczną oraz świadomość ciała sportowca w warunkach zmiennego środowiska boiskowego (Krosshaug i wsp., 2007; Lauersen i wsp., 2014; Soligard i wsp., 2009).

Coraz częściej podkreśla się również znaczenie indywidualizacji protokołów treningowych – zarówno pod kątem dyscypliny sportowej, jak i wieku, płci, poziomu wytrenowania oraz historii kontuzji. Interwencje powinny być nie tylko skuteczne, ale także wykonalne i dostosowane do możliwości organizacyjnych danego zespołu, czy placówki sportowej. Dodatkowo, stale rosnące możliwości technologiczne – m.in. analiza ruchu wspomagana sztuczną inteligencją, zdalne monitorowanie parametrów, czy wykorzystanie urządzeń mobilnych – otwierają nowe perspektywy w projektowaniu programów prewencyjnych opartych na danych indywidualnych.

W kontekście dalszego rozwoju prewencji urazów istotne będzie nie tylko doskonalenie skutecznych protokołów, ale także edukacja trenerów i fizjoterapeutów oraz wdrażanie systematycznego monitoringu biomechanicznego do codziennej praktyki sportowej. Integracja podejścia opartego na dowodach naukowych z elastycznym, interdyscyplinarnym podejściem do zawodnika stanowi fundament nowoczesnej i skutecznej profilaktyki urazów w sporcie wyczynowym.

#### 1.4. Uzasadnienie podjęcia tematu badawczego

Współczesny sport wyczynowy wiąże się z wysokimi wymaganiami motorycznymi, które narażają zawodników na zwiększone ryzyko kontuzji (Bahr & Krosshaug, 2005). Szczególnie w dyscyplinach wymagających intensywnych zmian kierunku ruchu, gwałtownych przyspieszeń i skoków, takich jak Rugby-7, w której częstotliwość urazów kończyn dolnych jest wysoka (Faude i wsp., 2017). Zerwania więzadła krzyżowego przedniego (ACL) oraz uszkodzenia ścięgna Achillesa stanowią jedne z najczęstszych i najbardziej obciążających kontuzji, prowadzących do długotrwałych przerw w treningach oraz znacznego pogorszenia zdolności motorycznych (Hewett i wsp., 2006; Jaskulski & Starczewski, 2024; Maffulli i wsp., 2024; Webster i wsp., 2021).

Tradycyjne podejścia do diagnostyki i prewencji urazów często opierają się na subiektywnej ocenie funkcjonalnej oraz podstawowych testach klinicznych, które mogą nie wykrywać subtelnych zmian strukturalnych i biomechanicznych prowadzących do przeciążeń i mikrourazów. W odpowiedzi na te ograniczenia coraz większą rolę odgrywiają nowoczesne metody diagnostyczne, takie jak obrazowanie MRI w połączeniu z algorytmami uczenia maszynowego. Wykorzystanie tych technologii może umożliwić wczesne wykrycie zmian degeneracyjnych ścięgna Achillesa i innych struktur anatomicznych, co pozwala na wdrożenie odpowiednich działań profilaktycznych jeszcze przed wystąpieniem objawów klinicznych (Gan i wsp., 2019; Kapinski i wsp., 2018, 2024).

Dodatkowo rosnące zainteresowanie wpływem treningu funkcjonalnego na prewencję urazów sprawia, że konieczne jest opracowanie i ewaluacja nowych protokołów treningowych dostosowanych do specyfiki danej dyscypliny sportowej. W literaturze najczęściej opisywane są programy treningowe ukierunkowane na konkretne dyscypliny sportowe (Barden i wsp., 2022; Brito i wsp., 2010; Griffin, 2003). Jednocześnie wciąż poszukuje się rozwiązań o charakterze uniwersalnym (O'Brien i wsp., 2021), które można elastycznie dostosować do indywidualnych możliwości zawodnika oraz specyfiki dyscypliny. Wstępne badania wskazują, że programy oparte na ćwiczeniach sensomotorycznych (Faude i wsp., 2017), plyometrycznych (Zhou i wsp., 2022) i ekscentrycznych (Habets i wsp., 2021) mogą skutecznie poprawiać mechanikę ruchu oraz stabilność posturalną, co może przekładać się na zmniejszenie ryzyka kontuzji (Brito i wsp., 2010; Bukry i wsp., 2024; Etty Griffin, 2003; Steffen i wsp., 2013).

W literaturze brakuje konkretnych przykładów uniwersalnych ćwiczeń możliwych do zastosowania jako bazowe ćwiczenia z oddziaływaniem na stabilizację kończyn dolnych. Dominują programy stworzone pod sporty takie jak piłka nożna (Bukry i wsp., 2024; Gomes Neto i wsp., 2017), koszykówka (Rostami i wsp., 2024), judo (Gerhardt i wsp., 2023) czy rugby (Rizaan Behardien i wsp., 2024).

Kluczowe jest stworzenie programu prewencyjnego, który nie tylko będzie oparty na rzetelnych podstawach naukowych, ale także możliwy do łatwego zastosowania i modyfikacji w praktyce treningowej. Taki program powinien odpowiadać na potrzeby dyscyplin, w których zawodnicy są szczególnie narażeni na przeciążenia w obrębie kończyny dolnej. Jednocześnie może stanowić elastyczną bazę wyjściową dla dalszych interwencji, które można udoskonalać lub ukierunkowywać na inne grupy sportowców.

Podjęcie niniejszego tematu badawczego ma zatem istotne znaczenie zarówno dla nauki, jak i praktyki sportowej. Połączenie nowoczesnych technologii diagnostycznych z indywidualnie dostosowanym protokołem treningowym może pozwolić na opracowanie kompleksowej strategii prewencji urazów i optymalizacji zdolności motorycznych sportowców. Wyniki tego badania mogą dostarczyć cennych informacji, które znajdą zastosowanie w programach treningowych, diagnostyce sportowej oraz procesach rehabilitacyjnych.

## 2. CEL PRACY, PYTANIA BADAWCZE I HIPOTEZY

Celem pracy jest ocena zintegrowanego podejścia diagnostyczno-treningowego — diagnostyki obrazowej (MRI) wspieranej sztuczną inteligencją oraz 8-tygodniowego programu sensomotorycznego — w kontekście prewencji urazów narządu ruchu u sportowców (ze szczególnym uwzględnieniem kończyny dolnej).

### **Pytania badawcze:**

1. Jaki jest najbardziej efektywny trening poprawiający kondycję ścięgna Achillesa według dostępnej literatury naukowej?
2. Jakie są relacje pomiędzy strukturą ścięgna Achillesa ocenianą na podstawie rezonansu magnetycznego (MRI) a jego funkcją dynamiczną?
3. Czy ocena struktury ścięgna w MRI wspierana AI przewiduje wskaźniki funkcji istotnie lepiej niż klasyczna ocena radiologiczna?
4. W jakim stopniu dodatkowy autorski trening „KAT” wpływa na stabilność posturalną i zdolności motoryczne zawodniczek Rugby-7?
5. Jaki jest wpływ autorskiego treningu "KAT" na poprawę Wskaźnika Siły Reaktywnej (Reactive Strength Index - RSI) oraz stabilizację dynamiczną stawów kolanowych u zawodniczek Rugby-7?

### **Hipotezy badawcze:**

- Ocena MRI wspierana sztuczną inteligencją (AI) lepiej przewiduje wskaźniki funkcji kończyny dolnej niż klasyczna ocena radiologiczna.
- Autorski program treningowy "KAT" poprawi parametry funkcjonalne sportowców.

### 3. MATERIAŁ I METODY

Badania zostały przeprowadzone za zgodą Senackiej Komisji Etyki Badań Naukowych Akademii Wychowania Fizycznego w Warszawie (SKE 01-44/2022, Załącznik nr 5) oraz zgodnie z postanowieniami Deklaracji Helsińskiej (“World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects,” 2013).

#### 3.1 Materiał badawczy

Materiał badawczy stanowiły dane pozyskane w ramach czterech uzupełniających się projektów badawczych, obejmujących zarówno przegląd literatury jak i badania empiryczne przeprowadzone na różnych grupach uczestników, reprezentujących populację sportowców wysokiego ryzyka urazowego.

W pierwszym etapie zrealizowano systematyczny przegląd literatury (art. 1), który objął prace dotyczące metod diagnostycznych i protokołów leczenia tendinopatii ścięgna Achillesa. Przegląd wykonano zgodnie z wytycznymi PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Uwzględniono badania opisujące skuteczność treningów ekscentrycznych, w tym protokołów Alfredsona (Alfredson i wsp., 1998), Stanish (El Hawary i wsp., 1997) i Silbernagel (Grävare Silbernagel i wsp., 2011), czy HSR (Beyer i wsp., 2015) u osób dorosłych z przewlekłymi dolegliwościami nieinercyjnymi ścięgna Achillesa.

Analizowane prace musiały obejmować populację powyżej 18. roku życia, z objawami trwającymi co najmniej trzy miesiące i być opublikowane po 2012 roku. Wykluczano badania w językach innych niż angielski, prace *in vitro*, zwierzęce, z interwencjami chirurgicznymi oraz z próbą mniejszą niż 10 osób.

W drugim badaniu (art. 2) udział wzięło 72 aktywnych sportowców (kobiet i mężczyzn), dane antropometryczne dla grupy mężczyzn to; wiek  $37,4 \pm 9,6$ ; wysokość ciała  $182,4 \pm 7,0$ ; masa ciała  $86,0 \pm 12,1$  oraz dla kobiet to; wiek  $29,9 \pm 8,5$ ; wysokość ciała  $169,0 \pm 7,3$ ; masa ciała  $66,0 \pm 13,1$ , reprezentujących dyscypliny takie jak: rugby, siatkówka, piłka nożna, badminton i wioślarstwo. Wszyscy uczestnicy trenowali co najmniej dwa razy w tygodniu. Do kryteriów włączenia należało: aktywne uprawianie sportu z komponentem obciążeniowym

kończyn dolnych, minimum dwie jednostki treningowe w tygodniu oraz brak historii urazów ścięgna Achillesa. Kryteriami wyłączenia były: przeciwwskazania do wykonania badania MRI (np. obecność niecertyfikowanych implantów metalicznych), ostra kontuzja kończyn dolnych oraz zaostrzenia chorób przewlekłych mogące wpływać na wyniki testów funkcjonalnych.

Trzecie (art. 3) i czwarte (art. 4) badanie empiryczne przeprowadzono na tej samej grupie pierwszoligowych zawodniczek Rugby-7, zrekrutowanej spośród 24 zawodniczek. Z tej grupy 21 zakwalifikowano do badania na podstawie następujących kryteriów włączenia: płeć żeńska, wiek 18–35 lat, co najmniej dwuletnie doświadczenie w uprawianiu Rugby-7, brak urazów kończyn dolnych w ciągu ostatnich 6 miesięcy oraz regularny udział w treningach przynajmniej 3 razy w tygodniu. Kryteriami wyłączenia były: przewlekłe urazy, brak zgody na udział w badaniu oraz nieregularny udział w treningach.

W badaniu nr 3 (Jaskulski i wsp., 2024) udział wzięło 15 zawodniczek, które ukończyły wszystkie wymagane pomiary biomechaniczne. Ich średni wiek wynosił  $25,5 \pm 4,58$  lat, masa ciała  $69,58 \pm 12,62$  kg, a wzrost  $167,87 \pm 6,32$  cm. W badaniu nr 4 (Jaskulski i wsp., 2025) ostatecznie uczestniczyło 16 zawodniczek, które ukończyły pełen protokół pomiarowy w zakresie testów dynamicznych. Średnie wartości antropometryczne dla tej grupy wynosiły: wiek  $23,0 \pm 4,33$  lat, masa ciała  $69,83 \pm 11,84$  kg, wysokość  $168,0 \pm 5,85$  cm. Jedna z zawodniczek została wykluczona z analizy wyników w artykule nr 3 z powodu nieukończenia wszystkich prób pomiarowych wymaganych do opracowania tego badania.

## **3.2. Metody badawcze**

W ramach pracy zastosowano zróżnicowane metody badawcze, obejmujące zarówno przegląd systematyczny, jak i pomiary strukturalne i funkcjonalne, umożliwiające całościową ocenę funkcji układu ruchu oraz skuteczności interwencji treningowej.

### **3.2.1. Analiza metod diagnostycznych i protokołów leczenia tendinopatii Achillesa (art. 1)**

Przegląd literatury został przeprowadzony zgodnie z wytycznymi PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) w celu identyfikacji najnowszych

i najbardziej skutecznych metod diagnostycznych oraz protokołów treningowych stosowanych w leczeniu tendinopatii ścięgna Achillesa.

Do przeszukiwania literatury wykorzystano sześć renomowanych baz danych naukowych: PubMed, Embase, MEDLINE Ovid, Web of Science, Cochrane Library oraz ProQuest. Proces wyszukiwania oparto na zaawansowanych algorytmach logicznych z zastosowaniem operatorów „AND” i „OR”, umożliwiającymi łączenie fraz kluczowych takich jak: *“Achilles tendinopathy”, “eccentric training”, “Alfredson protocol”, “Silbernagel”, “Stanish”, “clinical tests”, “imaging tests”*. Dodatkowo, przeszukano listy referencyjne włączonych artykułów w celu maksymalnego rozszerzenia zakresu analizowanych danych.

Proces selekcji i ekstrakcji danych został przeprowadzony niezależnie przez dwóch badaczy, zgodnie z modelem PICO (Patient, Intervention, Comparison, Outcome). W przypadku rozbieżności, decyzję podejmowano w drodze konsensusu z trzecim recenzentem. Dane wyciągnięte z analizowanych prac obejmowały: identyfikator badania (autorów, rok), miejsce realizacji, charakterystykę populacji, zastosowane metody diagnostyczne i interwencyjne oraz główne wyniki — w tym oceny bólu i funkcji przy użyciu skali VISA-A.

Jakość i wiarygodność włączonych prac oceniono z użyciem dwóch narzędzi. Dla badań randomizowanych zastosowano narzędzie oceny ryzyka błędu systematycznego RoB 2 (Risk of Bias 2, Cochrane), które analizowało pięć głównych domen: proces randomizacji, brakujące dane wynikowe, selekcję raportowanych wyników, pomiar efektów oraz odchylenia od założonych interwencji. Badania klasyfikowano jako o niskim ryzyku błędu, z pewnym ryzykiem lub wysokim ryzykiem błędu. Dla badań retrospektywnych wykorzystano Skalę Newcastle-Ottawa (NOS), oceniającą trzy aspekty: dobór próby badawczej, porównywalność grup oraz ocenę wyników. Za każdą odpowiednio spełnioną kategorię przyznawano maksymalnie jedną gwiazdkę, przy czym pełna ocena pozwalała określić jakość danej publikacji.

### **3.2.2 Określenie relacji pomiędzy strukturalną oceną ścięgna Achillesa a jego funkcją (art. 2)**

W badaniu zastosowano wieloetapowy protokół badawczy obejmujący zaawansowaną analizę strukturalną ścięgna Achillesa oraz ocenę funkcjonalną kończyn dolnych. Obrazowanie rezonansem magnetycznym (MRI) wykonano w placówce diagnostyki obrazowej

wykorzystując dwa typy skanerów: 3T Siemens MAGNETOM Vida oraz 1.5T United Imaging uMR 588. W protokole wykorzystano sekwencję T2\* GRE Echo z krótkim czasem echa (3,51–4,7 ms) w płaszczyźnie poprzecznej, przy użyciu dedykowanej cewki dla badań stawu skokowo-goleniowego. Skany obejmowały zakres od kości piętowej do połowy podudzia, z grubością przekrojów 3 mm i zakresem pola widzenia od 120 × 120 mm do 170 × 170 mm.

Oceny MRI dokonano według modelu zaproponowanego przez Kapiński, Jaskulski i wsp. (2024), obejmującego sześć parametrów strukturalnych: SCT (strukturalne zmiany wewnątrz ścięgna), TT (pogrubienie ścięgna), STE (ostrość brzegów), TE (obrzęk ścięgna), TU (jednorodność struktury) oraz TisE (obrzęk tkanek otaczających). Każde badanie zostało niezależnie ocenione przez doświadczonego radiologa oraz przy użyciu algorytmu sztucznej inteligencji „SmarterOrthoMRI” (Smarter Diagnostics Sp. z o.o., Warszawa).

Ocena funkcjonalna odbywała się w warunkach laboratoryjnych i obejmowała cztery główne grupy pomiarów: dynamiczną siłę kończyn dolnych (m.in. poprzez skoki pionowe na platformie tj. pomiar sił reakcji podłoża), wskaźniki stabilograficzne (z użyciem platformy AMTI Accusway), zakresy ruchomości (ROM) stawów skokowo-goleniowych i kolanowych (mierzone goniometrem ręcznym) oraz momentów sił mięśniowych na stanowisku pomiarowym JBA Staniak.

Wszystkie testy funkcjonalne były wykonywane w warunkach standaryzowanych, z zachowaniem tej samej kolejności i czasu odpoczynku pomiędzy próbami. W celu zapewnienia spójności czasowej, większość uczestników przeszła badanie MRI i testy funkcjonalne tego samego dnia, a w pozostałych przypadkach różnica nie przekraczała jednego tygodnia.

Dane zebrane z oceny strukturalnej i funkcjonalnej stanowiły podstawę do dalszych analiz relacji między strukturą ścięgna, a jego funkcją dynamiczną. Szczególny nacisk położono na identyfikację wzorców biomechanicznych mogących wskazywać na wczesne objawy przeciążeniowe i ryzyko urazu.

### **3.2.3. Interwencja treningowa**

Struktura programu „KAT” została opracowana jako schemat możliwy do zaadaptowania również w innych dyscyplinach, w których przeciążenia kończyn dolnych odgrywają istotną rolę w etiologii urazów. W obu badaniach interwencyjnych zastosowano tę samą ośmiotygodniową interwencję treningową opartą na autorskim programie „KAT”

(Knee Armor Training), mającą na celu: kompleksową poprawę stabilizacji dynamicznej stawu kolanowego, kontroli posturalnej oraz siły mięśniowej kończyn dolnych. Program powstał jako praktyczne rozwinięcie wiedzy zgromadzonej w przeglądzie literatury dotyczącym tendinopatii ścięgna Achillesa, który potwierdził wysoką skuteczność ćwiczeń ekscentrycznych i sensomotorycznych w prewencji przeciążeń i poprawie funkcji kończyn dolnych (art.1 Jaskulski & Starczewski, 2024). Wnioski płynące z tego przeglądu, w połączeniu z wynikami wcześniejszych badań strukturalnych MRI, pozwoliły zaprojektować zintegrowany protokół prewencyjno-treningowy, odpowiadający potrzebom zawodniczek sportów zespołowych.

Interwencja była zastosowana u zawodniczek Rugby-7 dwa razy w tygodniu przez osiem tygodni, każdorazowo w formie 45-minutowej rozgrzewki poprzedzającej regularne jednostki treningowe. Jej struktura została zaplanowana w oparciu o sprawdzone protokoły prewencji urazów – FIFA 11, FIFA 11+ oraz Activate – które wykazują skuteczność w redukcji częstości urazów kończyn dolnych w sportach zespołowych (Soligard i wsp., 2009; Thorborg i wsp., 2017).

Nadzór realizacji programu zapewniono poprzez wcześniejsze przeszkolenie trenera oraz niezapowiedziane, losowe wizyty członków zespołu badawczego podczas jednostek treningowych. W trakcie tych kontroli weryfikowano zarówno fakt realizacji programu, jak i poprawność techniczną kluczowych ćwiczeń. Takie podejście minimalizowało ryzyko rozbieżności wykonania zadania przez poszczególne zawodniczki i zwiększało wiarygodność oceny efektów interwencji. W badaniu nie prowadzono jednak pełnego, sesyjnego rejestru dla każdej jednostki — aspekt ten wskazujemy w ograniczeniach.

W odróżnieniu od wymienionych protokołów prewencji trening „KAT” zawierał szereg modyfikacji wynikających z wcześniejszych analiz (art.1 Jaskulski & Starczewski, 2024; art.2 Kapiński, Jaskulski i wsp., 2024). Między innymi włączono do niego elementy treningu sensomotorycznego, ćwiczenia ekscentryczne oraz komponenty propriocepcji – wszystkie ćwiczenia dobrane zostały w celu zmaksymalizowania efektów adaptacyjnych w zakresie kontroli motorycznej i stabilizacji. Istotnym elementem wyróżniającym program „KAT” względem bazowych protokołów (FIFA 11, FIFA 11+ oraz Activate) była obecność ćwiczeń wykonywanych na niestabilnym podłożu, takich jak poduszki sensomotoryczne oraz aktywne wytrącenia z równowagi czy reakcje na szybko zmieniające się komendy. Wprowadzenie tych elementów znacząco zwiększało stopień trudności ćwiczeń, angażując

głęboko położone mięśnie i zwiększając zaangażowanie kontroli posturalnej. Drugą ważną modyfikacją było zastosowanie ruchów jednostronnych i wielopłaszczyznowość – ćwiczenia obejmowały wielokierunkowe skoki i przemieszczenia, wykonywane jedną kończyną, co odpowiada rzeczywistym warunkom boiskowym, w których przeciążenia działają asymetrycznie i w zmiennych kierunkach.

Włączenie ćwiczeń plyometrycznych ze zmiennymi kierunkami ruchu oraz z komponentem opóźnionej reakcji (reakcja na sygnał trenera) miało na celu usprawnienie współpracy układu nerwowego i mięśniowego w sytuacjach dynamicznych, które wiążą się z ryzykiem urazu więzadła krzyżowego przedniego (ACL). Tego rodzaju trening sprzyja poprawie szybkości reakcji na bodźce zewnętrzne, efektywności kontroli motorycznej oraz precyzji ruchów w fazie lądowania. Zgodnie z najnowszymi doniesieniami (Mehl i wsp., 2018; Baena-Raya i wsp., 2020), programy treningowe ukierunkowane na rozwój reaktywności, zwiększenie stabilności dynamicznej oraz aktywizację mięśni głębokich które odgrywają kluczową rolę w zapobieganiu kontuzjom stawu kolanowego u zawodniczek sportów zespołowych.

Jednocześnie program „KAT” został tak zaprojektowany, aby umożliwić jego łatwe dostosowanie do różnych dyscyplin sportowych oraz indywidualnych możliwości i poziomu zaawansowania sportowca. Program treningowy składał się z trzech funkcjonalnych bloków ćwiczeń, ułożonych progresywnie.

Pierwszy blok stanowiły ćwiczenia aktywacyjne i sensomotoryczne, ukierunkowane na stymulację kontroli nerwowo-mięśniowej oraz poprawę równowagi dynamicznej. Zawodniczki rozpoczynały od ćwiczenia równoważnego z piłką — wchodziły na poduszkę sensomotoryczną, łapały i odrzucały piłkę, po czym kontrolowanie schodziły na stabilne podłoże. Następnie realizowano naprzemienne wykroki na poduszkę sensomotoryczną. Jednym z kluczowych zadań był „sięganie jednonóż” (ang. Single Leg Clock Reach) – ćwiczenie polegające na utrzymaniu równowagi na jednej kończynie dolnej i dotykaniu palcami stopy kończyny nie podporowej punktów wyznaczonych na wyobrażonej tarczy zegara. Uzupełnieniem tego segmentu były zadania w parach, np.: jedna z zawodniczek destabilizowała postawę partnerki poprzez naprzemienne przepchnięcia, co wymuszało reakcję równoważną (ćwiczenie typu „testing the partner”).

Drugi segment interwencji zawierał ćwiczenia plyometryczne i koordynacyjne, ukierunkowane na rozwój reaktywności, kontroli fazy lądowania i zdolności adaptacyjnych w dynamicznych sytuacjach boiskowych. W tej części realizowano zeskoki ze skrzyni o wysokości 30 cm z lądowaniem w półprzysiadzie i utrzymaniem pozycji przez 5 sekund, boczne kroki dostawne z nagłą zmianą kierunku na sygnał trenera, a także skoki obunóż w wyznaczonych kierunkach z natychmiastowym powrotem do pozycji wyjściowej. Ćwiczenie typu „skip A” z tupnięciem obunóż miało na celu rozwój rytmu i koordynacji. Jednym z bardziej wymagających zadań były skoki boczne jednonóż z 10-kilogramowym obciążeniem trzymanym przed sobą, które wspierały kontrolę rotacyjną tułowia i stabilność kończyn dolnych. Ćwiczenia te zaprojektowano tak, aby ograniczać niepożądane kompensacje ruchowe, w szczególności nadmierne odchylenia kolan do wewnątrz podczas dynamicznych faz lądowania (czyli na dynamiczne koślawienie stawu kolanowego).

Trzeci blok programu koncentrował się na wzmacnianiu mięśni stabilizujących stawu kończyny dolnej, z uwzględnieniem pracy jednostronnej i działania ekscentrycznego. Realizowano m.in. marsz w bok w półprzysiadzie z gumą oporową założoną poniżej kolan (potocznie zwane „krabiki”; ang. Monster Walk), ćwiczenie ekscentryczne mięśni grupy tylnej uda w opadzie – opad nordycki (ang. Nordic Hamstring Curl), podpór bokiem z unoszeniem i opuszczaniem bioder (ang. Side Plank with Hip Raises) oraz jego trudniejszy wariant: podpór bokiem z odwodzeniem kończyny dolnej ustawionej na podwyższeniu (tzw. Przywodzenie Kopenhaskie; ang. Copenhagen Adduction Exercise). Dodatkowo zastosowano ćwiczenie siłowe w formie martwego ciągu jednonóż z obciążeniem 10 kg trzymanym po stronie przeciwnej do kończyny podporowej (ang. Single-leg Romanian Deadlift – RDL). W ramach ostatnich zadań w parach realizowano ćwiczenia z oporem generowanym przez partnerkę, ukierunkowane na aktywację mięśni stabilizujących w wielu płaszczyznach oraz pobudzanie reakcji antygravitacyjnych. Zwieńczeniem bloku była izometryczna stabilizacja kończyny dolnej z asystą – zawodniczka, siedząc w siadzie prostym, unosiła piętę około 10 cm nad podłogę, utrzymując kolano w zablokowanej pozycji wyprostnej. Partnerka wywierała nacisk na piętę w losowych kierunkach, zmieniając kąt i siłę docisku co 2–3 sekundy, zmuszając ćwiczącą do reaktywnej stabilizacji. Po około 1–2 minutach ćwiczenia na jedną kończynę następowała zamiana ról.

Celem kompleksowego założenia programu „KAT” nie była wyłącznie prewencja urazów, ale także optymalizacja kontroli motorycznej i przygotowanie zawodniczek

do obciążeń charakterystycznych dla sportów zespołowych – takich jak nagłe przyspieszenia, gwałtowne zmiany kierunku biegu, lądowania po skoku czy walka o pozycję. Program miał stanowić uniwersalną platformę treningową, która – dzięki modularnej budowie i możliwości skalowania – może być łatwo dostosowana do różnych dyscyplin, poziomów zaawansowania i celów treningowych.

### **3.2.4. Analiza wpływu treningu „KAT” na stabilność posturalną i momenty sił mięśniowych zawodniczek Rugby-7 (art. 3)**

W badaniu oceniającym wpływ autorskiego treningu „KAT” - czyli ośmiotygodniowego programu sensomotorycznego na siłę mięśniową i stabilność posturalną zawodniczek Rugby-7, zastosowano dwa główne obszary pomiarowe: ocenę momentów siły mięśniowej kończyn dolnych oraz stabilografię.

Pomiar momentów siły mięśniowej (torque) stawów biodrowych, kolanowych i skokowo-goleniowych wykonano metodą maksymalnego dowolnego skurczu mięśni (MVC – Maximum Voluntary Contraction) przy użyciu stanowiska pomiarowego JBA Staniak). Uczestniczki były instruowane, aby przez 3 sekundy generować maksymalny wysiłek przeciwko uchwytowi lub belce pomiarowej. W celu zapewnienia prawidłowej pozycji i eliminacji kompensacji, każdą zawodniczkę stabilizowano za pomocą rolki przylegającej w okolicy kolca biodrowego przedniego górnego oraz od tyłu na wysokości odcinka lędźwiowego kręgosłupa. Kończyny górne uczestniczek były skrzyżowane na klatce piersiowej. Po wykonaniu prób rejestrowano najwyższą wartość (szczytową), która była podstawą do dalszych analiz. Każda pozycja testowa obejmowała 3 próby MVC z przerwami pomiędzy podejściami.

Pomiarów dokonywano zgodnie z zaleceniami producenta aparatury – w pozycji siedzącej dla mięśni zginaczy stawu biodrowego oraz prostowników podudzia i stopy, a w pozycji leżenia przodem dla mięśni prostowników uda. Rejestracji danych dokonywano za pomocą wzmacniacza tensometrycznego WPT. Ostateczne wyniki przedstawiano zarówno jako wartości absolutne momentu siły [ $N \cdot m$ ], jak i znormalizowane względem masy ciała [ $N \cdot m \cdot kg^{-1}$ ].

Stabilność posturalna została oceniona przy użyciu systemu Biodex Balance System SD

Przeprowadzono trzy protokoły testowe, z których każdy trwał 20 sekund i był oddzielony 10-sekundową przerwą. W teście stabilności posturalnej (PST – Postural Stability Test) zawodniczki przyjmowały pozycję stojącą z kończynami górnymi wzdłuż tułowia, a platforma ustawiona była na poziomie stabilności 12. Testy przeprowadzono zarówno z otwartymi oczami (EO – Eyes Open), jak i zamkniętymi oczami (EC – Eyes Closed). Oceniano następujące wskaźniki stabilności:

$$\text{APSI} = \sqrt{\frac{\sum(0-Y)^2}{N}}$$

$$\text{MLSI} = \sqrt{\frac{\sum(0-X)^2}{N}}$$

$$\text{OSI} = \sqrt{\frac{\sum(0-X)^2 + \sum(0-Y)^2}{N}}$$

Legenda 1.

Y – przemieszczenie w stopniach, od poziomu dla ruchu w płaszczyźnie strzałkowej;

X – przemieszczenie w stopniach, od poziomu dla ruchu w płaszczyźnie czołowej;

N – liczba próbek pomiarowych.

ogólny indeks stabilności (OSI – Overall Stability Index), indeks stabilności przednio-tylnej (APSI – Anterior-Posterior Stability Index) oraz indeks stabilności przyśrodkowo-bocznej (MLSI – Medial-Lateral Stability Index).

Dodatkowo wykonano test ryzyka upadku (FRI – Fall Risk Index), w którym zastosowano sekwencyjne obniżanie poziomu stabilności platformy – najpierw z poziomu 12 do 6, a następnie z 6 do 2. Na podstawie reakcji równoważnych uzyskano wartości indeksu ryzyka upadku, stanowiącego wskaźnik zdolności zawodniczek do utrzymania stabilności na niestabilnym podłożu.

Wysoka wartość wszystkich powyższych indeksów stabilograficznych świadczy o dużych wychyleniach ciała i o problemach z utrzymaniem równowagi.

Warto podkreślić, że w badaniach dotyczących wykorzystania rezonansu magnetycznego i sztucznej inteligencji (art. 2) stabilografię oceniano na AMTI AccuSwayPLUS (zadanie: stanie jednoonóż EO/EC, próby 10 s) natomiast

w badaniu interwencyjnym (art. 3) wykorzystano Biodex Balance System. Oba sposoby mierzą kontrolę posturalną, jednak zadania i wyniki nie są tożsame; interpretację wniosków prowadzimy w ramach danego narzędzia, bez bezpośrednich porównań liczbowych między platformami. Dodatkowo, w protokołach BBS przyjęto 20-sek. próby z 10-sek. przerwami, co zapewniało standardową regenerację między podejściami. Ta różnorodność metod podnosi trafność zewnętrzną wniosków kosztem ich bezpośredniej porównywalności.

### **3.2.5. Ocena wpływu protokołu „KAT” na współczynnik RSI i dynamiczną stabilizację stawów kolanowych (art. 4)**

W badaniu przeprowadzonym wśród zawodniczek Rugby-7 oceniono wpływ ośmiotygodniowego programu „KAT” na wybrane parametry biomechaniczne, ze szczególnym uwzględnieniem współczynnika RSI (Reactive Strength Index) oraz dynamicznego kąta koślawości stawu kolanowego (DKV – Dynamic Knee Valgus). Zarówno przed pomiarami wstępnymi (pre-test), jak i końcowymi (post-test), każda zawodniczka wykonała ustandaryzowaną, nadzorowaną rozgrzewkę w celu ujednolicenia warunków testowych.

Następnie na kończynach dolnych oznaczono punkt orientacyjny – guzowatość kości piszczelowej – przy pomocy czarnego markera, co miało na celu ułatwienie precyzyjnego określenia kąta projekcji w płaszczyźnie czołowej (FPPA – Frontal Plane Projection Angle) podczas analizy wideo.

Brak grupy kontrolnej był świadomym wyborem pragmatycznym, wynikającym z realiów pracy z elitarną, jednorodną kadrą kobiet Rugby-7 jednego klubu (zsynchronizowany kalendarz, ograniczona liczebność, brak możliwości losowego przydziału). W tych warunkach celem było uchwycenie odpowiedzi indywidualnej na wdrożenie programu w realnych warunkach zespołu, co odzwierciedla praktykę, gdy cały zespół adaptuje rozgrzewkę/prewencję. Zastosowany schemat pre–post umożliwił ocenę skutków „KAT” w kontekście funkcjonalnym (RSI, DKV), przy akceptacji ograniczeń wnioskowania przyczynowego. Ten wybór metodyczny i jego uzasadnienie są opisane w publikacji dotyczącej „KAT”.

### a) Pomiar współczynnika RSI (Reactive Strength Index)

Pomiaru dokonano przy użyciu testu zeskoku (Drop Jump DJ), który polegał na zeskoku z drewnianego podestu o wysokości 40 cm, oddalonego o 40 cm od środka platformy dynamometrycznej (JBA Staniak, 80 × 80 cm) z oprogramowaniem MVJ6v0. Po wylądowaniu na obydwu stopach zawodniczki wykonywały natychmiastowy maksymalny wyskok pionowy. RSI wyliczano jako stosunek wysokości wyskoku do czasu kontaktu z podłożem (Metoda 1 porównana w Tabeli 1) (McMahon i wsp., 2021), co odzwierciedlało zdolność generowania siły reaktywnej i kontrolę lądowania (Flanagan & Comyns, 2008).

**Wskaźnik Siły Reaktywnej (RSI)** obliczany jest według następującego wzoru:

$$RSI = \frac{H (m)}{t (s)}$$

gdzie:

H – wysokość skoku (w metrach),

t – czas kontaktu stóp z podłożem (w sekundach).

Każda zawodniczka wykonała trzy próby, z których do dalszej analizy wybrano tę wartość, w której uzyskano największą wysokość wyskoku.

Interpretacja RSI w niniejszej pracy jest kontekstowa: dotyczy testu DJ z 40 cm i populacji kobiet Rugby-7. Wzrost RSI traktujemy jako wskaźnik poprawy wydolności SSC w danym zadaniu, interpretowany łącznie z mechaniką lądowania (DKV) oraz kontrolą posturalną (stabilografia). Nie zakładano liniowej zależności „im wyższy, tym zawsze lepiej” poza kontekstem konkretnego testu i dyscypliny. Takie ujęcie zmniejsza ryzyko nadmiernych uogólnień i lepiej oddaje specyfikę sportu. W praktyce RSI z testu DJ odzwierciedla sprawność cyklu rozciągnięcie–skurcz, czyli zdolność do szybkiego wytworzenia siły po lądowaniu (krótki czas kontaktu przy zachowanej/wyższej wysokości skoku), co przekłada się na ocenę eksplozywności i „ekonomii” kontaktu z podłożem w zadaniach typowych dla Rugby-7.

## **b) Analiza dynamicznego kąta koślawości kolan (DKV)**

W celu ilościowej oceny dynamicznej koślawości kolana (DKV) zastosowano pomiar kąta FPPA (Frontal Plane Projection Angle), który określa ułożenie kończyny dolnej w płaszczyźnie czołowej i pozwala oszacować stopień zapadania się stawu kolanowego do wewnątrz podczas lądowania. Nagrania wideo wykonano przy użyciu smartfonu Samsung Galaxy S20 FE, pracującego w trybie bardzo zwolnionego tempa (ang. super slow motion), a kamera została ustawiona frontalnie w odległości 220 cm od skrzyni. Analiza materiału filmowego została przeprowadzona z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania Dartfish Live w wersji 2024 (Dartfish, Fribourg, Szwajcaria), z dokładnością do 0,01°.

W celu wyznaczenia kąta FPPA rysowano dwie linie: pierwszą — przebiegającą przez środek uda i kończącą się pomiędzy nadkłykiem przyśrodkowym i bocznym kości udowej; oraz drugą — dzielącą goleń na pół i kończącą się między kostką przyśrodkową a boczną. Pomiaru dokonywano na klatce nagrania odpowiadającej maksymalnemu zgięciu stawu kolanowego, bezpośrednio przed fazą wybicia. Procedura ta opierała się na metodyce opisanej przez Miznera i wsp. (2012) oraz Baena-Raya i wsp. (2020), którzy wskazują, że kąt FPPA jest uznanym wskaźnikiem oceny stabilizacji dynamicznej kolana i predyktorem ryzyka uszkodzeń więzadła krzyżowego przedniego (ACL) (Baena-Raya i wsp., 2020; Mizner i wsp., 2012).

### **3.3 Analiza statystyczna**

We wszystkich analizowanych badaniach zastosowano kompleksowe podejście statystyczne, dostosowane do charakteru danych oraz celów badawczych.

W przeglądzie systematycznym (art.1 Jaskulski & Starczewski, 2024), ze względu na charakter badania, który opierał się na analizie literatury naukowej, zastosowano inne podejście metodologiczne — skoncentrowano się na jakościowej ocenie prac źródłowych. Wykorzystano w tym celu ustandaryzowane narzędzia oceny wiarygodności i spójności metodologicznej badań, uwzględniając takie aspekty jak kompletność danych, sposób raportowania wyników, zgodność zastosowanej interwencji z założeniami protokołu badawczego czy adekwatność zastosowanych narzędzi pomiarowych. Szczególną uwagę zwrócono na spójność wyników badań oraz ich przydatność praktyczną, przy czym wiele analizowanych publikacji posługiwało się kwestionariuszem VISA-A jako podstawową miarą

efektu klinicznego. Takie podejście umożliwiło wyciągnięcie syntetycznych wniosków dotyczących skuteczności porównywanych protokołów leczenia, bez konieczności prowadzenia własnych obliczeń statystycznych.

W drugim badaniu (art.2 Kapiński, Jaskulski i wsp. 2024), dotyczącym relacji pomiędzy parametrami strukturalnymi ścięgna Achillesa ocenianymi na podstawie obrazowania metodą rezonansu magnetycznego (MRI), a wynikami testów funkcjonalnych, zastosowano zarówno klasyczne metody korelacyjne, jak i algorytmy uczenia maszynowego. W celu redukcji liczby zmiennych i wyodrębnienia kluczowych parametrów zastosowano analizę głównych składowych (Principal Component Analysis, PCA). W każdej z czterech kategorii funkcjonalnych (siła dynamiczna, stabilność posturalna, zakres ruchomości i momenty siły mięśniowej) wyodrębniono meta-parametry. Składowe główne (PCA) pełnią u nas rolę wskaźników syntetycznych dla czterech obszarów (stabilność posturalna, siła dynamiczna, zakres ruchu, momenty siły). Zbierają powiązane pomiary w jeden, czytelniejszy wynik dla praktyki. Umożliwia to: (1) szybką ocenę profilu zawodniczki w kluczowych obszarach, (2) personalizację akcentów treningowych (np. większy nacisk na propriocepcję przy obniżonym wskaźniku stabilności), (3) monitorowanie zmian w czasie jednym wskaźnikiem zamiast wielu zmiennych oraz (4) ograniczenie liczby porównań wielokrotnych i szumu pomiarowego.

W naszym zbiorze wybrane składowe dla każdego obszaru pomiarowego wyjaśniały łącznie >90% zmienności, co uzasadnia ich użycie w korelacjach/NMI i dalszym modelowaniu ML.

W dalszej analizie zastosowano korelację rang Spearmana (Spearman Rank Correlation) oraz znormalizowaną informację wzajemną (Normalized Mutual Information, NMI) do określenia siły i charakteru związku pomiędzy parametrami strukturalnymi i funkcjonalnymi. Próg istotności statystycznej ustalono na poziomie  $p \leq 0,05$ , a dla NMI zastosowano próg  $\geq 30\%$ .

Na potrzeby predykcji funkcji kończyny dolnej na podstawie obrazu MRI zastosowano również uczenie maszynowe (machine learning). Wykorzystano modele takie jak drzewa decyzyjne (Decision Trees), lasy losowe (Random Forests) oraz automatyczne uczenie się (AutoML) z użyciem biblioteki AutoGluon. W celu zwiększenia rzetelności, modele trenowano przy użyciu 10-krotnej walidacji krzyżowej (10-fold cross-validation). Jako miarę dopasowania modeli przyjęto współczynnik determinacji ( $R^2$ ).

Dodatkowo zastosowano metodę ważności permutacyjnej (Permutation Importance), która umożliwiła ocenę wpływu poszczególnych cech strukturalnych na jakość predykcji. Wszystkie wartości zostały przeskalowane do zakresu 0–1.

W badaniu trzecim (art.3 Jaskulski i wsp. 2024), dotyczącym wpływu treningu „KAT” 8-tygodniowej interwencji sensomotorycznej na stabilność posturalną i siłę mięśniową zawodniczek Rugby-7, zastosowano klasyczne metody statystyczne przy użyciu oprogramowania Statistica v.14 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, USA). Rozkład zmiennych sprawdzano przy użyciu testu Shapiro–Wilka (Shapiro–Wilk Test). Dla danych o rozkładzie normalnym zastosowano test t-Studenta dla prób zależnych (Paired Student’s t-Test), natomiast dla danych niespełniających tego założenia – test rang Wilcoxon. Istotność statystyczną przyjęto na poziomie  $p \leq 0,05$ .

W celu oceny wpływu interwencji na różne zmienne biomechaniczne zastosowano analizę wariancji (Analysis of Variance, ANOVA), a wielkość efektu wyrażono za pomocą współczynnika eta-kwadrat ( $\eta^2$  – Eta Squared). Przyjęto następujące progi interpretacji:  $\eta^2 \geq 0,01$  – efekt mały,  $\eta^2 \geq 0,06$  – efekt średni,  $\eta^2 \geq 0,14$  – efekt duży.

W czwartym badaniu (art.4 Jaskulski i wsp., 2025), analizującym wpływ programu „KAT” na współczynnik RSI (Reactive Strength Index) oraz kąt dynamicznego koślawienia stawów kolanowych (Dynamic Knee Valgus – DKV). Rozkład danych oceniono testem Shapiro–Wilka, a porównania przed i po interwencji wykonano z użyciem testu t-Studenta dla prób zależnych i testu Wilcoxon.

Aby ocenić związek pomiędzy współczynnikiem RSI (Reactive Strength Index) a kątem dynamicznego koślawienia kolana (Dynamic Knee Valgus – DKV), zastosowano analizę korelacji rang Spearmana (Spearman Rank Correlation). Siłę korelacji interpretowano w sposób ilościowy, przyjmując następujące progi: wartości  $r$  w zakresie 0,0–0,1 uznawano za korelację trywialną, 0,1–0,3 za korelację słabą, 0,3–0,5 za umiarkowaną, 0,5–0,7 za silną, 0,7–0,9 za bardzo silną, a 0,9–1,0 za niemal doskonałą. Nadto, przeprowadzono wielokrotną analizę regresji (Multiple Regression Analysis) w celu wskazania zmiennych prognostycznych wpływających na poprawę stabilizacji dynamicznej stawów kolanowych oraz zdolności eksplozywnych kończyn dolnych.

Analiza mocy (post hoc). Z uwagi na liczebność próby w badaniu 4 ( $n = 16$ ) przeprowadzono ocenę mocy testu korelacji rang Spearmana ( $\alpha = 0,05$ , dwustronnie) z wykorzystaniem przybliżenia transformacją Fishera do testu Pearsona na rangach.

Dla istotnej zależności RSI–DKV (prawa KD;  $r_s = -0,69$ ) osiągnięta moc wyniosła  $\approx 0,86$ . Analiza czułości wskazuje, że przy  $n = 16$  do uzyskania mocy  $0,80$  wymagany jest efekt  $|\rho| \approx 0,65$ , natomiast dla efektów umiarkowanych (np.  $r_s \approx 0,35$ ) moc jest niska ( $\approx 0,26-0,30$ ). Wnioski interpretowano łącznie z wielkościami efektu.

Zastosowane metody umożliwiły wieloaspektową analizę danych i wiarygodną ocenę skuteczności interwencji, łącząc podejście klasyczne z nowoczesną analityką danych opartą na sztucznej inteligencji.

## 4. Wyniki

W ramach przeprowadzonych badań uzyskano wyniki oceniające skuteczność zarówno istniejących protokołów terapeutycznych stosowanych w tendinopatii ścięgna Achillesa, jak i autorskiej interwencji treningowej „KAT” w prewencji urazów oraz poprawie zdolności funkcjonalnych kończyn dolnych u zawodniczek Rugby-7.

W przeglądzie systematycznym (art.1: Jaskulski & Starczewski, 2024), obejmującym analizę 12 publikacji zgodnie z wytycznymi PRISMA, porównano skuteczność wybranych protokołów treningowych (Frizziero i wsp., 2014): Alfredsona (Habets i wsp., 2021; Mafi i wsp., 2001; Öhberg i wsp., 2004; Stevens & Tan, 2014), Silbernagel, Stanish (El Hawary i wsp., 1997; Stasinopoulos & Manias, 2013), „do-as-tolerated”, treningu ekscentrycznego oraz treningu siłowego typu HSR (heavy-slow resistance) (Beyer i wsp., 2015; Kim i wsp., 2023). Wyniki analiz wykazały, że wszystkie oceniane protokoły prowadziły do istotnej poprawy funkcji ścięgna oraz redukcji dolegliwości bólowych, mierzonej za pomocą kwestionariusza VISA-A. Chociaż pomiędzy protokołami nie stwierdzono jednoznacznych różnic w zakresie końcowych wartości VISA-A po 12 i 52 tygodniach terapii, zauważono różnice w tempie poprawy oraz poziomie satysfakcji pacjentów. Na przykład w protokołach Alfredsona (Alfredson i wsp., 1998) i „do-as-tolerated” (Stevens & Tan, 2014) odnotowano szybszą poprawę wyników już po trzech tygodniach, natomiast protokół Stanish cechował się wolniejszym, lecz również istotnym wzrostem funkcji klinicznej. W analizie jakościowej ryzyko błędu systematycznego oceniono jako niskie w większości badań, a zastosowanie skali Newcastle-Ottawa pozwoliło potwierdzić ich wysoką wartość metodologiczną.

W badaniu art.2 Kapinskiego, Jaskulski i wsp. (2024), które miało na celu ocenę związku pomiędzy strukturą ścięgna Achillesa (ocenianą za pomocą MRI) a jego funkcją dynamiczną, wykazano, że niektóre parametry obrazowe – takie jak obrzęk ścięgna, pogrubienie, niejednorodność struktury oraz ostrość brzegów – istotnie korelowały z wynikami testów funkcjonalnych (takich jak siła dynamiczna, zakres ruchomości, stabilność posturalna oraz momenty siły mięśniowej). Co istotne, modele predykcyjne oparte na algorytmie AutoGluon osiągnęły najwyższy współczynnik determinacji ( $R^2$ ), wskazując na umiarkowaną skuteczność sztucznej inteligencji w przewidywaniu funkcji

na podstawie struktury, w roli narzędzia wspierającego. W trzech z czterech analizowanych grup funkcjonalnych (z wyjątkiem momentów siły), analiza oparta o oceny strukturalne generowane przez algorytm AI wykazała większą liczbę istotnych zależności niż ocena wykonana przez radiologa.

Największy wpływ na dynamikę siły wywierał obrzęk ścięgna (TE – Tendon Edema), a na parametry stabilograficzne – pogrubienie ścięgna (TT – Tendon Thickening).

W dwóch kolejnych badaniach eksperymentalnych przeprowadzonych na zawodniczkach Rugby-7 art. 3 i 4 oceniono skuteczność programu „KAT” (Knee Armor Training) w poprawie parametrów biomechanicznych i funkcjonalnych kończyn dolnych. Oba badania wykazały statystycznie istotne zmiany w obrębie analizowanych zmiennych. W artykule trzecim (art. 3) (Jaskulski i wsp., 2024), po programie „KAT” - czyli ośmiotygodniowym protokole rozgrzewkowym zawierającym komponenty sensomotoryczne, propriocepcyjne i ekscentryczne, zaobserwowano istotną poprawę stabilności posturalnej w warunkach statycznych i dynamicznych.

Wskaźniki stabilograficzne: OSI oraz MLSI uległy znaczącemu obniżeniu, co świadczy o lepszym panowaniu nad postawą i równowagą. Wskaźnik OSI spadł z 3,2 do 1,7 ( $p = 0,027$ ;  $\eta^2 = 0,302$ ), APSI z 2,9 do 1,3 ( $p = 0,006$ ;  $\eta^2 = 0,482$ ), a MLSI z 2,0 do 0,9 ( $p = 0,009$ ;  $\eta^2 = 0,417$ ). Równolegle istotnie zmniejszyło się ryzyko upadku (FRI – Fall Risk Index) w obu testowanych warunkach – w zakresie 12–6 oraz 6–2 poziomów niestabilności platformy Biodex ( $p = 0,002$  i  $0,001$ ;  $\eta^2 = 0,524$  oraz  $0,727$ ). Oznacza to, że interwencja poprawiała zarówno zdolności adaptacyjne do zmian warunków podparcia, jak i kontrolę nerwowo-mięśniową w warunkach zakłóconych.

Dodatkowo wykazano istotny wzrost siły wybranych grup mięśniowych kończyn dolnych, mierzony metodą MVC. Wzrosły momenty siły zginaczy i prostowników uda oraz zginaczy stopy, z największymi efektami obserwowanymi dla wyprostowania uda ( $p = 0,001$  dla prawej i  $0,014$  dla lewej kończyny;  $\eta^2 = 0,576$  i  $0,361$ ) oraz zgięcia stopy ( $p = 0,03$  i  $0,001$ ;  $\eta^2 = 0,295$  i  $0,540$ ).

W artykule 4 autorstwa Jaskulski i wsp. (art.4) (Jaskulski i wsp., 2025) skupiono się na ocenie współczynnika RSI oraz dynamicznego kąta koślawości stawów kolanowych, mierzonego metodą FPPA. Po interwencji odnotowano istotny wzrost wartości RSI ( $p = 0,0496$ ), co wskazuje na lepszą zdolność generowania siły reaktywnej i efektywniejsze lądowanie. Ponadto wykazano redukcję dynamicznej koślawości

w obu kończynach dolnych, przy czym istotność statystyczna dotyczyła lewej kończyny dolnej ( $p = 0,01$ ), a prawa wykazała trend ( $p = 0,06$ ). W analizie korelacyjnej, wartości RSI w preteście były istotnie negatywnie skorelowane z kątem koślawości kolana prawego ( $r_s = -0,69$ ;  $p < 0,01$ ), co może świadczyć o związku pomiędzy gorszą kontrolą kolana a mniejszą zdolnością do reaktywnego generowania siły. Wyniki post-testów nie wykazały istotnych korelacji.

## 5. Dyskusja

Celem niniejszej pracy było kompleksowe zbadanie możliwości diagnozy oraz skuteczności wybranych interwencji treningowych w poprawie funkcji dynamicznych sportowców, co powinno przełożyć się na zapobieganie urazom kończyny dolnej u sportowców, ze szczególnym uwzględnieniem ścięgna Achillesa oraz stawu kolanowego. Badanie zostało oparte na czterech komplementarnych projektach, z których każdy odpowiadał na odrębne, ale powiązane pytania badawcze.

Przegląd systematyczny (art. 1) wykazał, że zarówno protokoły Alfredsona, Stanish, jak i Silbernagel przynoszą porównywalną poprawę objawów klinicznych mierzonych przy pomocy wskaźnika VISA-A, choć nie stwierdzono wyraźnej przewagi jednego podejścia nad drugim. Wyniki sugerują, że kluczowym czynnikiem jest odpowiednia dawka i intensywność treningu ekscentrycznego, co znajduje potwierdzenie w badaniach Stevens i Tan (2014), a także Beyer i wsp. (2015), którzy wykazali, że zarówno ekscentryczny trening (ECC), jak i kontrolowany trening oporowy (HSR – ang. Heavy Slow Resistance) mają podobną skuteczność w długofalowym leczeniu tendinopatii Achillesa (Beyer i wsp., 2015; Stevens & Tan, 2014). Co ciekawe, autorzy zalecają rozważenie łączenia protokołów Alfredsona i Stanish, co może przynieść lepsze rezultaty kliniczne (Cannell i wsp., 2001; Stasinopoulos & Manias, 2013).

Ważnym ograniczeniem tej części pracy była jednak niespójność danych źródłowych oraz subiektywność stosowanych narzędzi (np. VISA-A), które są zależne od deklaracji pacjentów. Z tego względu podkreśla się potrzebę wdrażania bardziej obiektywnych metod oceny, jak np. AI wspomagana analiza MRI, co stanowiło przedmiot kolejnego badania.

Badanie Kapińskiego, Jaskulskiego i wsp. (2024) dostarczyło nowatorskiego podejścia do tej kwestii, łącząc obrazowanie MRI z metodami sztucznej inteligencji, w celu predykcji parametrów funkcjonalnych. Zastosowanie nowoczesnych sekwencji w MRI oraz algorytmów AutoGluon pozwoliło na identyfikację nieliniowych relacji między cechami strukturalnymi ścięgna (np. obrzęk, pogrubienie, jednolitość) a takimi parametrami jak siła mięśniowa, stabilność posturalna czy zakresy ruchomości (Kapiński i wsp., 2024).

Szczególnie interesujący był fakt, że modele AI osiągały wyższe wartości wyjaśnionej wariancji (33–59%) niż oceny dokonywane przez radiologów (6–20%), co wskazuje na wynik lepszy od oceny radiologów, ale o zasięgu umiarkowanym; traktujemy je jako wsparcie decyzji, a nie narzędzie samodzielne (Gan i wsp., 2019). Wyniki są zgodne z literaturą pokazującą

przewagę sztucznej inteligencji w diagnostyce obrazowej narządu ruchu (Olczak i wsp., 2017; Ramkumar i wsp., 2022) oraz z hipotezą o przewadze AI nad klasyczną oceną radiologiczną w przewidywaniu wskaźników funkcji. Sugeruje to, że połączenie zaawansowanych technik MRI z automatycznym przetwarzaniem danych może być użyteczne nie tylko w kontekście diagnozy urazów, ale również jako narzędzie przesiewowe w ocenie ryzyka kontuzji u sportowców przed wystąpieniem objawów.

Jak zaznaczono również w badaniach Szaro i wsp. (2021) oraz Murphy i wsp. (2024), zmiany strukturalne w ścięgnie (np. wzrost średnicy, obecność zmian degeneracyjnych) są bezpośrednio powiązane ze spadkiem jego sztywności i siły, co wpływa negatywnie na zdolność do przenoszenia obciążeń dynamicznych (Murphy i wsp., 2024; Szaro & Ghali Gataa, 2021). Włączenie oceny obciążeń dynamicznych do rutynowego monitorowania sportowców może zatem stanowić klucz do wczesnej prewencji urazów.

W badaniu Jaskulski i wsp. (2024) zaobserwowano istotną poprawę w zakresie parametrów równowagi i kontroli posturalnej, po zastosowaniu ośmiotygodniowego programu „KAT”, opartego m.in. na ćwiczeniach propriocepcyjnych i ekscentrycznych. Wskaźniki takie jak OSI, APSI, MLSI oraz FRI uległy statystycznie istotnemu obniżeniu, co wskazuje na lepszą stabilizację, zarówno w warunkach statycznych, jak i dynamicznych.

Podobne rezultaty uzyskali autorzy – Attwood i wsp. (2018) odnotowali redukcję liczby kontuzji kończyn dolnych o 40% oraz wstrząśnięć mózgu o 60%, po wdrożeniu programu Activate u zawodników rugby (Attwood i wsp., 2018). Steffen i wsp. wykazali, że częstotliwość stosowania specjalistycznych protokołów (minimum 3 razy w tygodniu) koreluje ze zmniejszeniem liczby kontuzji (Steffen i wsp., 2013).

Warto zaznaczyć, że nie wszystkie programy wykazują podobną skuteczność. Przykładowo, w badaniach Cochrane i wsp. (2017), po sześciu tygodniach treningu nie uzyskano wzrostu siły mięśniowej u zawodników rugby, co tłumaczono zbyt niską intensywnością ćwiczeń opartych wyłącznie na ciężarze własnego ciała (Cochrane i wsp., 2017). W badaniach własnych wykazano, że dobrze dobrana intensywność oraz obecność ćwiczeń z oporem (np. taśmy oporowe, partner stawiający opór) zwiększają skuteczność treningu.

Dodatkowo, wykazano istotny wzrost momentów sił mięśni prostujących i zginających udo w stawie biodrowym oraz mięśni zginających stopę, co ma istotne znaczenie dla kontroli miednicy i prewencji koślawienia stawów kolanowych – jednego z głównych czynników

ryzyka uszkodzenia ACL. Wyniki te są zgodne z badaniami Lee i wsp., którzy wskazali, że niska siła mięśni kulszowo-goleniowych (poniżej 2,4 Nm/kg) pięciokrotnie zwiększa ryzyko kontuzji tej grupy mięśni (Lee i wsp., 2018). Także badania Krosshaug i wsp. potwierdzają, że osłabienie mięśni prostujących udo wiąże się z większym kątem dynamicznej koślawości (DKV), co z kolei koreluje ze wzrostem ryzyka urazów ACL u kobiet (Krosshaug i wsp., 2007).

W badaniu art.4 Jaskulski i wsp. (Jaskulski i wsp. 2025) stwierdzono istotną poprawę wskaźnika siły reaktywnej (RSI) po zakończeniu programu „KAT” ( $p = 0,0496$ ), co potwierdza wzrost zdolności do reaktywnego generowania siły – kluczowego parametru w ruchach takich jak lądowanie, przyspieszenie czy zmiana kierunku. Poprawa RSI wskazuje na lepsze wykorzystanie cyklu rozciągnięcie-skurcz (SSC), będącego podstawą efektywności skoków i sprintów (Faude i wsp., 2017).

Program treningowy przyczynił się również do zmniejszenia kąta dynamicznej koślawości (DKV). Redukcja tej zmiennej, istotna statystycznie dla lewej kończyny ( $p = 0,01$ ), świadczy o poprawie kontroli stawów kolanowych i prawdopodobnie oznacza obniżone ryzyko urazów tego stawu, szczególnie więzadła krzyżowego przedniego (ACL). Podobne wyniki osiągnęła interwencja „KneeRugbyWoman” prowadzona w klubach rugby w Czechach, gdzie również zaobserwowano wzrost RSI po 12 tygodniach (Sikora i wsp., 2023).

Warto również zauważyć, że średnie wartości RSI zawodniczek z Polski w badaniu własnym, ( $RSI = 14$ ) przed interwencją były zaskakująco niskie i plasowały się w grupie najniższej sprawności – co potwierdzało niedostateczne przygotowanie motoryczne nawet do ćwiczeń o umiarkowanej intensywności (Flanagan & Comyns, 2008). Po zakończeniu programu wszystkie zawodniczki mieściły się już w zakresie normatywnym określonym przez Herringtona ( $\max = 12,5^\circ$  dla kąta DKV), co uznać należy za sukces treningowy (Herrington & Munro, 2010).

Zintegrowane wyniki badań zawartych w tej pracy pozwalają sformułować spójne wnioski praktyczne dotyczące strategii prewencji urazów u sportowców wysokiego ryzyka, w szczególności zawodniczek uprawiających sporty zespołowe o wysokim obciążeniu dynamicznym, takie jak Rugby-7.

Zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji w ocenie struktury ścięgna Achillesa za pomocą MRI (Kapiński, Jaskulski i wsp. 2024) pozwoliło na precyzyjniejsze

zidentyfikowanie parametrów strukturalnych istotnych dla funkcji motorycznych – takich jak siła, równowaga czy zakres ruchu. Modele AI, w porównaniu z ocenami radiologicznymi, wykazały wyższą skuteczność w identyfikacji związków między strukturą a funkcją, wyjaśniając nawet 59% zmienności wyników funkcjonalnych (Siriwanarangsun i wsp., 2016).

Takie podejście daje nadzieję na rozwój systemów przesiewowych, umożliwiających identyfikację sportowców o podwyższonym ryzyku kontuzji jeszcze przed pojawieniem się objawów klinicznych. Zastosowanie krótkiej sekwencji MRI (T2\* GRE) oraz automatycznych modeli oceny struktur ścięgniastych, mogłoby w przyszłości umożliwić rutynowe badania populacyjne w środowisku klubowym czy akademickim. Tego typu rozwiązania byłyby nie tylko efektywne kosztowo, ale również szybkie i bardziej obiektywne niż klasyczna diagnostyka kliniczna, bazująca na doświadczeniu lekarza (Gan i wsp., 2019).

Z drugiej strony, interwencje treningowe – takie jak program „KAT” – stanowią praktyczne narzędzie profilaktyki, które może być wdrożone niezależnie od poziomu technologicznego zaplecza. Ich skuteczność została potwierdzona zarówno w kontekście poprawy funkcjonalnej (DKV, RSI), jak i siły oraz stabilności posturalnej. Dzięki modularnej strukturze, ćwiczenia mogą być dostosowywane do innych dyscyplin sportowych, takich jak siatkówka, koszykówka, piłka ręczna czy lekkoatletyka, gdzie obciążenia kończyn dolnych i ryzyko uszkodzeń ACL są równie wysokie.

Warto podkreślić, że podobne programy prewencyjne, jak FIFA 11+, wykazały skuteczność w redukcji urazów nawet o 50% u piłkarek nożnych (Soligard i wsp., 2009), natomiast inne próby ich implementacji w takich dyscyplinach jak futbol amerykański czy koszykówka przyniosły jedynie częściowy efekt (Longo i wsp., 2012; Slauterbeck i wsp., 2019). Świadczy to o konieczności dostosowania programu nie tylko do dyscypliny, ale również do specyfiki populacji, płci i poziomu wytrenowania. Program „KAT” został opracowany z uwzględnieniem ćwiczeń ekscentrycznych, zadań propriocepcyjnych w różnych płaszczyznach ruchu oraz reaktywnych form treningu równowagi – co czyni go kompleksowym narzędziem wspierającym prewencję urazów.

Podsumowując, przyszłość skutecznej prewencji urazów leży w synergii: nowoczesne technologie (AI + MRI) mogą służyć jako narzędzie wczesnej diagnostyki ryzyka, podczas gdy dobrze przemyślane interwencje treningowe – takie jak „KAT” – mogą

odpowiadać na zidentyfikowane deficyty i przeciwdziałać wystąpieniu kontuzji. W dłuższej perspektywie takie podejście może przyczynić się do znacznego ograniczenia kosztów leczenia, skrócenia czasu przerw treningowych oraz wydłużenia kariery zawodników.

## 6. Wnioski

Łącznie, wyniki uzyskane w ramach tej pracy potwierdzają, że:

- ✓ **Treningi ekscentryczne mogą być** skuteczne w poprawie funkcji i zmniejszaniu bólu u osób z tendinopatią ścięgna Achillesa
- ✓ **Nowoczesne metody analizy MRI i algorytmy AI** dostarczają cennych informacji o relacji struktura–funkcja i mogą być pomocne w ocenie radiologicznej, co wskazuje na możliwości wykorzystania AI w diagnostyce.
- ✓ Ocena struktury ścięgna w MRI wspierana przez AI może być wsparciem dla radiologów w podejmowaniu decyzji.
- ✓ **Program „KAT”**, oparty na zasadach prewencji FIFA-11+ i Activate, może poprawiać zarówno stabilność posturalną, jak i dynamiczną kontrolę stawów kolanowych, przyczyniając się do redukcji ryzyka urazów.
- ✓ **Zintegrowane podejście** do diagnostyki i treningu powinno być wdrażane w praktyce sportowej, stanowiąc możliwy fundament skutecznych programów prewencyjnych.

Wnioski te wspierają potrzebę dalszego rozwoju systemów diagnostycznych opartych na sztucznej inteligencji oraz wprowadzania sprawdzonych, funkcjonalnych programów treningowych do codziennego planu treningowego sportowców zawodowych.

## 7. Ograniczenia badań

Niniejsza rozprawa syntetyzuje przegląd systematyczny oraz trzy badania empiryczne dotyczące diagnostyki i interwencji w obrębie układu ruchu, realizowane w zróżnicowanych warunkach pomiarowych i treningowych. Takie ujęcie zwiększa trafność zewnętrzną wniosków, ale jednocześnie nakłada ograniczenia, które należy uwzględnić przy interpretacji wyników i formułowaniu zaleceń praktycznych.

W części interwencyjnej przyjęto układ pre–post w jednorodnej, elitarnej kohorcie zawodniczek Rugby-7 jednego klubu, bez równoległej grupy kontrolnej. Rozwiązanie to dobrze odzwierciedla realne warunki wdrażania programu prewencyjno-sensomotorycznego w sporcie wyczynowym, jednak ogranicza siłę wnioskowania przyczynowego i dopuszcza wpływ współwystępujących bodźców (np. zmiany obciążeń treningowych, mikro-urazy, kalendarz startów). Z tego względu wnioski odnosimy do badanej populacji i kontekstu organizacyjnego, podkreślając potrzebę przyszłych badań z losowym przydziałem lub kontrolą klastrową na poziomie zespołów. Jest to typowe ograniczenie badań wstępnych i bywa wprost wymieniane w literaturze jako główne źródło zagrożeń dla trafności wewnętrznej (m.in. dojrzewanie, historia, selekcja); zgodnie z dobrymi praktykami ograniczenia należy nazwać, objaśnić ich implikacje oraz wskazać alternatywy i kroki łagodzące (u nas: ujednoczenie protokołu, stały harmonogram, raportowanie wielkości efektu), a w kolejnych etapach zastosować kontrolę (Vorveg-Gall i wsp., 2023; Ross i wsp., 2019).

Analizę efektów programu „KAT” przeprowadzono w jednej dyscyplinie i jednej elitarnej kohorcie (zawodniczki Rugby-7 jednego klubu), co zawęża możliwość uogólniania wyników. Wnioski odnosimy w pierwszej kolejności do sportów o zbliżonym profilu obciążeń (kontakt, sprint–stop, skoki/zmiany kierunku); replikacja w innych dyscyplinach będzie konieczna, aby ocenić transferowalność efektów.

Realizację programu Knee Armor Training „KAT” zapewniono poprzez przeszkolenie personelu i okresową kontrolę wdrożenia w trakcie jednostek treningowych. Choć takie postępowanie zmniejsza ryzyko rozbieżności wykonania i wzmacnia wiarygodność obserwowanych efektów, nie zastępuje ono pełnego, ciągłego monitoringu zgodności na poziomie każdej sesji (np. checklisty, sesji monitorowanej lub współuczestniczącej,

próbki wideo). Brak pełnej ewidencji zgodności ogranicza możliwość jednoznacznego przypisania odnotowanych zmian wyłącznie jakości realizacji programu.

W niniejszej analizie nie uwzględniono zmiennych psychologicznych zawodniczek ani czynników edukacyjnych po stronie trenerów, które mogą wpływać na wykonanie programu i utrzymanie uzyskanych efektów. W kolejnych etapach planuje się uzupełnienie tych czynników, aby ocenić ich wpływ na wyniki interwencji.

W procedurach oceny funkcji zastosowano różne narzędzia stabilograficzne: w części obrazowej rejestrowano kontrolę posturalną na platformie AMTI w zadaniu stania jedno nogi (krótkie próby), natomiast w badaniu interwencyjnym wykorzystano Biodex Balance System w teście Postural Stability (dłuższe próby, wskaźniki OSI/APSI/MLSI oraz Fall Risk Index). Oba rozwiązania mierzą ten sam konstrukt, lecz w odmiennych warunkach, co utrudnia bezpośrednie zestawianie wartości liczbowych między platformami. Interpretacja została zatem świadomie ograniczona do porównań wewnątrz danego narzędzia oraz do oceny kierunku zmian, a nie ich prostego zestawienia.

Ocena DKV była oparta o analizę 2D (FPPA) z rejestracją frontalną. Metoda ta jest praktyczna i dobrze ugruntowana klinicznie, lecz – z definicji – nie odwzorowuje komponentów rotacyjnych i złożonych odchylenia w płaszczyźnie poprzecznej, które byłyby widoczne w analizie 3D. Z tego powodu interpretujemy wyniki DKV łącznie z innymi wskaźnikami funkcji (RSI, stabilografia) i w granicach specyficznego zadania (drop jump) oraz badanej populacji.

W pomiarach MVC stosowano krótkie, maksymalne skurcze izometryczne i raportowano wartości szczytowe. Długość przerw pomiędzy próbami nie była dokumentowana analitycznie w sposób pozwalający na precyzyjne oszacowanie wpływu zmęczenia na wynik, co zwłaszcza w przypadku dużych grup mięśniowych mogło prowadzić do zaniżenia wartości szczytowych i zwiększenia zmienności. W przyszłych pracach należałoby przyjąć dłuższe przerwy o z góry określonej długości oraz rozważyć raportowanie średniej z co najmniej trzech powtórzeń, uzupełnione o test–retest i wskaźniki powtarzalności.

Część obrazowa opierała się na dwóch skanerach (3T i 1.5T). Standaryzacja sekwencji i organizacja pomiarów minimalizowały różnice, jednak różnorodność sprzętowa może zwiększać wariancję sygnału i ograniczać bezpośrednią porównywalność części danych.

Modele uczenia maszynowego budowano i oceniano na danych jednego ośrodka; możliwość uogólnienia wyników wymaga walidacji zewnętrznej na niezależnych zbiorach oraz sprawdzenia powtarzalności rezultatów w kolejnych pomiarach i ośrodkach.

Zakres analiz obejmował wiele wskaźników funkcjonalnych (m.in. RSI, DKV, OSI/APSI/MLSI, Fall Risk Index, MVC), co zwiększa ryzyko przypadkowej istotności. W syntezie wyników podajemy przedziały ufności i stosujemy korekty za wielokrotne porównania, pamiętając, że istotność statystyczna nie zawsze oznacza znaczenie kliniczne. Dlatego akcentujemy wielkość efektów i interpretujemy je w odniesieniu do realiów dyscypliny oraz powtarzalności pomiaru.

Zakres wniosków jest ograniczony charakterystyką specyficznej próby: elitarne zawodniczki Rugby-7 o określonym profilu obciążeń i zadaniach testowych. Zastosowanie tych wniosków w innych dyscyplinach, na różnych poziomach zaawansowania oraz u mężczyzn wymaga potwierdzenia w badaniach na szerszych populacjach i w odmiennych protokołach.

Podsumowując, zaprojektowane badania dostarczają spójnych dowodów na użyteczność zaproponowanych narzędzi diagnostycznych i rozwiązań treningowych w specyficznym środowisku sportu wyczynowego. Zasadne wydaje się kontynuowanie badań na większej grupie uczestników, przy uwzględnieniu ograniczeń, co przyczyni się do pogłębienia rozumienia badanego problemu.

## SPIS PIŚMIENICTWA

1. Alfredson, H., Pietilä, T., & Lorentzon, R. (1998). Heavy-Load Eccentric Calf Muscle Training For the Treatment of Chronic Achilles Tendinosis. *AM J Sports Med.* 26(3):360-6 <https://doi.org/10.1177/03635465980260030301>
2. Alghamdi, N. H., Pohlig, R. T., Sions, J. M., & Silbernagel, K. G. (2022). Differences at the Achilles Insertion Between Adults with Insertional and Midportion Achilles Tendinopathy as Observed Using Ultrasound. *Muscles, Ligaments and Tendons Journal*, 12(2), 115–121. <https://doi.org/10.32098/mltj.02.2022.04>
3. Arkkukangas, M., Bååthe, K. S., Ekholm, A., & Tonkonogi, M. (2021). a 10-week judo-based exercise programme improves physical functions such as balance, strength and falling techniques in working age adults. *BMC Public Health*, 21(1), 744. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-10775-z>
4. Attwood, M. J., Roberts, S. P., Trewartha, G., England, M. E., & Stokes, K. A. (2018). Efficacy of a movement control injury prevention programme in adult men’s community rugby union: a cluster randomised controlled trial. *British Journal of Sports Medicine*, 52(6), 368–374. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-098005>
5. Baena-Raya, A., Sánchez-López, S., Rodríguez-Pérez, M. A., García-Ramos, A., & Jiménez-Reyes, P. (2020). Effects of two drop-jump protocols with different volumes on vertical jump performance and its association with the force–velocity profile. *European Journal of Applied Physiology*, 120(2), 317–324. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04276-6>
6. Bahr, R., & Krosshaug, T. (2005). Understanding injury mechanisms: a key component of preventing injuries in sport. In *British Journal of Sports Medicine* (Vol. 39, Issue 6, pp. 324–329). <https://doi.org/10.1136/bjism.2005.018341>
7. Barden, C., Hancock, M. V, Stokes, K. A., Roberts, S. P., & McKay, C. D. (2022). Effectiveness of the Activate injury prevention exercise programme to prevent injury in schoolboy rugby union. *British Journal of Sports Medicine*, 56(14), 812. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2021-105170>
8. Beyer, R., Kongsgaard, M., Hougs Kjær, B., Øhlenschläger, T., Kjær, M., & Magnusson, S. P. (2015). Heavy slow resistance versus eccentric training as treatment for achilles tendinopathy: a randomized controlled trial. *American Journal of Sports Medicine*, 43(7), 1704–1711. <https://doi.org/10.1177/0363546515584760>
9. Brito, J., Figueiredo, P., Fernandes, L., Seabra, A., Soares, J. M., Krustup, P., & Rebelo, A. (2010). Isokinetic strength effects of FIFA’s “the 11+” injury prevention training programme. *Isokinetics and Exercise Science*, 18(4), 211–215.

<https://doi.org/10.3233/IES-2010-0386>

10. Bukry, S. A., Justine, M., Azidin, R. M. F. R., Azhar, N. I., Zolkafı, M. A. A., Lo, C. N., & Manaf, H. (2024). Effects of the FIFA 11+ injury prevention programme on muscle strength and landing biomechanical markers of ACL injury during fatigue among youth soccer players. *Biomedical Human Kinetics*, 16(1), 173–184.  
<https://doi.org/10.2478/bhk-2024-0018>
11. Cannell, L. J., Taunton, J. E., Clement, D. B., Smith, C., & Khan, K. M. (2001). a randomised clinical trial of the efficacy of drop squats or leg extension/leg curl exercises to treat clinically diagnosed jumper’s knee in athletes: pilot study. *British Journal of Sports Medicine*, 35(1), 60–64.  
<https://doi.org/10.1136/BJSM.35.1.60>
12. Cesar, G. M., Tomasevicz, C. L., & Burnfield, J. M. (2016). Frontal plane comparison between drop jump and vertical jump: implications for the assessment of ACL risk of injury. *Sports Biomechanics*, 15(4), 440–449.  
<https://doi.org/10.1080/14763141.2016.1174286>
13. Cochrane, D. J., Harnett, M. C., & Pinfold, S. C. (2017). Does short-term gluteal activation enhance muscle performance? *Research in Sports Medicine*, 25(2), 156–165.  
<https://doi.org/10.1080/15438627.2017.1282358>
14. Colclough, A., Munro, A. G., Herrington, L. C., McMahon, J. J., & Comfort, P. (2018). The effects of a four week jump-training program on frontal plane projection angle in female gymnasts. *Physical Therapy in Sport*, 30, 29–33. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2017.11.003>
15. El Hawary, R., Stanish, W. D., & Curwin, S. L. (1997). Rehabilitation of tendon injuries in sport. *Sports Medicine*, 24(5), 347–358.  
<https://doi.org/10.2165/00007256-199724050-00006/METRICS>
16. ETTY Griffin, L. Y. (2003). Neuromuscular Training and Injury Prevention in Sports. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 409, 53–60.  
<https://doi.org/10.1097/01.blo.0000057788.10364.aa>
17. Faude, O., Rössler, R., Petushek, E. J., Roth, R., Zahner, L., & Donath, L. (2017). Neuromuscular adaptations to multimodal injury prevention programs in youth sports: a systematic review with meta-analysis of randomized controlled trials. In *Frontiers in Physiology* (Vol. 8, Issue OCT). Frontiers Media S.A.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00791>
18. Flanagan, E. P., & Comyns, T. M. (2008). The Use of Contact Time and the Reactive Strength Index to Optimize Fast Stretch-Shortening Cycle Training. *Strength and Conditioning Journal*, 30(5).  
[www.nasca-lift.org](http://www.nasca-lift.org)

19. Frizziero, A., Trainito, S., Oliva, F., Nicoli Aldini, N., Masiero, S., & Maffulli, N. (2014). The role of eccentric exercise in sport injuries rehabilitation. *British Medical Bulletin*, 110(1), 47–75.  
<https://doi.org/10.1093/bmb/ldu006>
20. Gan, K., Xu, D., Lin, Y., Shen, Y., Zhang, T., Hu, K., Zhou, K., Bi, M., Pan, L., Wu, W., & Liu, Y. (2019). Artificial intelligence detection of distal radius fractures: a comparison between the convolutional neural network and professional assessments. *Acta Orthopaedica*, 90(4), 394–400.  
<https://doi.org/10.1080/17453674.2019.1600125>
21. Gerhardt, A. L. Von, Reurink, G., Kerkhoffs, G. M. M. J., Verhagen, E., Krabben, K., Mooren, J., Gal, J. S. I., Brons, A., Joorse, R., Broek, B. Van Den, Kemler, E., & Tol, J. L. (2023). Effectiveness of a judo-specific injury prevention programme: a randomised controlled trial in recreational judo athletes. *British Journal of Sports Medicine*, 57(8), 450–456.  
<https://doi.org/10.1136/BJSPORTS-2022-105869>
22. Gidu, D. V., Badau, D., Stoica, M., Aron, A., Focan, G., Monea, D., Stoica, A. M., & Calota, N. D. (2022). The Effects of Proprioceptive Training on Balance, Strength, Agility and Dribbling in Adolescent Male Soccer Players. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19, 2028.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph19042028>
23. Gomes Neto, M., Conceição, C. S., De Lima Brasileiro, A. J. A., De Sousa, C. S., Carvalho, V. O., & De Jesus, F. L. A. (2017). Effects of the FIFA 11 training program on injury prevention and performance in football players: a systematic review and meta-analysis. In *Clinical Rehabilitation* (Vol. 31, Issue 5, pp. 651–659). SAGE Publications Ltd.  
<https://doi.org/10.1177/0269215516675906>
24. Grävare Silbernagel, K., Brorsson, A., & Lundberg, M. (2011). The majority of patients with Achilles tendinopathy recover fully when treated with exercise alone: a 5-year follow-up. *The American Journal of Sports Medicine*, 39(3), 607–613.  
<https://doi.org/10.1177/0363546510384789>
25. Habets, B., van Cingel, R. E. H., Backx, F. J. G., van Elten, H. J., Zuithoff, P., & Huisstede, B. M. A. (2021). No Difference in Clinical Effects When Comparing Alfredson Eccentric and Silbernagel Combined Concentric-Eccentric Loading in Achilles Tendinopathy: a Randomized Controlled Trial. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 9(10), 1–10.  
<https://doi.org/10.1177/23259671211031254>
26. Haller, N., Kranzinger, S., Kranzinger, C., Blumkaitis, J. C., Strepp, T., Simon, P., Tomaskovic, A., O'brien, J., Düring, M., & Stöggel, T. (2023). Predicting Injury and Illness with Machine Learning in Elite Youth Soccer: a Comprehensive Monitoring Approach over 3 Months. *Journal of Sports Science and Medicine*, 22(3), 475–486.  
<https://doi.org/10.52082/jssm.2023.475>

27. Herrington, L., & Munro, A. (2010). Drop jump landing knee valgus angle; normative data in a physically active population. *Physical Therapy in Sport*, 11(2), 56–59.  
<https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2009.11.004>
28. Hewett, T. E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2006). Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: Part 1, mechanisms and risk factors. In *American Journal of Sports Medicine* (Vol. 34, Issue 2, pp. 299–311).  
<https://doi.org/10.1177/0363546505284183>
29. Jaskulski, K., Bobowik, P., Wysoczański, B., & Starczewski, M. (2024). 8-week additional sensomotoric warm-up drills improves motor performance and postural stability in high-performance female Rugby-7 players. *Acta Kinesiologica*, 18(N4 2024), 72–78.  
<https://doi.org/10.51371/issn.1840-2976.2024.18.4.9>
30. Jaskulski, K., & Starczewski, M. (2024). a Systematic Review Evaluating Diagnosis Methods and Treatment Protocols for Achilles Tendinopathy. *Acta Kinesiologica*, N3 2024, 17–26.  
<https://doi.org/10.51371/issn.1840-2976.2024.18.3.03>
31. Kapinski, N., Jaskulski, K., Witkowska, J., Kozłowski, A., Adamczyk, P., Wysoczanski, B., Zdrodowska, A., Niemaszyk, A., Ciszowska-Lyson, B., & Starczewski, M. (2024). Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning Approach. *Sports Medicine - Open*, 10(1).  
<https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>
32. Kapinski, N., Nowosielski, J. M., Marchwiany, M. E., Zielinski, J., Ciszowska-Lyson, B., Borucki, B. A., Trzcinski, T., & Nowinski, K. S. (2019). Late fusion of deep learning and hand-crafted features for Achilles tendon healing monitoring. <http://arxiv.org/abs/1909.05687>
33. Kapinski, N., Zielinski, J., Borucki, B. A., Trzcinski, T., Ciszowska-Lyson, B., & Nowinski, K. S. (2018). Estimating achilles tendon healing progress with convolutional neural networks. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11071 LNCS, 949–957.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-00934-2\\_105](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00934-2_105)
34. Kapiński, N., Zieliński, J., Borucki, B. A., Trzcński, T., Ciszowska-lysoń, B., Zdanowicz, U., Śmigielski, R., & Nowiński, K. S. (2019). Monitoring of the achilles tendon healing process: Can artificial intelligence be helpful? *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 21(1), 103–111.  
<https://doi.org/10.5277/ABB-01240-2018-04>
35. Kim, M. H., Lin, C. I., Henschke, J., Quarmby, A., Engel, T., & Cassel, M. (2023). Effects of exercise treatment on functional outcome parameters in mid-portion achilles tendinopathy: a systematic review. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5(May).  
<https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1144484>

36. Krosshaug, T., Nakamae, A., Boden, B. P., Engebretsen, L., Smith, G., Slauterbeck, J. R., Hewett, T. E., & Bahr, R. (2007). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: Video analysis of 39 cases. *American Journal of Sports Medicine*, 35(3), 359–367. <https://doi.org/10.1177/0363546506293899>
37. Lauersen, J. B., Andersen, T. E., & Andersen, L. B. (2018). Strength training as superior, dose-dependent and safe prevention of acute and overuse sports injuries: a systematic review, qualitative analysis and meta-analysis. In *British Journal of Sports Medicine* (Vol. 52, Issue 24, pp. 1557–1563). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099078>
38. Lauersen, J. B., Bertelsen, D. M., & Andersen, L. B. (2014). The effectiveness of exercise interventions to prevent sports injuries: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. In *British Journal of Sports Medicine* (Vol. 48, Issue 11, pp. 871–877). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092538>
39. Lee, J. W. Y., Mok, K. M., Chan, H. C. K., Yung, P. S. H., & Chan, K. M. (2018). Eccentric hamstring strength deficit and poor hamstring-to-quadriceps ratio are risk factors for hamstring strain injury in football: a prospective study of 146 professional players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(8), 789–793. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.11.017>
40. Longo, U. G., Loppini, M., Berton, A., Marinozzi, A., Maffulli, N., & Denaro, V. (2012). The FIFA 11+ program is effective in preventing injuries in elite male basketball players: a cluster randomized controlled trial. *American Journal of Sports Medicine*, 40(5), 996–1005. <https://doi.org/10.1177/0363546512438761>
41. Maffulli, N., King, J. B., Migliorini, F., Chan, O., Padhiar, N., & Spiezia, F. (2024). Diagnosis and management of Achilles tendon ailments: the Scottish mist. In *Journal of Orthopaedic Surgery and Research* (Vol. 19, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s13018-024-04560-y>
42. Mafi, N., Lorentzon, R., & Alfredson, H. (2001). Superior short-term results with eccentric calf muscle training compared to concentric training in a randomized prospective multicenter study on patients with chronic Achilles tendinosis. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 9(1), 42–47. <https://doi.org/10.1007/S001670000148/METRICS>
43. McMahon, J. J., Suchomel, T. J., Lake, J. P., & Comfort, P. (2021). RELATIONSHIP BETWEEN REACTIVE STRENGTH INDEX VARIANTS IN RUGBY LEAGUE PLAYERS. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(1). <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002462>

44. Mehl, J., Diermeier, T., Herbst, · Elmar, Imhoff, A. B., Stoffels, T., Zantop, · Thore, Petersen, · Wolf, & Achtnich, A. (2018a). Evidence-based concepts for prevention of knee and ACL injuries. 2017 guidelines of the ligament committee of the German Knee Society (DKG). 138, 51–61.  
<https://doi.org/10.1007/s00402-017-2809-5>
45. Mehl, J., Diermeier, T., Herbst, E., Imhoff, A. B., Stoffels, T., Zantop, T., Petersen, W., & Achtnich, A. (2018b). Evidence-based concepts for prevention of knee and ACL injuries. 2017 guidelines of the ligament committee of the German Knee Society (DKG). *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 138(1), 51–61.  
<https://doi.org/10.1007/s00402-017-2809-5>
46. Mizner, R. L., Chmielewski, T. L., Toepke, J. J., & Tofte, K. B. (2012). Comparison of 2-Dimensional Measurement Techniques for Predicting Knee Angle and Moment During a Drop Vertical Jump. In *Clin J Sport Med* (Vol. 22).  
<http://rsb.info.nih.gov/ij/>
47. Montalvo, A. M., Schneider, D. K., Yut, L., Webster, K. E., Beynnon, B., Kocher, M. S., & Myer, G. D. (2019). “What’s my risk of sustaining an ACL injury while playing sports?” a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med*, 53, 1003–1012.  
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096274>
48. Murphy, M. C., Newsham-West, R., Cook, J., Chimenti, R. L., de Vos, R. J., Maffulli, N., Malliaras, P., Mkumbuzi, N., Purdam, C., Vosseller, J. T., & Rio, E. K. (2024). TENDINopathy Severity Assessment – Achilles (TENDINS-A): Development and Content Validity Assessment of a New Patient-Reported Outcome Measure for Achilles Tendinopathy. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 54(1), 70–85.  
<https://doi.org/10.2519/jospt.2023.11964>
49. Myer, G. D., Ford, K. R., Paterno, M. V., Nick, T. G., & Hewett, T. E. (2008). The effects of generalized joint laxity on risk of anterior cruciate ligament injury in young female athletes. *American Journal of Sports Medicine*, 36(6), 1073–1080.  
<https://doi.org/10.1177/0363546507313572>
50. O’Brien, J., Dalen-Lorentsen, T., & Harøy, J. (2025). Refining the recipe or spoiling the broth? Reframing perceptions of programme adaptation in sports injury prevention. *British Journal of Sports Medicine*, 59(2), 76.  
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2024-108270>
51. O’Brien, J., Finch, C. F., Pruna, R., & McCall, A. (2019). a new model for injury prevention in team sports: the Team-sport Injury Prevention (TIP) cycle. In *Science and Medicine in Football* (Vol. 3, Issue 1, pp. 77–80). Taylor and Francis Ltd.  
<https://doi.org/10.1080/24733938.2018.1512752>

52. O'Brien, J., Santner, E., & Kröll, J. (2021). Moving beyond one-size-fits-all approaches to injury prevention: Evaluating how tailored injury prevention programs are developed and implemented in academy soccer. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 51(9), 432–439.  
<https://doi.org/10.2519/jospt.2021.10513>
53. Öhberg, L., Lorentzon, R., & Alfredson, H. (2004). Eccentric training in patients with chronic Achilles tendinosis: normalised tendon structure and decreased thickness at follow up. *British Journal of Sports Medicine*, 38(1), 8–11.  
<https://doi.org/10.1136/BJSM.2001.000284>
54. Olczak, J., Fahlberg, N., Maki, A., Razavian, A. S., Jilert, A., Stark, A., Sköldenberg, O., & Gordon, M. (2017). Artificial intelligence for analyzing orthopedic trauma radiographs: Deep learning algorithms—are they on par with humans for diagnosing fractures? *Acta Orthopaedica*, 88(6), 581–586.  
<https://doi.org/10.1080/17453674.2017.1344459>
55. Phipps, A., Enyart, M., Akca, F., & Ewert, A. (2018). The Comparison of Postural Balance Level between Advanced Sport Climbers and Sedentary Adults Effect of Soccer Specific Balance Training on Soccer Technical Ability View project. 7(3), 1–9.  
<https://doi.org/10.30472/ijaep.v7i3.226>
56. Planckaert, G., Burssens, A., Stappers, F., Coudenys, J., Demolder, S., Kaya, I., Van der Linden, M., Gonçalves, A., Lemeire, K., Pavie, B., Van Ovost, E., Burssens, P., Vanhaecke, A., Van Dorpe, J., Pringels, L., Wezenbeek, E., Snedeker, J., De Bock, K., Bonar, F., ... Gracey, E. (2025). AI-driven histologic analysis of human Achilles tendinopathy provides a roadmap to unravel pathogenesis. *Annals of the Rheumatic Diseases*.  
<https://doi.org/10.1016/J.ARD.2025.01.027>
57. Prudêncio, D. A., Maffulli, N., Migliorini, F., Serafim, T. T., Nunes, L. F., Sanada, L. S., & Okubo, R. (2023). Eccentric exercise is more effective than other exercises in the treatment of mid-portion Achilles tendinopathy: systematic review and meta-analysis. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 15(1).  
<https://doi.org/10.1186/s13102-023-00618-2>
58. Ramkumar, P. N., Luu, B. C., Haerberle, H. S., Karnuta, J. M., Nwachukwu, B. U., & Williams, R. J. (2022). Sports Medicine and Artificial Intelligence: a Primer. *American Journal of Sports Medicine*, 50(4), 1166–1174.  
<https://doi.org/10.1177/03635465211008648>
59. Rawat, N., Agarwal, S., & Anwar, U. (2024). Judo 9+ injury prevention protocol (J9+IPP) on bal... *Comparative Exercise Physiology*, 20(3), 257–262.  
<https://doi.org/10.1163/17552559-00001035>

60. Redler, L. H., Watling, J. P., Dennis, E. R., Swart, E., & Ahmad, C. S. (2016). Reliability of a field-based drop vertical jump screening test for ACL injury risk assessment. *Physician and Sportsmedicine*, 44(1), 46–52.  
<https://doi.org/10.1080/00913847.2016.1131107>
61. Rhodes, D., Leather, M., Birdsall, D., & Alexander, J. (2021). The Effect of Proprioceptive Training on Directional Dynamic Stabilization. *Journal of Sport Rehabilitation*, 30(2), 248–254.  
<https://doi.org/10.1123/jsr.2019-0346>
62. Rizaan Behardien, M., Ganda, J., Dane, K., & Hendricks, S. (2024). Paving the path for injury prevention in rugby-7s: a systematic review and meta-analysis. 16.  
<https://doi.org/10.1002/ejsc.12156>
63. Rodríguez, C., Echegoyen, S., & Aoyama, T. (2018). The effects of “prevent injury and enhance performance program” in a female soccer team. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 58(5), 659–663.  
<https://doi.org/10.23736/S0022-4707.17.07024-4>
64. Rostami, M., Sedaghati, P., & Daneshmandi, H. (2024). The effectiveness of the STOP-X training program on the knee valgus angle and balance in female basketball players with dynamic knee valgus: a randomized controlled trial. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 16(1).  
<https://doi.org/10.1186/s13102-024-00844-2>
65. Santacaterina, F., Miccinilli, S., Bressi, F., Sterzi, S., & Bravi, M. (2021). An Overview of Achilles Tendinopathy Management. *Osteology*, 1(4), 175–186.  
<https://doi.org/10.3390/osteology1040017>
66. Sikora, O., Lehnert, M., Hanzlíková, I., & Hughes, J. (2023). The Impact of a Novel Neuromuscular Training Program on Leg Stiffness, Reactive Strength, and Landing Biomechanics in Amateur Female Rugby Players. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(3).  
<https://doi.org/10.3390/app13031979>
67. Siriwanarangsun, P., Statum, S., Biswas, R., Bae, W. C., & Chung, C. B. (2016). Ultrashort time to echo magnetic resonance techniques for the musculoskeletal system. In *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery (Vol. 6, Issue 6, pp. 731–743)*. AME Publishing Company.  
<https://doi.org/10.21037/qims.2016.12.06>
68. Slauterbeck, J. R., Choquette, R., Tourville, T. W., Krug, M., Mandelbaum, B. R., Vacek, P., & Beynon, B. D. (2019). Implementation of the FIFA 11+ Injury Prevention Program by High School Athletic Teams Did Not Reduce Lower Extremity Injuries: a Cluster Randomized Controlled Trial. *American Journal of Sports Medicine*, 47(12), 2844–2852.  
<https://doi.org/10.1177/0363546519873270>
69. Soligard, T., Myklebust, G., Steffen, K., Holme, I., Silvers, H., Bizzini, M., Junge, A., Dvorak, J., Bahr, R., & Andersen, T. E. (2009). Comprehensive warm-up programme to prevent injuries

in young female footballers: Cluster randomised controlled trial. *BMJ (Online)*, 338(7686), 95–99.

<https://doi.org/10.1136/bmj.a2469>

70. Stasinopoulos, D., & Manias, P. (2013). Comparing two eccentric exercise programmes for the management of Achilles tendinopathy. a pilot trial. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 17(3), 309–315.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2012.11.003>
71. Steffen, K., Emery, C. A., Romiti, M., Kang, J., Bizzini, M., Dvorak, J., Finch, C. F., & Meeuwisse, W. H. (2013). High adherence to a neuromuscular injury prevention programme (FIFA 11+) improves functional balance and reduces injury risk in Canadian youth female football players: a cluster randomised trial. *British Journal of Sports Medicine*, 47(12), 794–802.  
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091886>
72. Stevens, M., & Tan, C. W. (2014). Effectiveness of the Alfredson protocol compared with a lower repetition-volume protocol for midportion Achilles tendinopathy: a randomized controlled trial. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 44(2), 59–67.  
<https://doi.org/10.2519/JOSPT.2014.4720>
73. Szaro, P., & Ghali Gataa, K. (2021). The correlations between dimensions of the normal tendon and tendinopathy changed Achilles tendon in routine magnetic resonance imaging. *Scientific Reports*, 11(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-85604-9>
74. Wang, H., Ji, Z., Jiang, G., Liu, W., & Jiao, X. (2016). Correlation among proprioception, muscle strength, and balance. *Journal of Physical Therapy Science*, 28(12), 3468–3472.  
<https://doi.org/10.1589/jpts.28.3468>
75. Webster, K. E., Hewett, T. E., & Feller, J. A. (2021). Anterior Cruciate Ligament Injuries in Australian Rules Football: Incidence, Prevention and Return to Play Outcomes. *Open Access Journal of Sports Medicine*, 12, 33–41.  
<https://doi.org/10.2147/OAJSM.S250414>
76. Willson, J. D., & Davis, I. S. (2008). Utility of the Frontal Plane Projection Angle in Females With Patellofemoral Pain. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 38(10), 606–615.  
<https://doi.org/10.2519/jospt.2008.2706>
77. World Medical Association declaration of Helsinki: Ethical principles for medical research involving human subjects. (2013). In *JAMA* (Vol. 310, Issue 20, pp. 2191–2194). American Medical Association.  
<https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>
78. Zhou, L., Gong, W., Wang, S., Guo, Z., Liu, M., Chuang, S., Bao, D., & Zhou, J. (2022). Combined balance and plyometric training enhances knee function, but not proprioception of

- elite male badminton players: a pilot randomized controlled study. *Frontiers in Psychology*, 13.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.947877>
79. Zubrod, C. J., & Barrett, M. F. (2007). Magnetic Resonance Imaging of Tendon and Ligament Injuries. *Clinical Techniques in Equine Practice*, 6(3), 217–229.  
<https://doi.org/10.1053/j.ctep.2007.08.008>
80. Vorwerg-Gall, S., Stamm, O., & Haink, M. (2023). Virtual reality exergame in older patients with hypertension: a preliminary study to determine load intensity and blood pressure. *BMC Geriatrics*, 23, 527.  
<https://doi.org/10.1186/s12877-023-04245-x>
81. Ross, P. T., & Bibler Zaidi, N. L. (2019). Limited by our limitations. *Perspectives on Medical Education*, 8(4), 261–264.  
<https://doi.org/10.1007/s40037-019-00530-x>

**Prace będące podstawą rozprawy doktorskiej (załączniki):**

Artykuł: A Systematic Review Evaluating Diagnosis Methods and Treatment Protocols for Achilles

Artykuł: Towards Achilles Tendon Injury Prevention in Athletes with Structural MRI Biomarkers: a Machine Learning

Artykuł: 8-week additional sensomotoric warm-up drills improves motor performance and postural stability in high-performance female Rugby-7 players.

Artykuł: Knee Armor Training Program: An 8-Week Sensorimotor Approach to Reducing Knee Injury Risk in Women's Rugby

# A Systematic Review Evaluating Diagnosis Methods and Treatment Protocols for Achilles Tendinopathy

Jaskulski Karol<sup>a</sup>, Starczewski Michal<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Faculty of Rehabilitation, Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Poland

**Purpose:** Diagnosis and treatment protocols for Achilles tendinopathy can be categorized into various groups. However, their effectiveness varies depending on managing and reducing pain. Therefore, this systematic review analyzes and evaluates the diagnosis methods and compares treatment protocols' effectiveness for Achilles tendinopathy.

**Methods:** A systematic review was performed by searching six electronic databases: PubMed, Cochrane Library, Web of Science, Embase, MEDLINE Ovid, and ProQuest, which were searched for articles on the diagnosis and treatment protocols for Achilles tendinopathy. The studies that met the inclusion criteria were evaluated, and appropriate data was extracted.

**Results:** The ten articles that met the inclusion criteria were included in the study. Evidence from the review showed that the Alfredson protocol had a higher pain and function improvement compared to the Stanish protocol, with a higher VISA-A score in the Alfredson than the Stanish protocol. The findings showed that combining the Alfredson eccentric exercise and Stanish Stretching exercises would significantly improve pain and function for patients with Midportion Achilles tendinopathy. This result showed that both protocols significantly improve pain and function in Achilles tendinopathy patients. Similarly, HSR and ECC showed no significant statistical difference in the VISA-A (Victorian Institute of Sport Assessment-Achilles) scores.

**Conclusions:** HSR is more favorable than ECC, while Alfredson is superior to the Stanish protocol. The VISA-A scores in Alfredson versus Silbernagel and ECC versus HSR did not provide any significant statistical difference between the groups. Alfredson and Silbernagel protocols and ECC and HSR show similar results in reducing pain.

**Keywords:** Silbernagel, Alfredson, HSR, Stanish, Tendon, training, conservative treatment.

## Introduction

The Achilles tendon is the regularly injured tendon in the ankle and foot, mostly associated with athletic/sports activities.<sup>1</sup> Achilles tendinopathy incidence rate is at least 2 per 1000 individuals in general medical care, and its cumulative incidence rate can escalate to at least 50% in certain populations, such as marathon runners and jumping athletes.<sup>2-5</sup> The injury can affect the midportion<sup>5</sup> or distal insertion of the tendon due to its overload nature.<sup>2</sup> Handling tendinopathy is challenging, especially with metabolic conditions increasing in the population<sup>6</sup>, thereby necessitating effective diagnostic and treatment methods. Outcome, measured by patient satisfaction using eccentric exercises, such as Alfredson, Silbernagel, ECC or HSR varies from 26.7% to 111% in different studies.<sup>7-10</sup>

Diagnostic methods for tendinopathy can be categorized into clinical tests and imaging.<sup>11,12</sup> The clinical tests include The Royal London Test, The Arc sign, and Palpation.<sup>11</sup> On the other hand, imaging methods include ultrasound<sup>5</sup>, MRI (magnetic resonance imaging), and radiography.<sup>12</sup> Diagnostic methods are essential since, for successful treatment of Achilles tendinopathy, the diagnosis must be done accurately and timely. Despite several diagnostic tests (clinical examination, imaging, and clinical tests), it is difficult to identify the exact diagnosis and symptoms. Medical history and physical examinations are the main ways of diagnosing Achilles tendinopathy. The three main clinical examination measures used in Achilles tendinopathy are the Royal London Hospital test, palpation, and arch sign.<sup>13,14</sup> Royal London Hospital test (RLHT) is usually performed

on a patient in a prone position with the foot at the edge of a bench and the ankle located neutrally.<sup>13</sup> The test involves the determination of tenderness by palpating the Achilles tendon. The tenderness spot is analyzed by palpating in maximum ankle plantar flexion and ankle maximum dorsiflexion.<sup>15</sup> The test is considered positive for Achilles tendinopathy if the maximum ankle dorsiflexion pain is absent in the tenderness spot.<sup>16</sup> According to Reiman et al., the test has 54% sensitivity and 86% specificity.<sup>14</sup>

Palpation involves gently feeling the whole tendon length, squeezing the tendon proximally to distally, between the thumb and the index finger.<sup>15,17</sup> If the patient reports pain, the test is positive for Achilles tendinopathy. The test has a sensitivity and specificity of 64 and 81%, respectively.<sup>14</sup> Conversely, the arc test involves the patient being positioned the same way as in the RLHT.<sup>14,16,18</sup> Localized tendon thickening is usually searched by palpating the tendon in a distal to proximal direction. If the swollen area moves with the movement in the ankle, the test is considered positive for Achilles tendinopathy.<sup>18</sup> The sensitivity and specificity of the test are 42% and 88%, respectively.<sup>14</sup>

The diagnostic assessment of the Achilles tendon via the imaging modalities includes conventional ultrasonography, magnetic resonance imaging (MRI), and radiography.<sup>19,20</sup> Achilles tendon imaging is crucial in diagnosing and evaluating patients with clinical findings and symptoms of the alleged Achilles origin. However, the MRI, not a dynamic imaging modality, may not be adequately reliable in determining tears in the Achilles tendon.<sup>19</sup> Therefore, ultrasonography is more effective for identifying tears on tendons. On the other hand, radiography is essential in

treatment planning.<sup>20</sup> Furthermore, the identification of tendon swelling and increased soft tissue density in the Kager's fat pad is easily identifiable using radiography. Radiography is also a superior imaging modality in confirming the presence or absence of pre-existing Tendinopathy.<sup>20</sup>

Despite the historical description that Achilles tendinopathy is an inflammatory condition, recent studies have shown that Achilles tendinopathy is a failed tendon healing response with less inflammatory influence.<sup>12,21</sup> Several treatment protocols, such as eccentric<sup>22</sup> exercise, splinting, and orthoses, have been found beneficial in countering Achilles tendinopathy.<sup>23,24</sup> However, a recent narrative review shows that eccentric exercise therapy, especially the Alfredson protocol, is essential in treating mid-portion Achilles tendinopathy.<sup>21</sup> The Alfredson protocol involves eccentrically loading the plantar flexor muscle-tendon by performing heel drops on the injured side. The protocol prompts the patient to perform a total of 180 repetitions daily.<sup>25,26</sup> The patients are usually required to carry on with the exercises despite experiencing pain and can only stop if the pain becomes unbearable. On the other hand, Stevens and Tan's (2014) study shows that the "do-as-tolerated" eccentric protocol improves pain and function as opposed to the Alfredson protocol.<sup>25</sup> However, the protocol was lacking regarding the follow-up since it was only conducted for six weeks.

The other protocol the patients perceive to be beneficial is the Silbernagel protocol.<sup>13,27</sup> This protocol involves the concentric and later plyometric loading of the Achilles tendon, crucial in most sport activities.<sup>8</sup> The patients consider this protocol over Alfredson because the exercises are only done once daily.<sup>27</sup> Due to this, patients are encouraged to comply with the training exercises; thus, a better outcome is achieved. Additionally, the restoration of concentric muscular deficits is improved by combining the concentric and eccentric loading exercises. Additionally, heavy loading resistance protocol involves using high loads upon the tendon.<sup>28</sup> This exercise ensures the tendon is subjected to greater volumes of manageable loading (70 - 80%).<sup>28</sup> All these protocols and diagnostic methods are vital in treating and managing Achilles tendinopathy; however, their effectiveness varies. Therefore, this study aims to evaluate the diagnostic ways of appraising Achilles tendinopathy and its treatment protocols to establish the most effective techniques. The study will primarily focus on the non-surgical treatment protocols for Achilles tendinopathy.

## Methods

### Eligibility criteria

The inclusion and exclusion criteria were executed to identify the relevant studies that evaluated Alfredson, Silbernagel, "do-as-tolerated", Stanish, heavy loading resistance and eccentric training treatment protocols for Achilles tendinopathy. The studies were eligible for inclusion if they:

1. Described the diagnosis and treatment of non-insertional Achilles tendinopathy
2. Targeted a population Aged 18 years and above to evaluate their effectiveness among adults. The criterion was specifically significant due to the VISA-A questionnaire outcome measurement, which necessitates adult consent.
3. Conducted the treatment protocol on patients with symptoms lasting more than three months
4. Studies published from 2012 onwards include updated records evaluating diagnostic and treatment methods for tendinopathy.

On the other hand, studies were excluded as per the following criteria:

1. Studies in languages other than English to avoid direct translation of scientific terms.
2. Studies that focused on Achilles tendonitis and in vitro or animal studies
3. Studies that reported the operational treatment of Achilles tendinopathy
4. Studies that provided data from less than ten patients since the results did not provide sufficient comparison for the systematic review.

### Information sources and literature search

A sensitive strategy on multiple electronic databases was conducted per the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis) guidelines.<sup>29</sup> The electronic databases searched included Embase, MEDLINE Ovid, Web of Science, Cochrane Library, PubMed, and ProQuest. The "Advanced Search" tab in the Cochrane Library, PubMed, and other electronic databases was used in a search algorithm that allowed the use of "OR" and "AND" operators. The keywords used in the search for studies are Alfredson protocol, Eccentric training, Achilles Tendinopathy, clinical tests and imaging tests. The following is a detailed search strategy that was used:

*((Tendinopathy) AND "Achilles tendon") OR "Achilles tendon" AND (tendinopathy\* OR tendinosis\* OR tendonitis OR pain OR injury)) OR achillodynia\*)) AND (Alfredson protocol OR Eccentric training OR Silbernagel OR Stanish OR clinical tests OR imaging tests) NOT (Animals/ NOT Humans/))*

The reference lists from the included studies were also searched to widen the scope of the database literature search.

### Data extraction

Two reviewers were tasked with extracting relevant data. The reviewers analyzed the articles by PICO (Patient, Population or Problem; Intervention, Comparison, and Outcome) consensus. Any discrepancy was resolved through consultation with another reviewer. The extracted information included study ID (author(s) and year), setting (location), participants characteristics, study design, diagnosis and treatment methods, and main outcomes (i.e., pain scores (VISA-A) before the treatment protocol). For this systematic review, the main treatment protocols identified were Alfredson, Silbernagel, "do-as-tolerated," Stanish, heavy loading resistance, and eccentric training. The studies involving these treatment protocols were separately grouped and analyzed to evaluate the protocols' effectiveness in treating and managing Achilles tendinopathy.

### Quality Assessment and risk of bias assessment

The review included both randomized controlled trials and one retrospective study design. A risk of bias assessment was performed for randomized controlled trials using the RoB 2 tool provided by Cochrane.<sup>30</sup> The assessed domains were missing outcome data, selection of the reported result, randomization process, outcome measurement, and deviations from the intended interventions. After assessing each domain, the risk of bias judgment was overall made and categorized as either "high," "some concern," or "low risk."<sup>30</sup> A Newcastle-Ottawa Scale (NOS) was used for quality assessment for the retrospective study. The scale evaluated three domains: comparability, selection, and outcomes. For each criterion used in these domains, a maximum of one star was given when the assessment information was well documented in the studies; otherwise, no star was given.

## Results

While performing an initial search towards the diagnosis and treatment protocols of Achilles tendinopathy, 2300 relevant records were retrieved (Figure 1). Screening for duplicate articles, 1250 records were eliminated. Additionally, based on the eligibility criteria, from the 155 studies retrieved, 143 were excluded. Forty excluded studies were non-English studies, five were in-vitro studies, 46 focused on Achilles tendonitis, 30 had less than 10 participants as patients, and 24 of the studies conducted trials on patients less than 18 years old.

### Study Characteristics

In the diagnosis of Achilles tendinopathy, two studies showed the comparison between MRI and Ultrasound.<sup>31,32</sup> Two studies focused on clinical tests and Imaging for Achilles tendinopathy diagnosis.<sup>16,33</sup> One study entirely focused on clinical tests.<sup>16</sup> On the other hand, one study entirely focused on the Alfredson protocol for the treatment protocols.<sup>34</sup> The other four studies compared the "do-as-tolerated" protocol,<sup>25</sup> Alfredson and Silbernagel protocol,<sup>26</sup> Alfredson and Stanish protocol,<sup>35</sup> and eccentric training, and heavy slow protocol.<sup>36</sup>

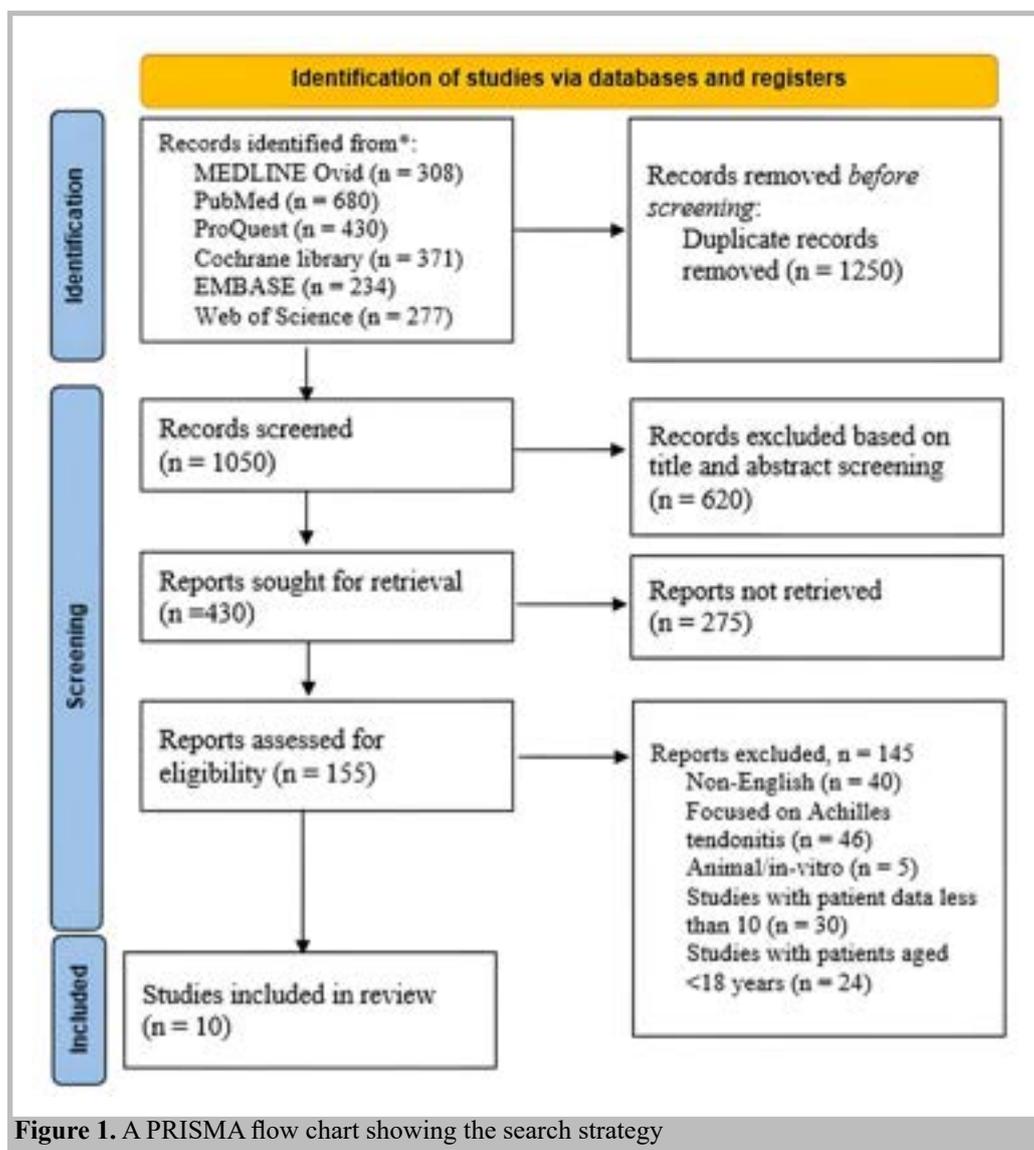


Figure 1. A PRISMA flow chart showing the search strategy

### Risk of Bias and Quality Assessment outcome

All the studies except one<sup>35</sup> had a low risk of bias with some concerns about outcome data (Figures 2 & 3).

The quality of the study<sup>31</sup> was generally fair, as shown in Table 3.

### Comparison of Achilles Tendinopathy Treatment Protocols

#### i. Alfredson versus "do-as-tolerated" Protocols

According to Stevens and Tan, based on the intention-to-treat and per-protocol analyses, there was no statistically significant difference between the VISA-A and VAS pain scores between the "do-as-tolerated" and Alfredson standard group after a 6-week intervention.<sup>25</sup> However, the VISA-A scores at three weeks showed a statistically significant difference. Additionally,

the study shows that after a 12-week eccentric exercise program (Alfredson Protocol), the pain scores improved (i.e., the VISA-A score improved to 11.5).<sup>25</sup> Stevens and Tan (2014) showed that the VISA-A scores in the "do-as-tolerated" had significantly improved (15.0 points based on MCID) in the third week.<sup>25</sup> This significant change in the VISA-A score was attributed to the decrement of VISA-A scores in the Alfredson standard group.

The VAS scores showed no significant changes between the Alfredson standard group and the "do-as-tolerated" at the end of the 2<sup>nd</sup> or 6<sup>th</sup> week.<sup>25</sup> The do-as-tolerated regimen cannot be considered less effective than the Alfredson protocol because the upper limits of 95% CIs correspond to a lower reduction in pain for the do-as-tolerated group. However, the lower limits of the 95% CIs show a significant possibility for the do-as-tolerated protocol to reduce pain. The study by Stevens and Tan<sup>16</sup> shows

**Table 1.** Diagnosis methods for Achilles tendinopathy.

Study ID	Study design	participants	Diagnosis method (s)	Main outcomes
Johannsen et al., 2022 <sup>28</sup>	RCT	100 patients	Ultrasonography corticosteroid	Ultrasonography-guided corticosteroids combined with exercises were linked to better outcomes (17.7-point VIS-A score) in Achilles tendinopathy treatment compared to placebo injections combined with exercise therapy.
Hutchison et al., 2013 <sup>9</sup>	RCT	21 subjects	Clinical tests (Palpation, Arc sign)	The findings showed an accurate diagnosis of Achilles tendinopathy were crepitus (specificity 100%, PPV 1.00), The Arc Sign (specificity 100%, PPV 1.00), and The Royal London Test (specificity 93%, PPV .88).
Kim et al., 2021 <sup>22</sup>	Retrospective	77 participants (28 males and 49 females) were used for the study. Mean age: 51.7 years	Ultrasonography	Ultrasonography was discovered to have the highest diagnostic accuracy in diagnosing insertional and mid-portion Achilles tendinopathy. MRI was also found to be superior to ultrasonography in the detection of incomplete tendon ruptures.
Albano et al., 2017 <sup>23</sup>	RCT	43 patients aged 47.6±5.10	Ultrasound & MRI	Both MRI and ultrasound allow for clinical benefit linked with tendon size and power Doppler signal increase. However, MRI cannot be utilized as a clinical outcome predictor.
Dirrichs et al., 2018 <sup>24</sup>	RCT	35 patients	SWE & ultrasound	SWE can predict tendon healing processes, unlike ultrasound. Similarly, it is more useful in monitoring treatment effects.

Note: RCT – randomized control trial; LRT – London Royal test; MRI – magnetic resonance imaging; SWE – shear wave elastography

that at the end of 6 weeks, there is no statistical difference in the VAS and VISA-A scored for the Alfredson and "do-as-tolerated" groups. However, at the end of the 6 weeks, both groups' pain scores had improved significantly.

The patient satisfaction with the treatment protocols was assessed at the end of the 6-week follow-up period. The results showed that 5 participants (38.4%) in the "do-as-tolerated group" and 4 participants in the Alfredson Standard group expressed excellent satisfaction.<sup>25</sup> Moreover, none of the participants from either group expressed poor satisfaction. The study did not provide any significant correlation between the satisfaction ratings and changes in VAS and VISA-A scores.

#### ii. Alfredson versus Stanish exercise Protocols

According to Stasinopoulos and Manias' study, the baseline VISA-A showed no significant difference between the Alfredson and Stanish protocol groups at the beginning of the trial.<sup>35</sup> However, by the end of the 12<sup>th</sup> week, a significant rise in the VISA-A scores for both groups was observed, i.e., the VISA-A score for Alfredson rose to 40 units and 25 units for the Stanish protocol.

#### iii. Alfredson versus Silbernagel protocols

From the Analyses of the VISA-A scores in the study by Habets et al.,<sup>26</sup> there was no significant statistical difference between the Alfredson and Silbernagel group, i.e., After the one-year follow-up period, the VISA-A score in the Alfredson group rose to 89.4±13.0 a.u., and in the Silbernagel group it rose to 83.2±22.5 a.u.<sup>26</sup> This improvement in the VISA-A score was concurrent

with the clinical reports for Alfredson and Silbernagel loading protocols for midportion Achilles tendinopathy patients. Additionally, the study shows that the collected and analyzed data proved clinical symptoms were significantly improved in both the Silbernagel and Alfredson groups. However, the study could significantly improve the clinical improvement for both Silbernagel and Alfredson Group. Some interesting findings in the QOL and GPE (Global Perceived Effect) were found. During the 1-year follow-up period, the QOL in both groups improved significantly, with very few patients reporting mobility and pain problems. The results, however, showed that in the Silbernagel Group, more patients reported issues concerning depression compared to the Alfredson Group. Compared to the earlier findings (12 weeks), the number of patients in the Silbernagel Group that were considered to have improved was larger than that in the Alfredson Group. This significant change was attributed to age differences in both groups, i.e., Individuals in the Alfredson Group were younger than those in the Silbernagel Group. Since age is associated with patients' expectations, the study hypothesized that less satisfaction expressed by individuals in the Alfredson Group was due to their higher expectations. This hypothesis can, however, be considered speculative because the Age differences in the study are limited.

#### iv. Eccentric Training Protocol versus Heavy Slow Resistance Protocol

From the data Analyses by Beyer et al.,<sup>36</sup> there were no significant differences in the VISA-A scores in both groups, i.e.,

**Table 2.** Treatment protocols for Achilles tendinopathy.

Study ID	Study design	Participants	Duration of Symptoms	Treatment protocol	Follow-up period (weeks)	VISA-A increase at the follow-up period	Satisfaction	Main Outcomes
Stevens & Tan, 2014 <sup>16</sup>	RCT	28 (11 men and 17 women). Age was greater than 18.	> 6 months	Alfredson eccentric-exercise & "Do-as-tolerated"	6	15.4 $\pm$ 9.3 for "Do as tolerated" and 9.1 $\pm$ 14.9 for Alfredson	38.4% of do-as-tolerated and 26.7% of Alfredson participants reported excellent satisfaction. No patient reported poor satisfaction in either group	A significant improvement was observed in both groups at the end of the 6-week follow-up. i.e., there was no significant statistical difference in the VISA-A scores for both groups
Stasinopoulos & Manias, 2013 <sup>26</sup>	RCT	41 patients aged 35 to 55 years	> 3 months	Alfredson & Stanish exercise	12	40 unit rise in the Alfredson program and 25 in the Stanish group	-	The Alfredson program was found to have significantly improved function and reduced Calf muscle pain compared to the Stanish exercise protocol. The low-speed exercise observed in Alfredson protocol was essential in tissue healing for Achilles tendinopathy patients.
Habets et al., 2021 <sup>17</sup>	RCT	86 recreational athletes aged 18 to 65	> 3 months	Alfredson & Silbernagel	52	25 in Alfredson & 34 in Silbernagel	50% of Alfredson and 77.3% of Silbernagel participants	The study shows that Alfredson and Silbernagel are beneficial in treating Achilles tendinopathy. Mid-portion Achilles Tendinopathy can be effectively treated with Alfredson or Silbernagel protocol on a supervised home-based program.
Beyer et al., 2015 <sup>27</sup>	RCT	58 recreational athletes (32 men and 15 women) aged 18-60 years	Chronic midportion Achilles tendinopathy for >3 months	ECC & HSR	52	84 $\pm$ 3.50 for ECC & 89 $\pm$ 2.80 for HSR	76 % of the ECC and 96% of HSR patients were satisfied	Both HSR and ECC yielded positive (significant) effects in treating Achilles Tendinopathy. Patient satisfaction was better after 12 and 52 weeks.
Ram et al., 2013 <sup>25</sup>	RCT	20 participants aged above 18 years	Not specified	Alfredson & HSR	12	45.4	2	The study showed that over time, the patients' syndromes were improved. However, in the home-based Alfredson protocol, most patients were unsatisfied with the improvement despite adhering to the 12-week heavy load eccentric exercises.

Note: RCT – randomized clinical trial; ECC – eccentric training; HSR – heavy slow resistance training.

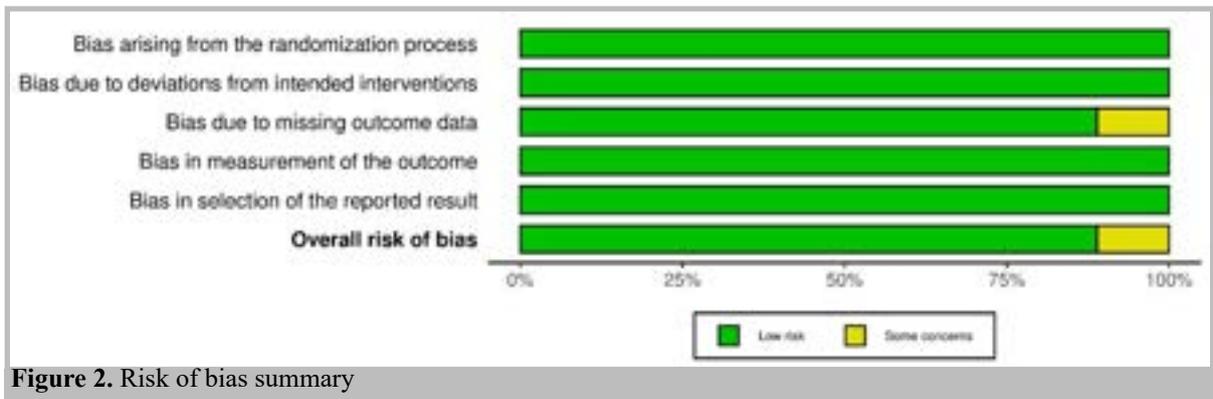


Figure 2. Risk of bias summary

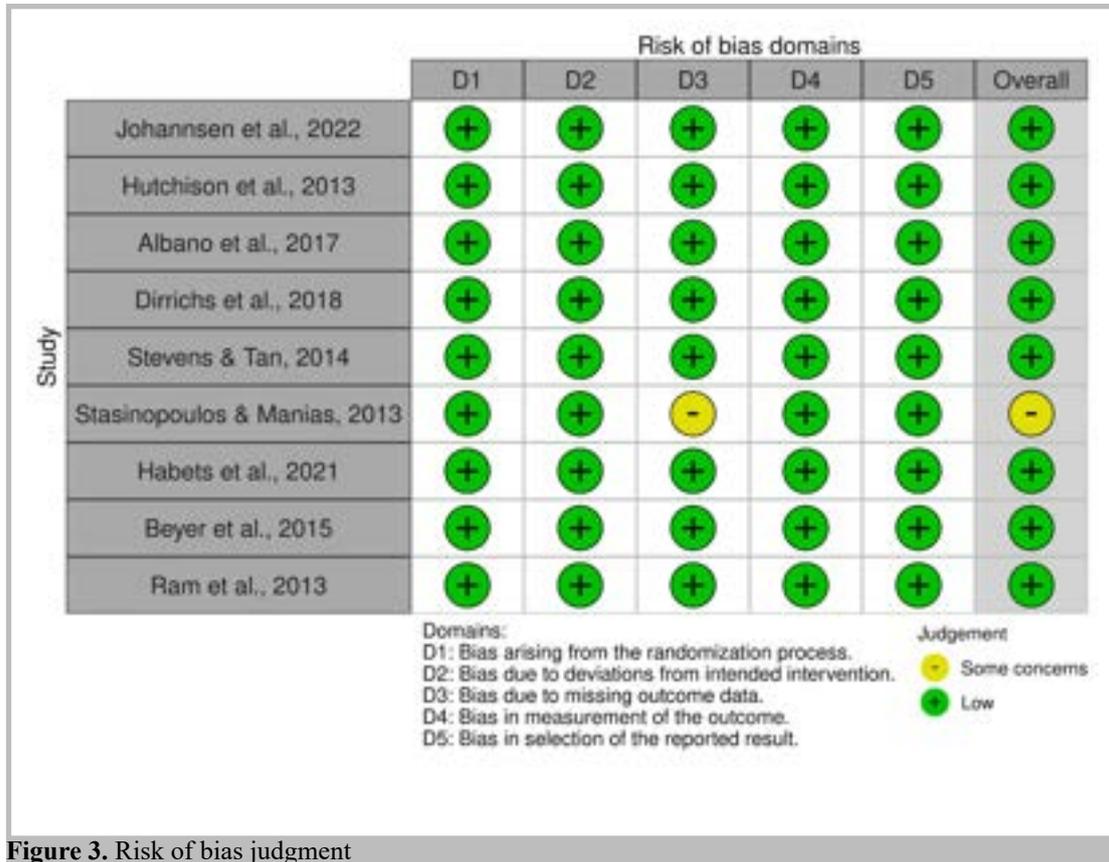


Figure 3. Risk of bias judgment

Table 3. Quality of the study (included).

Study	Newcastle-Ottawa Scale		
	Selection (Maximum 4*)	Comparability (Maximum 2*)	Assessment (Maximum 3*)
Kim et al., 2021 <sup>22</sup>	****	*	**

the VISA-A score at the end of the 52-week follow-up period for the ECC group was  $84 \pm 3.5$  a.u., while for the HSR group it was  $89 \pm 2.8$  a.u.. Therefore, these results show that both treatments yielded similar improvements by the end of the 52-week follow-up. The study also shows that at the end of the 52-week follow-up, 21 of 22 HSR patients were satisfied with the protocol as opposed to the ECC protocol, where 19 of 25 patients showed satisfaction. The study attributes this patient satisfaction to the time taken to complete the exercises recommended in the two treatment protocols, i.e., ECC required two 22-minute training sessions every week while HSR required only 308 min per week.

## Discussion

This systematic review was designed to investigate the

effectiveness of different protocols in treating Achilles tendinopathy and analyze how to diagnose Achilles tendinopathy. One of the studies shows that the effective way of diagnosing Achilles tendinopathy is through clinical tests.<sup>16</sup> According to the study, early diagnosis and treatment of Achilles tendinopathy pose a challenge due to mild symptoms. Good quality evidence shows that diagnostic tests such as pain on palpation, arc sign, and Royal London Hospital Test are essential in diagnosing Achilles tendinopathy.<sup>16</sup> Three other studies show that ultrasound is the best imaging method for assessing Achilles Tendon.<sup>31,32,37</sup> However, one of the studies explains that in exceptional cases, such as a lack of ultrasound technology and inconsistent results between ultrasound and a clinical test, MRI can be used as the imaging modality.<sup>31</sup> However, a previous study by Astrom et al. suggests that Ultrasound and MRI are efficient in diagnosing

Achilles tendinopathy.<sup>38</sup> Additionally, a study by Kim et al. explained that the main reasons why ultrasound is mostly used in the diagnosis of Achilles tendinopathy over MRI are: it is readily accessible, has a relatively quick scan time, cheaper, allows for easy contralateral comparison and better patient tolerance.<sup>31</sup> It is important to note however that tendon at imaging may be altered, but that does not necessarily indicate a pathology.<sup>39</sup>

According to most studies in this systematic review, the VISA-A score results did not show any statistical difference in the patients' pain for the various treatment protocols. According to Beyer et al.'s study comparing HSR and ECC, the heavy resistance exercise that usually targets the muscle tendon has increased the muscle and tendon's physiological cross-sectional area and pennation angle.<sup>36</sup> This exercise has improved clinical outcomes in patients with Achilles tendinopathy. Additionally, the study hypothesis that ECC was more favorable than HSR was rejected because a larger percentage of HSR patients showed satisfaction with the protocol than the ECC patients who showed satisfaction with the protocol.<sup>36</sup> One study that compared the Alfredson and Stanish protocol concluded that the results showed much more reduced pain and improved function than the Stanish protocol in treating Achilles tendinopathy.<sup>35</sup> The authors note that the VISA-A score in the Alfredson group (40 units) at the end of the 6-month follow-up period was greater than that in the Stanish group (25 units).<sup>35</sup> Additionally, clinicians suggest combining the Alfredson eccentric exercises and Stanish stretching exercises would improve pain and function in patients with Achilles tendinopathy. The study on Alfredson versus Silbernagel showed no statistical differences between the groups.

A previous study by Sayana and Maffulli<sup>40</sup> provided a more significant change in the VISA-A score (25.0 a.u.) at 16 weeks compared to Stevens and Tan's study.<sup>25</sup> However, Stevens and Tan concluded that an optimal dosage (duration, frequency, and intensity) is essential for managing and treating Achilles tendinopathy.<sup>25</sup> Therefore, it was essential for a clinical predictor that guided the exercise dosage to be developed to monitor the improvements in the patients. On the other hand, reports from Herrington and Mcuhloch<sup>41</sup> showed that at the end of the 4<sup>th</sup>, 8<sup>th</sup>, and 12<sup>th</sup> week, the VISA-A scores improved to 19, 31, and 36 a.u., respectively.

Stasinopoulos and Manias's study showed that the eccentric calf muscle training exercise in the Alfredson protocol reduced pain and improved function more than in the Stanish protocol.<sup>35</sup> Such an outcome was attributed to the increased sets and repetitions of the calf training exercises observed in the Alfredson protocol. Conversely, a previous study by Jensen and Di Fabio<sup>42</sup> alludes that the Alfredson protocol results would be poor if the load of eccentric exercises were not increased as per the patients' symptoms.<sup>42</sup> Moreover, the improvement in pain and function observed in the Alfredson group was attributed to low-speed eccentric exercise at every session, which was ignored in the Stanish Protocol. Research by Stasinopoulos and Manias showed that the application of ice at the end of the treatment recommended by the Stanish Protocol has no benefit to Patients with Achilles Tendinopathy.<sup>35</sup> Visnes et al. claimed that in both exercise programs, avoiding painful activities is crucial in tendon healing.<sup>43</sup>

A study by Cannell et al.<sup>44</sup> showed that despite the Standard Alfredson exercises being adequate in treating tendon disorders, some patients could not respond to that protocol alone.<sup>44</sup> Hence, physical therapists have suggested that the eccentric exercises recommended in the Alfredson Protocol should be combined with Stanish's stretching exercises.<sup>44</sup> This claim is backed by Manias and Stasinopoulos's study that shows positive results

when Alfredson's eccentric training is combined with Stanish's stretching exercises.<sup>35</sup> Additionally, studies by Hawary et al.,<sup>45</sup> Khan et al.,<sup>46</sup> and Ohberg et al.<sup>47</sup> explain that there appears to be a significant improvement in pain and function in treating Achilles tendinopathy when both protocols are combined. However, a lack of quality evidence makes it difficult to understand how the combined eccentric and static exercises lead to improved pain and function. Stasinopoulos and Manias claim that a home exercise program is recommended for patients with Achilles tendinopathy.<sup>35</sup> However, most patients fail to comply with the home-based exercise protocols. Therefore, it is essential to carry out the exercises in a clinical setting under the supervision of a physiotherapist. The study also claims good long-term clinical results can be observed in a shorter period under a supervised home exercise program.

On the other hand, Habets et al. conclude that eccentric contraction included in both protocols was fundamental in clinical improvement since concentric exercises were of little value.<sup>26</sup> Similarly, the study emphasized that reducing clinical symptoms loading, according to Alfredson or Silbernagel effectively reduced pain and improved function in patients with Achilles Tendinopathy. However, the results from the study did not show any significant difference in both protocols. The study findings also show that contraction loading was not significant in enhancing clinical effects, and therefore, both Silbernagel and Alfredson can be used in the treatment of Achilles tendinopathy confidently.

According to Mafi et al.,<sup>48</sup> pain and function in patients with Achilles tendinopathy is always seen when loading exercises are implemented. The data obtained after the 12-week intervention showed that the mean VISA-A score for the ECC group was 72 while that for HSR was 77 due to loading-based exercises only.<sup>48</sup> On the other hand, a study by Silbernagel et al., after a 5-year follow-up period, showed that 20% of the patients still show symptoms despite carrying out the loading exercise efficiently.<sup>27</sup> These results show that some patients may not recover fully from the Achilles Tendinopathy. The data analysis in the study shows that both ECC and HSR were effective in treating chronic Achilles Tendinopathy; the improvements usually last for over a year, even after the 12-week training is completed.

### **Limitations of the study**

The primary limitation of our study is that it considered retrieving articles only published in English. The criterion challenges obtaining additional information on the same topic but written in a different language. The sample size of each literature source varied, so it was difficult to harmonize and relate results from each source. Similarly, most of the studies included in this systematic review were limited to subjective measures of VISA-A and VAS. Since the VISA-A relies on the patients to comprehend and complete a form truthfully and accurately, the results can be biased. Similarly, the study's assumption that patients' perception of pain can be standardized on a linear and numerical scale leads to bias. There is a new model proposed by Murphy et. al.<sup>49</sup> that go beyond VIS-A and VAS, by adding patient-reported outcome measures (PROM) broadening the assessment of Achilles Tendinopathy called TENDINIS-A. Nevertheless we value a new approach but there is a need for additional clinical evidence to substantiate its superior clinical outcomes.

### **Practical Applications**

From the practical standpoint eccentric training (Alfredson or other) is recommended to reduce pain and improve function in

people with Achilles tendinopathy. It is important to notice that patient should be supervised with their adherence to exercise protocol at home.

Moreover the Alfredson protocol is better than the Stanish protocol for treating Achilles tendinopathy. Silbernagel and Alfredson show similar results. However, combining Stanish and Alfredson protocols might help reduce pain and improve function even more.

## Conclusions

1. The data analyzed in the included studies indicate a preference for the Alfredson protocol over the Stanish protocol.
2. Combining the Stanish and Alfredson protocols could potentially enhance pain relief and function in patients with Achilles tendinopathy.
3. Both the Silbernagel and Alfredson protocols yield similar results in the treatment and management of Achilles tendinopathy.
4. The HSR (Heavy Slow Resistance) and ECC (Eccentric Exercise) protocols show comparable outcomes in pain reduction and function improvement for Achilles tendinopathy patients.
5. Patient satisfaction ratings favor the HSR protocol over the ECC protocol.
6. Eccentric training, specifically the Alfredson protocol, is recommended for improving pain and function in patients diagnosed with Achilles tendinopathy.
7. Home-based Alfredson protocol, with limited supervision, is crucial for effectively treating mid-portion Achilles tendinopathy.

## Acknowledgments

The authors gratefully thank the university colleagues for their cooperation and support during the writing process.

## Ethical Committee approval

Not required as it was a systematic review.

## ORCID

Jaskulski Karol ID <https://orcid.org/0000-0002-0781-5291>

Starzewski Michal ID <https://orcid.org/0000-0001-7419-8943>

## Topic

Orthopaedic sports medicine

## Conflicts of interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

## Funding

No funding was received for this investigation.

## Author-s contribution

Conceptualization, K.J. and M.S.; methodology K.J. and M.S.; validation and formal analysis, K.J. and M.S.; writing—original draft preparation K.J. and M.S.; writing—review and editing,

K.J. and M.S.; visualization, K.J. and M.S.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## References

1. Van der Vlist AC, Winters M, Weir A, et al. Which treatment is most effective for patients with Achilles tendinopathy? A living systematic review with network meta-analysis of 29 randomised controlled trials. *Br J Sports Med.* 2021;55(5):249-256. doi:10.1136/bjsports-2019-101872
2. Cook JL, Purdam CR. Is tendon pathology a continuum? A pathology model to explain the clinical presentation of load-induced tendinopathy. *Br J Sports Med.* 2009;43(6):409-416. doi:10.1136/BJSM.2008.051193
3. Santacaterina F, Miccinilli S, Bressi F, Sterzi S, Bravi M. An Overview of Achilles Tendinopathy Management. *Osteology 2021, Vol 1, Pages 175-186.* 2021;1(4):175-186. doi:10.3390/OSTEOLOGY1040017
4. Bobowik P, Świerczek J, Jaskulski K, Wiszomirska I, Gajewski J. Evaluation of balance and muscle strength of upper and lower limbs in rock climbers. *Pol J Sport Tourism.* 2023;30(4):19-25. doi:10.2478/pjst-2023-0021
5. Brar KK, Bhardwaj P, Prabu RG. The influence of lower limb plyometric and resistance training on the stiffness of Achilles and patellar tendons in recreational athletes. *Biomed Hum Kinet.* 2021;13(1):56-62. doi:10.2478/bhk-2021-0008
6. Vora AM, Myerson MS, Oliva F, Maffulli N. Tendinopathy of the main body of the achilles tendon. *Foot Ankle Clin.* 2005;10(2):293-308. doi:10.1016/j.fcl.2005.01.007
7. Alghamdi NH, Pohlig RT, Sions JM, Silbernagel KG. Differences at the Achilles Insertion Between Adults with Insertional and Midportion Achilles Tendinopathy as Observed Using Ultrasound. *Muscles Ligaments Tendons J.* 2022;12(2):115-121. doi:10.32098/mltj.02.2022.04
8. Oliva F, Marsilio E, Asparago G, et al. Achilles Tendon Rupture and Dysmetabolic Diseases: A Multicentric, Epidemiologic Study. *J Clin Med.* 2022;11(13). doi:10.3390/jcm11133698
9. Stevens M, Tan CW. Effectiveness of the Alfredson protocol compared with a lower repetition-volume protocol for midportion achilles tendinopathy: A randomized controlled trial. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2014;44(2):59-67. doi:10.2519/JOSPT.2014.4720/ASSET/IMAGES/LARGE/JOSPT-59-FIG002.JPEG
10. Habets B, van Cingel REH, Backx FJG, van Elten HJ, Zuithoff P, Huisstede BMA. No Difference in Clinical Effects When Comparing Alfredson Eccentric and Silbernagel Combined Concentric-Eccentric Loading in Achilles Tendinopathy: A Randomized Controlled Trial. *Orthop J Sports Med.* 2021;9(10):1-10. doi:10.1177/23259671211031254
11. Beyer R, Kongsgaard M, Hougs Kjær B, Øhlenschläger T, Kjær M, Magnusson SP. Heavy slow resistance versus eccentric training as treatment for achilles tendinopathy: A randomized controlled trial. *Am J Sports Med.* 2015;43(7):1704-1711. doi:10.1177/0363546515584760
12. Habets B, van Cingel REH. Eccentric exercise training in chronic mid-portion Achilles tendinopathy: A systematic review on different protocols. *Scand J Med Sci Sports.* 2015;25(1):3-15. doi:10.1111/sms.12208

13. Matthews W, Ellis R, Furness J, Hing WA. The clinical diagnosis of Achilles Tendinopathy: A scoping review. *Peer J*. 2021;9. doi:10.7717/PEERJ.12166/SUPP-2
14. Loiacono C, Palermi S, Massa B, et al. Tendinopathy: Pathophysiology, Therapeutic Options, and Role of Nutraceuticals. A Narrative Literature Review. *Medicina (B Aires)*. 2019;55(8). doi:10.3390/MEDICINA55080447
15. Millar NL, Silbernagel KG, Thorborg K, et al. Tendinopathy. *Nat Rev Dis Primers*. 2021;7(1). doi:10.1038/S41572-020-00234-1
16. Reiman M, Burgi C, Strube E, et al. The utility of clinical measures for the diagnosis of achilles tendon injuries: a systematic review with meta-analysis. *J Athl Train*. 2014;49(6):820-829. doi:10.4085/1062-6050-49.3.36
17. Maffulli N, Longo UG, Kadakia A, Spiezia F. Achilles tendinopathy. *Foot Ankle Surg*. 2020;26(3):240-249. doi:10.1016/J.FAS.2019.03.009
18. Hutchison AM, Evans R, Bodger O, et al. What is the best clinical test for Achilles tendinopathy? *Foot Ankle Surg*. 2013;19(2):112-117. doi:10.1016/J.FAS.2012.12.006
19. Jukes CP, Scott G, Solan MC. Posterior heel pain. *Orthop Trauma*. 2020;34(1):3-9. doi:10.1016/j.morth.2019.11.001
20. Martin RL, Chimenti R, Cuddeford T, et al. Achilles Pain, Stiffness, and Muscle Power Deficits: Midportion Achilles Tendinopathy Revision 2018. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2018;48(5):A1-A38. doi:10.2519/jospt.2018.0302
21. Szaro P, Nilsson-Helander K, Carmont M. MRI of the Achilles tendon—A comprehensive pictorial review. Part one. *Eur J Radiol Open*. 2021;8:100342. doi:10.1016/j.ejro.2021.100342
22. Dams OC, Reininga IHF, Gielen JL, van den Akker-Scheek I, Zwerver J. Imaging modalities in the diagnosis and monitoring of Achilles tendon ruptures: A systematic review. *Injury*. 2017;48(11):2383-2399. doi:10.1016/j.injury.2017.09.013
23. Jayaseelan DJ, Mischke JJ, Strazzulla RL. Eccentric Exercise for Achilles Tendinopathy: A Narrative Review and Clinical Decision-Making Considerations. *J Funct Morphol Kinesiol*. 2019;4(2):34. doi:10.3390/jfmk4020034
24. Prudêncio DA, Maffulli N, Migliorini F, et al. Eccentric exercise is more effective than other exercises in the treatment of mid-portion Achilles tendinopathy: systematic review and meta-analysis. *BMC Sports Sci Med Rehabil*. 2023;15(1). doi:10.1186/s13102-023-00618-2
25. Challoumas D, Kirwan PD, Borysov D, Clifford C, McLean M, Millar NL. Topical glyceryl trinitrate for the treatment of tendinopathies: a systematic review. *Br J Sports Med*. 2019;53(4):251-262. doi:10.1136/bjsports-2018-099552
26. Frizziero A, Trainito S, Oliva F, Nicoli Aldini N, Masiero S, Maffulli N. The role of eccentric exercise in sport injuries rehabilitation. *Br Med Bull*. 2014;110(1):47-75. doi:10.1093/bmb/ldu006
27. Stevens M, Tan CW. Effectiveness of the Alfredson Protocol Compared With a Lower Repetition-Volume Protocol for Midportion Achilles Tendinopathy: A Randomized Controlled Trial. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2014;44(2):59-67. doi:10.2519/jospt.2014.4720
28. Habets B, van Cingel REH, Backx FJG, van Elten HJ, Zuithoff P, Huisstede BMA. No Difference in Clinical Effects When Comparing Alfredson Eccentric and Silbernagel Combined Concentric-Eccentric Loading in Achilles Tendinopathy: A Randomized Controlled Trial. *Orthop J Sports Med*. 2021;9(10). doi:10.1177/232596712111031254
29. Grävare Silbernagel K, Brorsson A, Lundberg M. The majority of patients with Achilles tendinopathy recover fully when treated with exercise alone: a 5-year follow-up. *Am J Sports Med*. 2011;39(3):607-613. doi:10.1177/0363546510384789
30. Morrison S, Cook J. Putting “Heavy” into Heavy Slow Resistance. *Sports Med*. 2022;52(6):1219-1222. doi:10.1007/s40279-022-01641-y
31. Moher D, Shamseer L, Clarke M, et al. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Syst Rev*. 2015;4(1):148-160. doi:10.1186/2046-4053-4-1
32. Sterne JAC, Savović J, Page MJ, et al. RoB 2: a revised tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ*. August 2019:l4898. doi:10.1136/bmj.l4898
33. Kim DH, Choi JH, Park CH, Park HJ, Yoon KJ, Lee YT. The Diagnostic Significance of Ultrasonographic Measurement of the Achilles Tendon Thickness for the Insertional Achilles Tendinopathy in Patients with Heel Pain. *J Clin Med*. 2021;10(10):2165. doi:10.3390/jcm10102165
34. Albano D, Messina C, Uselli FG, et al. Magnetic resonance and ultrasound in achilles tendinopathy: Predictive role and response assessment to platelet-rich plasma and adipose-derived stromal vascular fraction injection. *Eur J Radiol*. 2017;95:130-135. doi:10.1016/j.ejrad.2017.08.006
35. Dirrichs T, Quack V, Gatz M, et al. Shear Wave Elastography (SWE) for Monitoring of Treatment of Tendinopathies. *Acad Radiol*. 2018;25(3):265-272. doi:10.1016/j.acra.2017.09.011
36. Ram R, Meeuwisse W, Patel C, Wiseman DA, Wiley JP. The limited effectiveness of a home-based eccentric training for treatment of Achilles tendinopathy. *Clin Invest Med*. 2013;36(4). doi:10.25011/CIM.V36I4.19953
37. Stasinopoulos D, Manias P. Comparing two eccentric exercise programmes for the management of Achilles tendinopathy. A pilot trial. *J Bodyw Mov Ther*. 2013;17(3):309-315. doi:10.1016/J.JBMT.2012.11.003
38. Beyer R, Kongsgaard M, Hougs Kjær B, Øhlenschläger T, Kjær M, Magnusson SP. Heavy Slow Resistance Versus Eccentric Training as Treatment for Achilles Tendinopathy. *Am J Sports Med*. 2015;43(7):1704-1711. doi:10.1177/0363546515584760
39. Johannsen F, Olesen JL, Øhlenschläger TF, et al. Effect of Ultrasonography-Guided Corticosteroid Injection vs Placebo Added to Exercise Therapy for Achilles Tendinopathy. *JAMA Netw Open*. 2022;5(7):e2219661. doi:10.1001/jamanetworkopen.2022.19661
40. Åstrom M, Gentz CF, Nilsson P, Rausing A, Sjöberg S, Westlin N. Imaging in chronic achilles tendinopathy: A comparison of ultrasonography, magnetic resonance imaging and surgical findings in 27 histologically verified cases. *Skeletal Radiol*. 1996;25(7):615-620. doi:10.1007/S002560050146/METRICS
41. Maffulli N, Nilsson Helander K, Migliorini F. Tendon appearance at imaging may be altered, but it may not indicate pathology. *Knee Surg Sport Tr*. 2023;31(5):1625-

1628. doi:10.1007/s00167-023-07339-6
42. Sayana MK, Maffulli N. Eccentric calf muscle training in non-athletic patients with Achilles tendinopathy. *J Sci Med Sport*. 2007;10(1):52-58. doi:10.1016/J.JSAMS.2006.05.008
43. Herrington L, McCulloch R. The role of eccentric training in the management of Achilles tendinopathy: A pilot study. *Physical Therapy in Sport*. 2007;8(4):191-196. doi:10.1016/J.PTSP.2007.07.001
44. Jensen K, Di Fabio RP. Evaluation of eccentric exercise in treatment of patellar tendinitis. *Phys Ther*. 1989;69(3):211-216. doi:10.1093/PTJ/69.3.211
45. Visnes H, Hoksrud A, Cook J, Bahr R. No Effect of Eccentric Training on Jumper's Knee in Volleyball Players During the Competitive Season. *Clin J Sport Med*. 2005;15(4):227-234. doi:10.1097/01.jsm.0000168073.82121.20
46. Cannell LJ, Taunton JE, Clement DB, Smith C, Khan KM. A randomised clinical trial of the efficacy of drop squats or leg extension/leg curl exercises to treat clinically diagnosed jumper's knee in athletes: pilot study. *Br J Sports Med*. 2001;35(1):60-64. doi:10.1136/BJSM.35.1.60
47. El Hawary R, Stanish WD, Curwin SL. Rehabilitation of tendon injuries in sport. *Sports Med*. 1997;24(5):347-358. doi:10.2165/00007256-199724050-00006
48. Khan KM, Cook JL, Taunton JE, Bonar F. Overuse tendinosis, not tendinitis part 1: a new paradigm for a difficult clinical problem. *Phys Sportsmed*. 2000;28(5):38-48. doi:10.3810/PSM.2000.05.890
49. Öhberg L, Lorentzon R, Alfredson H. Eccentric training in patients with chronic Achilles tendinosis: normalised tendon structure and decreased thickness at follow up. *Br J Sports Med*. 2004;38(1):8-11. doi:10.1136/BJSM.2001.000284
50. Mafi N, Lorentzon R, Alfredson H. Superior short-term results with eccentric calf muscle training compared to concentric training in a randomized prospective multicenter study on patients with chronic Achilles tendinosis. *Knee Surg Sport Tr*. 2001;9(1):42-47. doi:10.1007/s001670000148
51. Murphy MC, Newsham-West R, Cook J, et al. TENDINopathy Severity Assessment – Achilles (TENDINS-A): Development and Content Validity Assessment of a New Patient-Reported Outcome Measure for Achilles Tendinopathy. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2024;54(1):70-85. doi:10.2519/jospt.2023.11964

### **Corresponding information:**

Received: 28.05.2024.

Accepted: 11.07.2024.

Correspondence to: \*Jaskulski Karol MSc PT  
 University: <sup>a</sup>Faculty of Rehabilitation Józef Piłsudski  
 University of Physical Education in Warsaw,  
 Warsaw, Poland, Marymoncka, 34, 00-968 Warsaw,  
 Poland  
 E-mail: karol.jaskulski@awf.edu.pl

RIINA RSARC ARTIC

Open Access



# Artificial intelligence in musculoskeletal radiology: a structured assessment of Achilles tendon magnetic resonance images to uncover potential disparities in their reasoning approaches. Aiming to identify relationships between the structured assessment of the Achilles tendon and its function that could support injury prevention. We examined 72 athletes to investigate the link between Achilles tendon structure, as visualised in magnetic resonance images using a precise T2\*-weighted gradient echo sequence with very short echo times, and its functional attributes. The acquired data were analysed using advanced artificial intelligence techniques and reviewed by radiologists. Additionally, we conducted statistical assessments to explore relationships with functional studies in four meaningful groups: dynamic strength, range of motion, muscle torque and stabilography.

Norbert Kapinski<sup>1,2</sup>, Karol Jaskulski<sup>3</sup>, Justyna Witkowska<sup>2,4\*</sup> , Adam Kozlowski<sup>2</sup>, Pawel Adamczyk<sup>2,5</sup>, Bartosz Wysoczanski<sup>3</sup>, Agnieszka Zdrodowska<sup>3</sup>, Adam Niemaszyk<sup>3</sup>, Beata Ciszowska-Lyson<sup>6</sup> and Michal Starczewski<sup>3</sup>

## Abstract

**Background** Recent advancements in artificial intelligence have proven their effectiveness in orthopaedic settings, especially in tasks like medical image analysis. This study compares human musculoskeletal radiologists to artificial intelligence in a novel, detailed, short, and cost-effective examination of Achilles tendon magnetic resonance images to uncover potential disparities in their reasoning approaches. Aiming to identify relationships between the structured assessment of the Achilles tendon and its function that could support injury prevention. We examined 72 athletes to investigate the link between Achilles tendon structure, as visualised in magnetic resonance images using a precise T2\*-weighted gradient echo sequence with very short echo times, and its functional attributes. The acquired data were analysed using advanced artificial intelligence techniques and reviewed by radiologists. Additionally, we conducted statistical assessments to explore relationships with functional studies in four meaningful groups: dynamic strength, range of motion, muscle torque and stabilography.

**Results** The results show notable linear or non-linear relationships between functional indicators and structural alterations (maximal obtained Spearman correlation coefficients ranged from 0.3 to 0.36 for radiological assessment and from 0.33 to 0.49 for artificial intelligence assessment, while maximal normalised mutual information ranged from 0.52 to 0.57 for radiological assessment and from 0.42 to 0.6 for artificial intelligence assessment). Moreover, when artificial intelligence-based magnetic resonance assessment was utilised as an input, the associations consistently proved more robust, or the count of significant relationships surpassed that derived from radiological assessment. Ultimately, utilising only structural parameters as inputs enabled us to explain up to 59% of the variance within specific functional groups.

**Conclusions** This analysis revealed that structural parameters influence four key functional aspects related to the Achilles tendon. Furthermore, we found that relying solely on subjective radiologist opinions limited our ability to reason effectively, in contrast to the structured artificial intelligence assessment.

**Study Design** Cross-sectional studies.

\*Correspondence:  
Justyna Witkowska  
justyna.witkowska@smarterdiagnostics.com

Full list of author information is available at the end of the article

### Key Points

- Establishment of a relationship between magnetic resonance imaging-based structural features and functional characteristics of the Achilles tendon, emphasising non-linear connections.
- Introduction of a fast and efficient magnetic resonance imaging protocol for concurrent evaluation of structural and functional aspects, alongside a comparative analysis of artificial intelligence and radiologist reasoning capabilities.
- Highlighting the advantages of artificial intelligence-driven reasoning in identifying structural biomarkers, offering potential enhancements for injury prevention strategies and personalised treatment approaches.

**Keywords** Achilles tendon, Injury prevention, Artificial intelligence, Magnetic resonance imaging

### Background

The Achilles tendon (AT) is the largest and strongest tendon in the human body, and it plays a crucial role in the musculoskeletal system. It facilitates everyday movements by withstanding high loads and storing energy, particularly during sports activities. There is a significant association between Achilles tendon dysfunctions and lower leg injuries. In addition, tendon disorders comprise 30 to 50% of all sports-related injuries [1]. Detecting and responding to developing pathologies within the tendon structure at an early stage can help reduce injuries and introduce significant cost savings, particularly in sports medicine.

The study by Parekh and Shah [2] shows that 26% of National Football League (NFL) players with Achilles tendon ruptures never returned to play. In the National Basketball Association (NBA), post-injury, 36.8% either retired or played fewer than 10 games [3]. Among British Rugby Union players, Achilles injuries are the third leading cause of missing over 100 days [4]. Additionally, half of distance runners and many triathletes suffer from Achilles tendinopathy [5, 6]. The incidence of these injuries has surged tenfold in 30 years [7, 8], placing a considerable financial strain on the healthcare system [9–11]. This underscores the need for early detection and prevention of Achilles tendon issues [12].

Predicting Achilles Tendon Injury (ATI) symptoms is central to many studies. Research by Mahieu et al. [13] identified plantar flexors' strength and dorsiflexion range as key ATI predictors. O'Neill's 2019 study corroborated this with similar findings in runners [14]. Studies with volleyball players [15, 16] suggested muscle power asymmetry during single-leg vertical jumps as another indicator. Additionally, ATI risk is associated with factors like genetics, nutrition, and training [17–19].

Many of the aforementioned factors have been assessed using medical imaging techniques such as Ultrasonography [20, 21] and Magnetic Resonance Imaging (MRI) [22], but not yet with artificial intelligence (AI) analysis. Ultrasound, being more accessible and cost-effective, is preferred over MRI. Some studies suggest that ultrasound and MRI are similarly effective in diagnosing

tendinopathy [23, 24]. MRI, however, excels in operator independence and structural analysis.

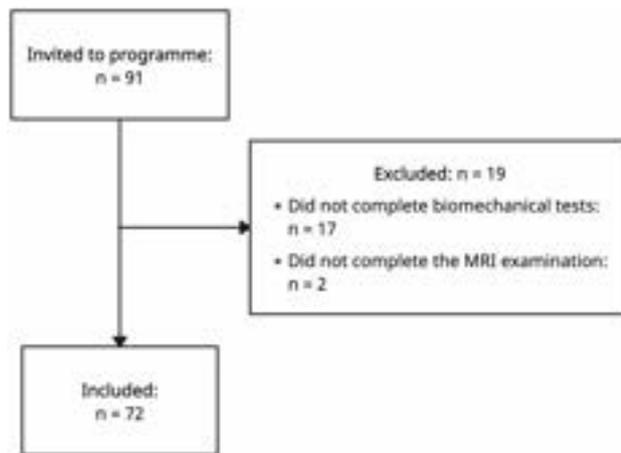
Using Short or Ultrashort Echo Time (UTE) and T2\*GRE (Gradient Echo) MRI techniques improves early Achilles tendon pathology detection [25]. These methods increase the visibility of minor tissue changes, making small lesions and irregularities more detectable. Combining these with structured descriptions and AI algorithms enhances precise MRI image interpretation, aiding in identifying biomarkers for musculoskeletal dysfunctions related to the Achilles tendon. Understanding the tendon's structure is crucial for studying its responses to stress, injury, and targeted Achilles disorder treatments.

Our study primarily aims to link the observed structural features using MRI sequences characterised by short echo time to the Achilles tendon's functional characteristics. This effort leads to the introduction of a novel, quick, and cost-effective protocol for monitoring the tendon's structural and functional aspects. We're considering factors like dynamic strength, stabilographic indices, range of motion, and muscle torque as important markers for assessing the Achilles tendon's health and performance. Additionally, we aim to compare AI's reasoning with radiologists' in the context of our methodology, reflecting growing interest in this area.

### Methods

#### Participants and Inclusion Criteria

Seventy-two sports individuals were selected (Fig. 1), meeting criteria including regular physical activity - at least two training sessions weekly in team sports with common Achilles Tendon Injuries (ATIs) like Rugby, Volleyball, Soccer, Badminton, and individual sports such as rowing, where the risk of ATI is linked to general training rather than the specific demands of the sport (Table 1). The training activities involve running or lower limb gym sessions, comprising more than 30% of the athletes' total yearly training volume. All of them without ATIs history. Exclusion criteria included contraindications for MRI, acute lower limb injuries, and exacerbations of other illnesses.



**Fig. 1** Flowchart of the participants' inclusion process

### Procedures

The study protocol consisted of two main components: MR imaging and functional assessments. Data collection spanned from March through November 2022. Functional tests were conducted within a specialised biomechanical laboratory, while MRI tests were performed at a medical imaging facility. To minimise the time gap between the MRI scans and functional assessments, over 90% of the participants underwent both studies on the same day. For the remaining participants, the maximum time gap between the two studies was one week. None of the participants reported any injuries or issues with their Achilles tendon between the MRI and functional assessments.

### MRI Assessment

Short MRI scans of both lower legs were performed with the use of two MRI scanners: the 3T machine (Siemens MAGNETOM Vida; Siemens Healthineers, Erlangen, Germany) and the 1.5T machine (United Imaging Healthcare uMR 588; United Imaging Healthcare, Shanghai, China). The whole protocol consisted of T2\* GRE Echo sequence (with a short echo time ranging from 3.51 to 4.7 ms) acquired in the axial plane using Foot/Ankle

coil type. Imaging parameters included a slice thickness of 3 mm, slice spacing from 2.48 mm to 4.19 mm, repetition times of 500 ms or 567.2 ms, and a field of view (FOV) ranging from 120×120 mm to 170×170 mm. The patient was positioned feet-first, supine (FFS). Scans were taken from the heel bone to the midpoint of the lower leg.

A structured description following Kapinski et al. model was used [26]. It includes 6 parameters describing the condition of the Achilles tendon:

1. Structural changes within the tendon (SCT) - informs about the loss of cohesion within the tendon area.
2. Tendon thickening (TT) - informs about the maximum dimension in the sagittal direction.
3. Sharpness of the tendon edges (STE) - informs about the edge fractality.
4. Tendon oedema (TE) - informs about an abnormal accumulation of fluid in the interstitium of the tendon.
5. Tendon uniformity (TU) - informs about the level of similarity of subsequent cross-sections of the tendon.
6. Tissue oedema (TisE) - informs about an abnormal accumulation of fluid and the enlarged size of the fascial compartment.

An experienced musculoskeletal radiologist with over 20 years of expertise in the field performed the assessment, with a total of 12 parameters assessed (6 for each leg). For each of the parameters, the expert could select a single score on an 8 point scale, where 0 describes a healthy tendon and 7 describes a severely injured one. Additionally, on the same scale, inference was performed using the SmarterOrthoMRI software (Smarter Diagnostics Sp. z o.o., Warsaw, Poland) [27] for comparison.

### Functional Assessment

Functional studies involved body composition, plantarflexion and dorsiflexion isometric strength and range of movement (ROM), static balance parameters, power

**Table 1** Demographic characteristics of the participants

Sex	Sport	n	Age [years]	Height [cm]	Body mass [kg]	Soft tissues mass [kg]	Fat content [%]
Man	Individual sports	19 (5 martial arts, 4 gym, 3 rowing, 2 badminton, 2 cycling, 2 tennis, 1 speed skating)	38.1±9.7	183.1±6.1	89.7±11.2	66.7±8.4	19.8±7.5
	Team sports	26 (9 basketball, 9 rugby, 7 volleyball, 1 football)	36.9±9.7	181.9±7.6	84.9±12.5	62.9±8.5	19.8±4.2
	Total	45	37.4±9.6	182.4±7.0	86.±12.1	64.5±8.6	19.8±5.7
Woman	Individual sports	10 (2 badminton, 2 rowing, 2 tennis, 4 gym)	37.0±5.4	166.1±5.7	63.5±7.5	42.7±2.7	26.4±6.4
	Team sports	17 (9 Rugby, 2 handball, 3 volleyball, 2 football, 1 basketball)	25.7±7.1	170.8±7.8	67.5±15.5	46.1±7.1	24.8±6.9
	Total	27	29.9±8.5	169.0±7.3	66.0±13.1	44.8±6.0	25.4±6.7

of the lower extremities, and the height of the rise of the body mass centre (COM) during a series of vertical jumps. All measurements were conducted on both lower limbs and repeated twice. The better result from the two repetitions of each functional assessment test was chosen for analysis. The functional variables were divided into four groups: dynamic strength, stabilographic indices, range of motion (ROM), and muscle torque. The biomechanical measurements were carried out in a specialised biomechanical laboratory, using certified equipment and were supervised by an experienced researcher who ensured the proper performance of the tests. The full results of functional tests are attached as supplementary material.

Dynamic strength was assessed by measuring lower extremity power and body mass centre (COM) rise during vertical jumps on a force plate (JBA Zb. Staniak, Warsaw, Poland). Participants executed eight jumps, two of each kind: Counter-movement jump (CMJ), single-leg counter-movement jump (SCMJ), and squat jump (SJ) [28]. For further calculations, dynamic strength parameters related to CMJ, SCMJ and SJ such as maximum force, maximum speed, maximum power, average power, total work, jump height calculated from speed, jump height calculated from flight time, jump height calculated from the work, jump height calculated from the trajectory of the centre of mass, swing depth, torque during take-off, time from the start of the movement to take-off, derivative of maximum force, time from reaching maximum force to take-off, derivative of maximum power and time from reaching maximum power to take-off, were taken.

Stabilographic indices were evaluated using the AMTI AccuSwayPLUS Balance Platform (ACS Model; Toronto, ON, Canada) through four trials (two per leg) involving one leg stance with eyes open and closed, each lasting 10 s and repeated twice [29]. The study included parameters related to displacement area and the path of the centre of mass.

Range of motion (ROM) was measured with a Seahan handheld goniometer in a prone position, focusing on the knee and ankle's passive and active ROM, plus their differences and ratios [30].

Muscle torque for plantarflexion and dorsiflexion was measured using a specialised device (JBA Zb. Staniak, Warsaw, Poland) in a seated position, following the method described by Konik et al. [31]. The participants were positioned with hips and knees at 90°, arms crossed on the chest and ankles in a neutral position.

### Statistical Analysis

The Mann-Whitney U test was employed to compare MRI assessments made by the radiologist and the AI. Results with a  $p$ -value  $< 0.05$  were considered statistically significant. Mean absolute errors (MAE) were calculated

for each of the six structural parameters to illustrate the discrepancies between the radiologist's and AI's assessments. The mean values of each parameter for AI and radiologist assessments are also reported.

The study analysed 100 parameters from functional studies: 72 from dynamic strength, 8 from stabilographic indices, 16 from range of motion, and 4 from muscle torque. Patients who did not undergo at least one examination had their results excluded from the analysis. However, this exclusion was specific to the stabilography tests, affecting 28 patients. Principal Component Analysis (PCA) was conducted to reduce these parameters while maintaining information integrity. The top 8, 5, 5, and 2 PCA parameters for each group, explaining over 90% of the variance, were selected as meta-parameters.

Linear and non-linear relationships between structural and functional parameters were explored using Spearman correlation and normalised mutual information (NMI), as they are common metrics used for presenting both types of relationships that were expected between structural and functional data. These measures were calculated between structural features and functional meta-parameters for each category, both for radiologist-assessed and AI-assessed (by SmarterOrthoMRI software) parameters. Statistical significance was established with  $p$ -values under 0.05 for 95% confidence. For NMI, a 30% threshold was used [32]. This data created a list of features most common in significant relationships.

The feature importance was utilised to design a transformation function that explained the most variance in function based on AT structural parameters. Linear optimisation, based on the Powell method, was attempted using features initiated from the importance list with optimised weights. Non-linear models, i.e. Decision Trees [33], Random Forests [34], and ensembles with the AutoGluon [35] library, were employed to capture more complex relationships.

The statistical analysis and presentation are consistent with the Checklist for Statistical Assessment of Medical Papers statement [36].

### Machine Learning Analysis

For each group, an ensemble of models was created. These models were trained using structural features to predict each of the selected functional meta-parameters (PCA components). The objective was to achieve the highest explained variance score for the entire functional group, based on structural features labelled by both an AI model and a radiologist. Due to the limited sample count, the AI models were trained using a 10-fold cross-validation approach.

The initial step involved training Decision Tree and Random Forest models. The best model was selected based on its  $r^2$  score on the given test set and the whole

dataset. This metric was chosen due to its similarity to the explained variance coefficient.

The second approach was to use the AutoGluon package. During this process, we employed Bayesian optimisation with a fixed number of trials to find a model with the highest  $r^2$  score.

For the models that explained the most total variance in the four functional groups, a list of the structural parameters that had the most significant impact on the model was extracted. In the case of machine learning (ML) models, these features were selected by calculating permutation importance [34] and normalising it to a 0–1 range. This analysis provided insights into how specific structural parameters contributed to model reasoning and their relationship with function.

**Patient and Public Involvement**

There was no patient or public involvement in the planning, conceptualization, research design, analysis, interpretation, or composition of the findings. However, every patient was instructed on the clinical value of the tests performed and could request individual results of the structural assessment and receive a report. Interested patients also took part in a seminar that introduced the research concept and concluded with a comprehensive discussion between the study participants and researchers.

**Equity, Diversity and Inclusion Statement**

Our research team consists of seven men and three women from Europe. The study population is diverse in terms of age, gender, demographics, and comorbidities. However, the predominantly white composition of the cohort resulted in an underrepresentation of other ethnic groups. Individuals from marginalised communities may also have lower representation. Methodological constraints required excluding individuals with specific comorbidities and mobility limitations from analyses.

**Results**

**MRI Assessment**

The MRI examinations were assessed for six structural parameters of the Achilles tendon by both a radiologist and an AI model (Table 2; Fig. 2). There were no statistically significant differences between the radiologist and AI assessments. The average MAE values were within the range of 0.23–0.60.

**Functional Assessment**

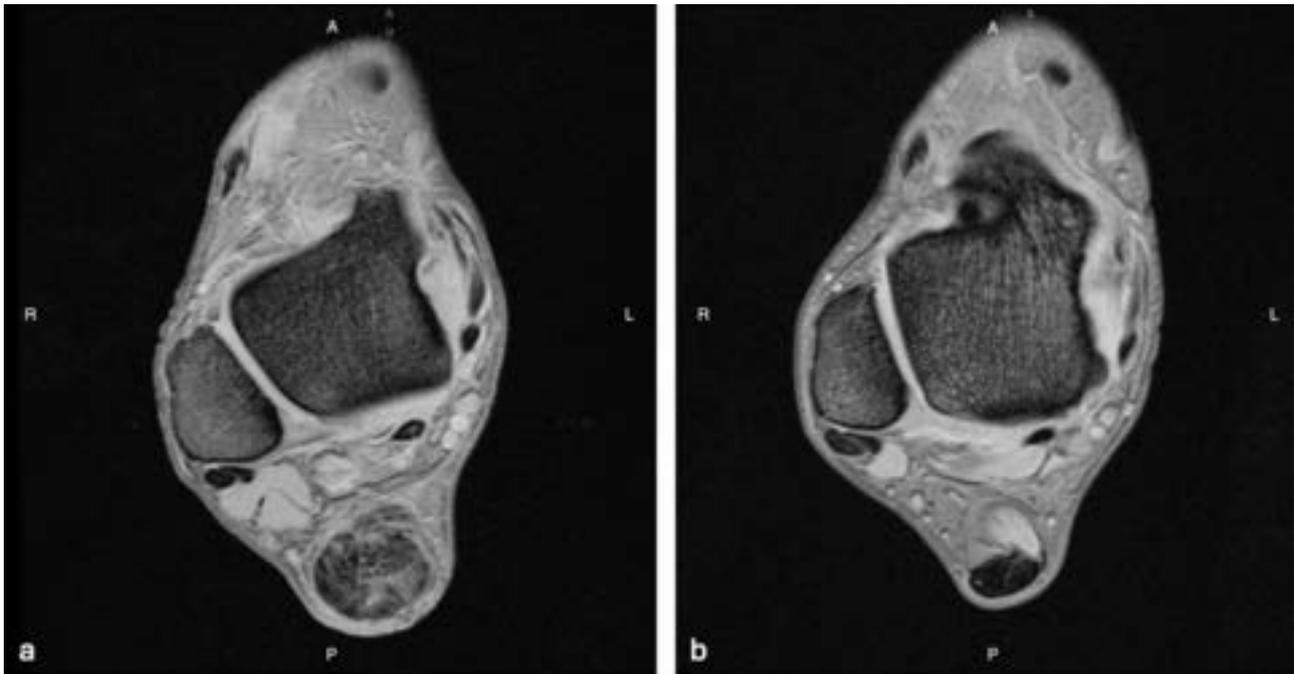
100 parameters from four functional groups - dynamic strength, stabilographic indices, range of motion, and muscle torque - were collected for analysis. The results of specific tests are included as an additional file alongside the manuscript (Additional File 1).

**Relationships - AI vs. Radiologist**

The relationships were categorised according to the obtained values into 4 groups: high correlation coefficient

**Table 2** Comparison of AI and radiologist structural assessments \*SD (standard deviation)

parameter	leg	mean MAE ± SD	mean value ± SD - radiologist	mean value ± SD - AI	significance of difference (radiologist vs. AI)	p-value
SCT	left (n=72)	0.6 ± 0.82	1.65 ± 1.27	1.47 ± 0.53	not significant	0.782485
	right (n=72)	0.54 ± 0.69	1.71 ± 1.13	1.53 ± 0.58	not significant	0.645344
	total (n=144)	0.57 ± 0.75	1.68 ± 1.20	1.5 ± 0.56	not significant	0.882789
TT	left (n=72)	0.26 ± 0.65	0.99 ± 0.97	0.94 ± 0.87	not significant	0.934106
	right (n=72)	0.23 ± 0.46	1.04 ± 1.05	1.0 ± 1.02	not significant	0.822369
	total (n=144)	0.25 ± 0.55	1.01 ± 1.01	0.97 ± 0.95	not significant	0.834690
STE	left (n=72)	0.47 ± 0.58	0.93 ± 0.76	1.01 ± 0.12	not significant	0.089506
	right (n=72)	0.4 ± 0.66	1.14 ± 0.83	1.01 ± 0.12	not significant	0.626514
	total (n=144)	0.44 ± 0.62	1.03 ± 0.79	1.01 ± 0.12	not significant	0.343004
TE	left (n=72)	0.5 ± 0.69	0.92 ± 1.08	0.78 ± 0.81	not significant	0.738311
	right (n=72)	0.6 ± 0.76	1.04 ± 1.19	0.86 ± 0.88	not significant	0.572972
	total (n=144)	0.55 ± 0.73	0.98 ± 1.14	0.82 ± 0.84	not significant	0.529274
TU	left (n=72)	0.29 ± 0.59	0.90 ± 0.97	0.69 ± 0.76	not significant	0.272347
	right (n=72)	0.24 ± 0.42	0.99 ± 1.01	0.86 ± 0.94	not significant	0.400703
	total (n=144)	0.26 ± 0.51	0.94 ± 0.99	0.78 ± 0.85	not significant	0.165372
TisE	left (n=72)	0.44 ± 0.58	0.96 ± 0.96	1.04 ± 0.94	not significant	0.476398
	right (n=72)	0.46 ± 0.58	1.14 ± 0.94	1.07 ± 0.94	not significant	0.864096
	total (n=144)	0.45 ± 0.58	1.05 ± 0.95	1.06 ± 0.94	not significant	0.705424



**Fig. 2** A pictorial comparison of images obtained using T2\* GRE sequence with short echo time for patients with high (a) and low (b) values of structural parameters (indicating worse and better Achilles tendon conditions, respectively; labels: A – anterior; P – posterior, L – left; R – right)

and high mutual information, low correlation coefficient and high mutual information, high correlation coefficient and low mutual information, and low correlation coefficient and low mutual information (see Fig. 3).

Structural parameters with a significant correlation coefficient and normalised mutual information over 0.3 were used to create a list of the top significant features in each of the 4 categories, separately for features obtained from radiologists and the software.

For 3 out of 4 categories of functional features, the maximum obtained correlation coefficients and normalised mutual information were higher for calculations using structural features obtained from software evaluation than those assessed by a radiologist (Fig. 4a; Table 3). Only in the case of functional features related to stability, higher results were obtained for radiological assessments.

The number of all significant structure-function relationships was summed up. Significant relationship was understood as one where at least one of the examined metrics (correlation coefficient or normalised mutual information) was above the assumed significance threshold. In 3 out of 4 categories of functional features groups, their number was greater for the study using structure assessments from the AI software than those from the radiologist (Fig. 4b; Table 3). Only in the case of functional features related to muscle torque a greater number of significant relationships were obtained for radiological assessments.

#### Transformation Function

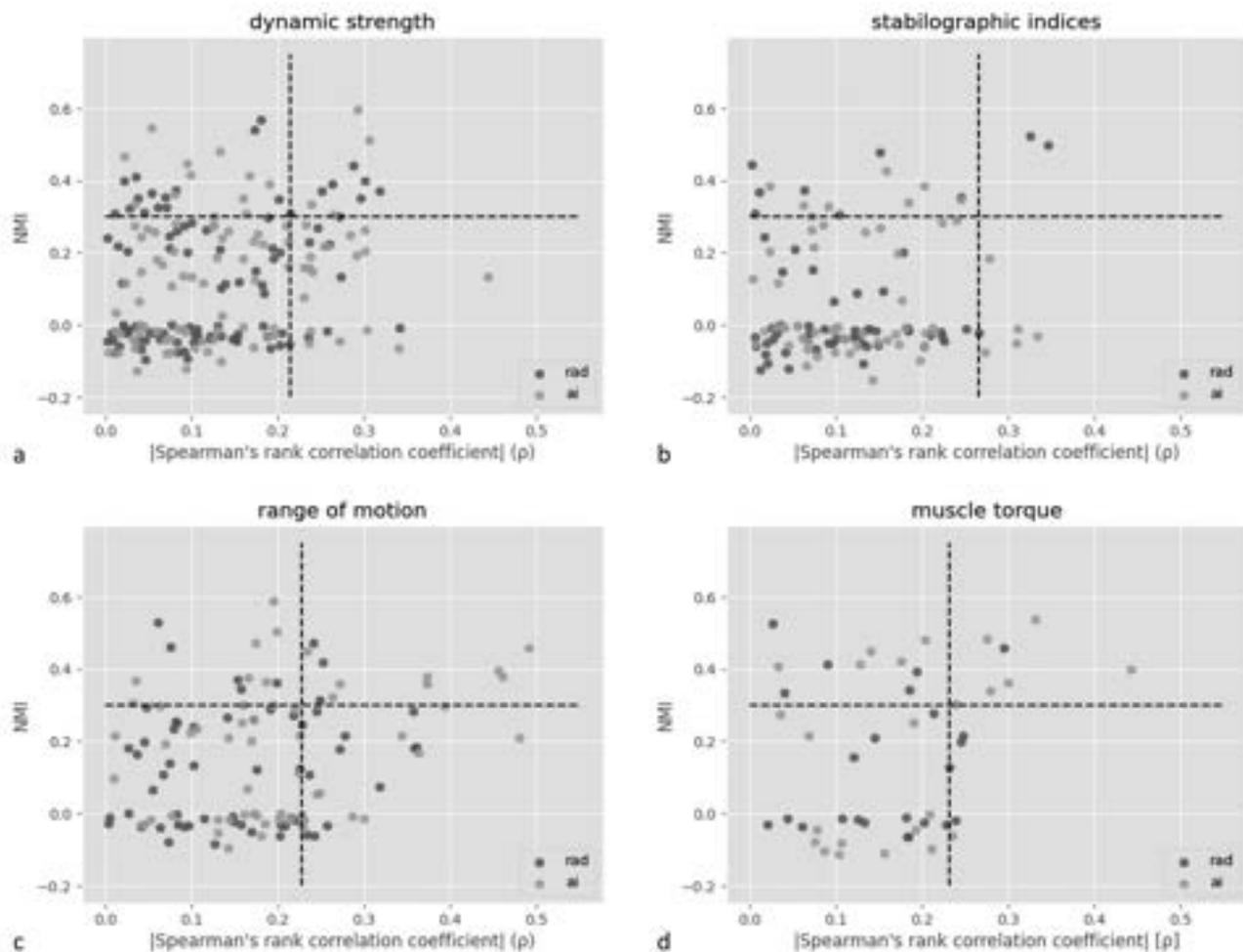
Four approaches were used to find the best transformation function of the structural information in order to explain the most variance in the functional data. In 7 out of 8 tested cases, AutoGluon models coped best with this task. In one case, i.e. features related to muscle torque, the random forest model performed best, explaining 59% of the variance (Fig. 5).

In all groups of functional features, the best results were achieved for relationships with the assessments from AI models (Table 4). The explanation of linear relationships using the weighted average of structural features with weights selected in the optimisation process did not exceed 7% of the explained variance of functional features, indicating that there are rather non-linear relationships between function and structure.

#### Achilles Tendon Structural Biomarkers

For each set of features, the best model used different structural features with different importance to predict the result. The normalised significance of features is shown in the following figures: dynamic strength (Fig. 6a), stabilographic indices (Fig. 6b), range of motion (Fig. 6c), and muscle torque (Fig. 6d).

The most important contribution to the dynamic strength relationship was made by tendon oedema, followed by structural changes. In the case of the stabilographic indices, the most important feature was tendon thickening, followed again by structural changes. For range of motion, tendon thickening and tissue oedema



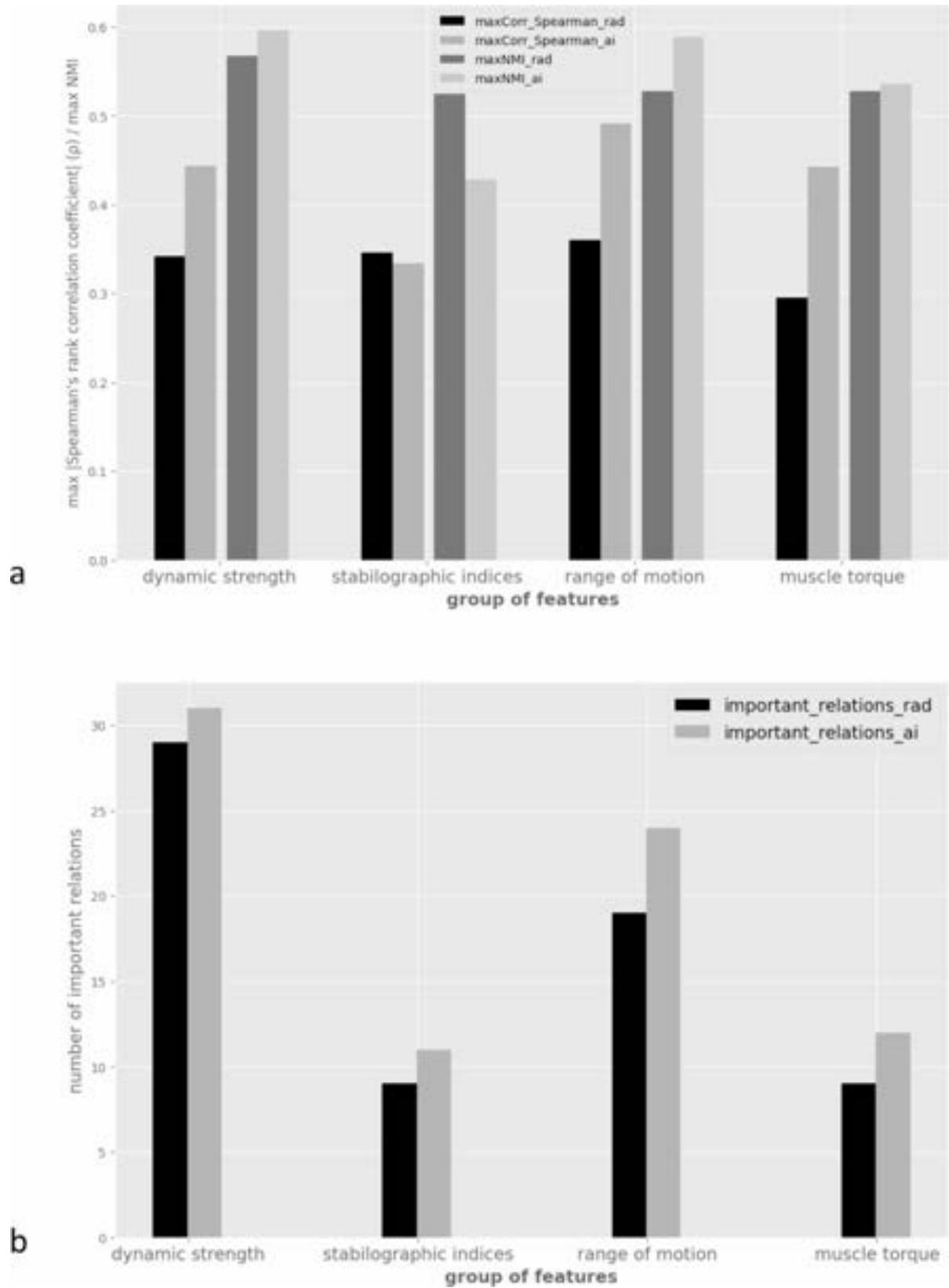
**Fig. 3** Values of Spearman correlation coefficients and normalised mutual information (NMI) between structural features indicated by both the radiologist (rad) and SmarterOrthoMRI (ai) software and functional meta-parameters related to dynamic strength (a), stabilographic indices (b), range of motion (c) and muscle torque (d)

were the most significant factors. In the case of muscle torque, we observed the highest contribution from the sharpness of tendon edges and tendon uniformity. Although tendon thickening appeared in first place in two cases, i.e. stabilographic indices and range of motion, the unique combination of parameters contributions constituted by at least two structural factors appeared in all studied functional groups allowing for further work on unique biomarkers definition.

## Discussion

In this study, we proposed a novel AI and MRI-based protocol to examine the relationship between the structural aspects of the Achilles tendon and functional metrics in sports participants. Our investigation encompassed both linear and non-linear methodologies, a comparison between AI-driven reasoning and radiologist assessments, and an exploration of the significance of recognising structural biomarkers. These biomarkers could

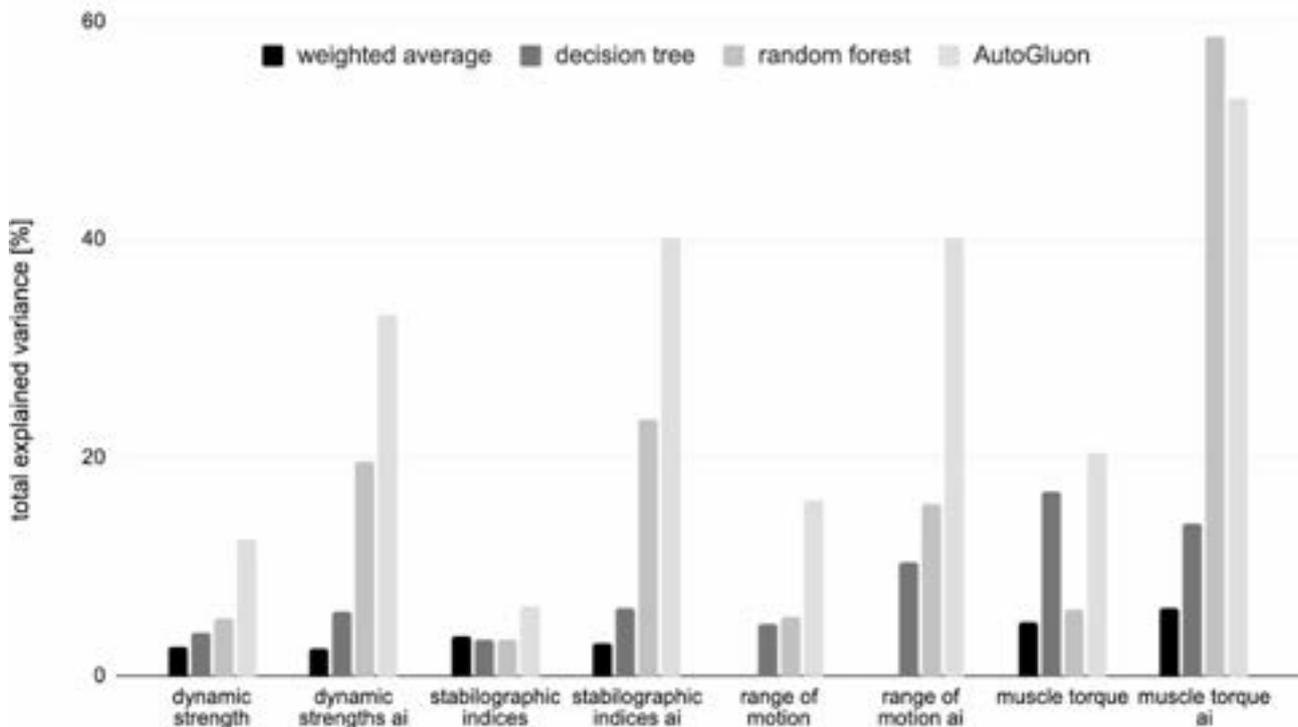
potentially be applicable for injured patients undergoing medical surgeries, checkups, and patient recovery, as well as for the context of healthy individuals to supervise athletes, reduce injuries, and apply personalised treatment tactics in professional sports. Moreover, the protocol consists of both leg examinations, is cost-effective, as it is based on a very short gradient sequence, with an echo time less than 5 ms, and results in a participant turn-around time of less than 15 min. While sequences like Proton Density Fat Sat are commonly used in musculo-skeletal assessments, we opted for the T2\* GRE sequence with a short echo time due to its enhanced sensitivity in detecting subtle tendon changes, as supported by both existing literature [37] and our comparative studies. This fact implies the possibility of using it as a population screening tool for the early detection of structural and functional risk factors, which could lead to the implementation of early treatment tactics and a reduction in



**Fig. 4** Comparison between the maximal values of Spearman correlation coefficients and normalised mutual information (a), as well as the total number of significant relationships (b) between structural features indicated by the radiologist (rad) and SmarterOrthoMRI software (a.i.) and functional meta-parameters in four different groups

**Table 3** Comparison of the relationships between achilles tendon structure assessed by radiologist and AI and functional meta-parameters

group of features	Max spearman correlation coefficients		Max normalised mutual information (NMI)		Total number of significant relationships (structure vs. function)	
	radiologist assessments	AI assessments	radiologist assessments	AI assessments	radiologist assessments	AI assessments
dynamic strength	0.34	0.44	0.57	0.6	29	31
stabilographic indices	0.35	0.33	0.52	0.42	9	11
range of motion	0.36	0.49	0.53	0.59	19	22
muscle torque	0.3	0.44	0.53	0.54	9	12



**Fig. 5** Level of total variance of functional meta-parameters explained by structural features being input to different types of transformation functions: decision trees, random forest, AutoGluon models and weighted average with optimised weights

**Table 4** Total variance explained by the best model

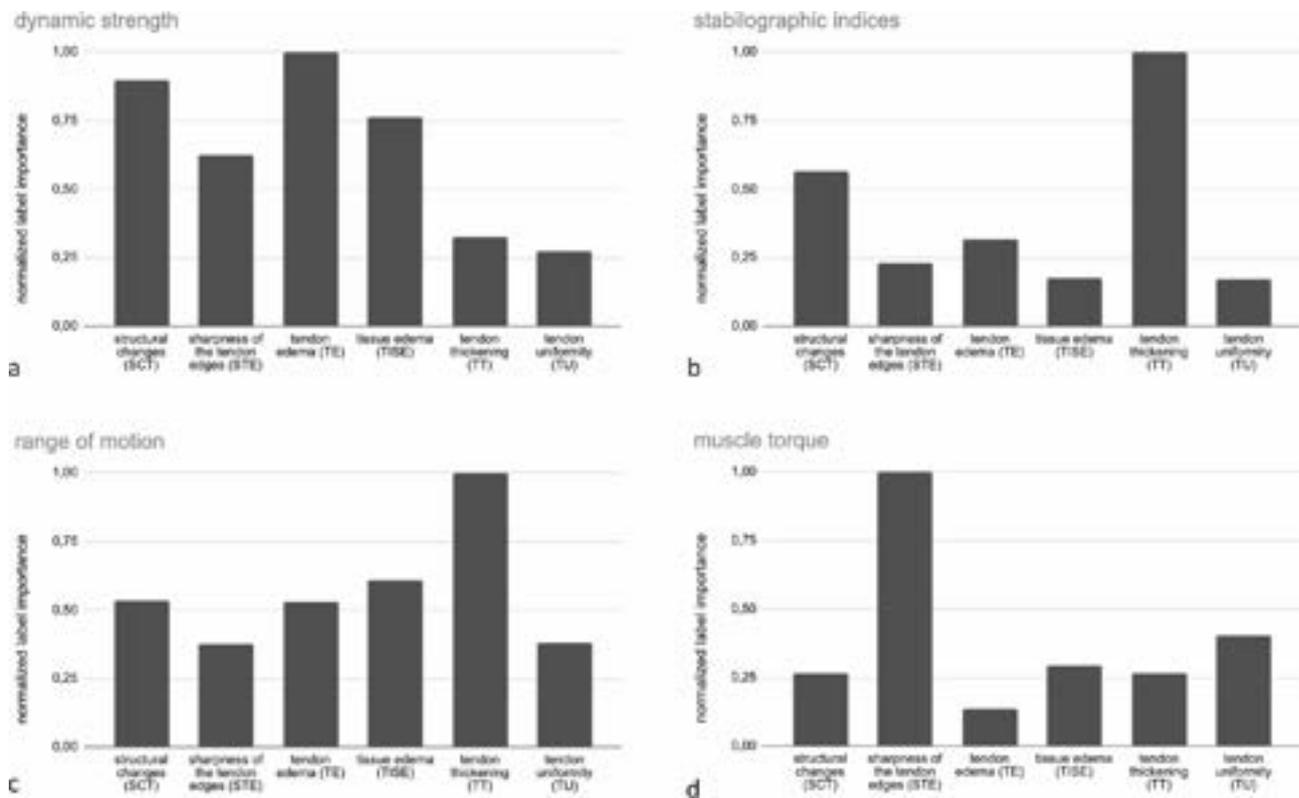
Group of features	Radiologist assessments	AI assessments
dynamic strength	13%	33%
stabilographic indices	6%	40%
range of motion	16%	40%
muscle torque	20%	59%

the number of injuries, thus introducing significant cost savings for stakeholders.

Literature shows a link between tendon structure and function, like diverse tenocyte responses to different types of mechanical stress [38, 39]. Our findings on the Achilles tendon reveal both linear and non-linear relationships between these aspects, highlighting their complex nature. This underscores the need for non-linear methods when investigating the influence of the Achilles tendon on functional results. Our research complements

the studies by Szaro et al. [22], which examined geometric differences in Achilles tendon dimensions and their correlations in normal and tendinopathic tendons using MRI. As the authors mentioned, the dimensions of the Achilles tendon impact its function: a longer tendon enhances endurance running performance, while an increased diameter is associated with degeneration, reduced stiffness, and lower tensile strength. Our studies further this understanding by mapping AT structure to its function and illustrating the nature of these relationships.

Our study found AI-driven descriptions more effective than radiologist evaluations in identifying important relationships and explaining variance in functional data (33–59% with AI, 6–20% with radiologists). The given outcomes may result from the fact that in regular settings, radiologists utilise more than just one MRI



**Fig. 6** Normalised contribution of individual structural features in explaining the variance of functional meta-parameters related to dynamic strength (a), stabilographic indices (b), range of motion (c) and muscle torque (d)

sequence to assess the tendon, thus making it not only more time-consuming but also more accurate. It allows them to cross-verify findings, reducing the likelihood of missing subtle changes in the tendon tissue, but also relies heavily on the radiologist's experience and expertise. The integration of AI algorithms, with their capacity to process substantial datasets and exhibit generalisation, enabled a way to limit the number of sequences and make more thorough and precise evaluations of structural as well as functional aspects within one examination. This highlights the trade-offs between the comprehensive, yet subjective and time-consuming nature of radiologist evaluations, and the efficient, consistent, and objective assessments provided by AI. By providing this context, we aim to emphasise the complementary roles of radiologists and AI in MRI evaluations and how they can be integrated to enhance the accuracy and efficiency of Achilles tendon injury assessments. The results align with other research using AI in radiology [40–43] and sports injury prediction [44, 45], indicating AI's growing role in enhancing diagnostic accuracy and treatment strategies in musculoskeletal health.

Our research also delved into structural biomarkers. By identifying key structural parameters that strongly influenced models explaining functional differences, we uncovered potential markers for injury risk monitoring.

Detecting early pathologies that affect function can guide personalised approaches such as nutritional adjustments, training modifications, and supplementation to reduce injury risks [46]. Furthermore, understanding the connection between functional issues and underlying structure is essential for minimising time away from activities. This knowledge aids in selecting targeted treatment strategies that address individual needs based on a short MRI examination.

### Clinical Implications

Objective AI-based assessment of MRI biomarkers within the T2\* Gradient Echo sequence with short echo time is crucial for early detection of structural changes in collagen tissue, such as the Achilles tendon, and can be integrated into clinical practice as a screening tool, post-surgery assessment, return-to-sport protocols, and in developing novel treatments. The identified connections between the Achilles tendon structure and its function may offer valuable perspectives for healthcare professionals, especially those in sports clubs and academia, assisting in the evaluation of elements associated with Achilles tendon injuries. The use of AI in assessments holds the promise of improving orthopaedic procedures by accelerating patient turnover through swift medical image analysis. It also introduces a pioneering and thorough

structured analysis well-suited for injury reduction strategies.

### Limitations

While our study contributes valuable insights into the relationship between Achilles tendon structure and function, it is important to acknowledge some limitations. The sample size of our study was relatively small, and further studies with larger cohorts are needed to validate our findings. Additionally, the use of AI algorithms and machine learning techniques relies heavily on the quality and quantity of available data, and ongoing advancements in these areas may yield even more accurate and refined results in the future.

### Conclusion

In conclusion, our study highlights the non-linear nature of the relationship between Achilles tendon structure and function, while also introducing a short and cost-effective MRI-based protocol for both structural and functional assessment. The superiority of AI-based reasoning and the identification of structural biomarkers emphasise the potential for enhancing injury prevention strategies and customising treatments to individual needs. Future research should focus on expanding our understanding of the complex interactions between structure and function, as well as harnessing the power of AI and machine learning to optimise diagnostic and therapeutic approaches in orthopaedic settings.

### Abbreviations

AI	Artificial intelligence
AT	Achilles Tendon
ATI	Achilles Tendon Injury
ATIs	Achilles Tendon Injuries
COM	Body mass centre
CMJ	Counter-movement jump
FOV	Field of view
GRE	Gradient Echo
MAE	Mean absolute error
ML	Machine learning
MR	Magnetic resonance
MRI	Magnetic resonance imaging
NBA	National Basketball Association
NFL	National Football League
NMI	Normalised mutual information
PCA	Principal component analysis
Rad	Radiologist
ROM	Range of movement
SCT	Structural changes within the tendon
SCMJ	Single-leg counter-movement jump
SD	Standard deviation
SJ	Squat jump
STE	Sharpness of the tendon edges
TE	Tendon oedema
TisE	Tissue oedema
TT	Tendon thickening
TU	Tendon uniformity
UTE	Ultrashort Echo Time

### Supplementary Information

The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1186/s40798-024-00786-6>.

Supplementary Material 1

### Acknowledgements

The authors would like to thank Agnieszka Rosinska for her assistance in recruitment, Agnieszka Pomianowska for her contribution to the data labelling process, and Agnieszka Nowak for her help in conducting functional tests.

### Author Contributions

Study design: NK, MS; Data collection: NK, KJ, BW, AZ, AN, MS; Data interpretation: NK, KJ, PA, BW, AZ, AN, BC-L, MS; Data analysis: JW, AK; Statistical analysis: JW; Machine learning experiments: AK; Literature review for Background and Discussion sections: NK, KJ, JW, PA, BW, AZ, AN, BC-L, MS; Manuscript writing: NK, JW, AK, MS; Manuscript editing: NK, JW; All authors approved the final version of the manuscript and agree both to be personally accountable for their own contributions and to ensure that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work, even ones in which the author was not personally involved, are appropriately investigated, resolved, and the resolution documented in the literature.

### Funding

Smarter Diagnostics sp. z o. o. These authors, who are members of the funding body, were actively involved in the design of the study, as well as in the collection, analysis, and interpretation of data, and the writing of the manuscript. The funding body provided essential resources and support throughout the research process.

### Data Availability

Data may be obtained after seeking approval from a third party (from Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw and from the Institute of Sport - National Research Institute in Warsaw) and are not publicly available. The code of the software used for the study is not publicly available.

### Declarations

#### Ethics Approval and Consent to Participate

The ethical approval was granted by the University College of Rehabilitation in Warsaw (current name Akademia Medyczna Nauk Stosowanych i Holistycznych) Bioethics Committee under approval number 1/2021. All research procedures were completed in accordance with the ethical standards described in the Declaration of Helsinki. The study proceeded after participants provided written consent, having been briefed on all procedures and objectives.

#### Consent for Publication

Not applicable.

#### Competing Interests

The authors have no conflicts of interest.

#### Author details

<sup>1</sup>Interdisciplinary Centre for Mathematical and Computational Modelling, University of Warsaw, Warsaw, Poland

<sup>2</sup>Smarter Diagnostics, Olsztyn, Poland

<sup>3</sup>Faculty of Rehabilitation, Jozef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Warsaw, Poland

<sup>4</sup>Faculty of Materials Science and Engineering, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland

<sup>5</sup>Gamma Medical Center, Warsaw, Poland

<sup>6</sup>MIRAI Clinic, Otwock, Poland

© The Author(s) 2024

Published online: 05 November 2024

## References

- Kujala UM, Sarna S, Kaprio J. Cumulative Incidence of Achilles Tendon Rupture and Tendinopathy in Male Former Elite Athletes. *Clin J Sport Med*. 2005;15(3):133-5. PMID: 15867554.
- Parekh S, Shah J. Epidemiology and outcomes of Achilles Tendon Ruptures in the National Football League. *Foot Ankle Orthop*. 2017;2(3):247301141750003. PMID: 20400426.
- Alegre B, Seijas R, Alvarez P, Perez A. The Achilles Tendon Rupture in Basketball: Systematic Review of the Present Literature. *Surg J*. 2021;07(03):e265-70. PMID: 34541320.
- Brooks JH, Kemp S. Injury-prevention priorities according to playing position in professional rugby union players. *Br J Sports Med*. 2011;45(10):765-75. PMID: 20484316.
- Lieberthal K, Paterson KL, Cook J, Kiss Z, Girdwood M, Bradshaw EJ. Prevalence and factors associated with asymptomatic Achilles tendon pathology in male distance runners. *Phys Ther Sport*. 2019;39:64-8. PMID: 31261019.
- Kienstra CM, Asken TR, Garcia JD, Lara V, Best TM. Triathlon injuries: transitioning from Prevalence to Prediction and Prevention. *Curr Sports Med Rep*. 2017;16(6):397-403. PMID: 29135637.
- Huttunen TT, Kannus P, Rolf C, Fell'ander-Tsai L, Mattila VM. Acute Achilles Tendon ruptures: incidence of Injury and surgery in Sweden between 2001 and 2012. *Am J Sports Med*. 2014;42(10):2419-23. PMID: 25056989.
- Lantto I, Heikkinen J, Flinkki A T, Ohtonen P, Leppilähti J. Epidemiology of Achilles tendon ruptures: increasing incidence over a 33-year period. *Scand J Med Sci Sports*. 2014;25(1):e133-8. PMID: 24862178.
- Murdock CJ, Ochuba AJ, Xu AL, Snow M, Bronheim R, Vulcano E et al. Operative vs Nonoperative Management of Achilles Tendon Rupture: A Cost Analysis. *Foot Ankle Orthop*. 2023;8(1):247301142311564. PMID: 36911422.
- Westin O, Svensson M, Helander KN, Samuelsson K, Silbernagel KG, Olsson N, et al. Costeffectiveness analysis of surgical versus non-surgical management of acute Achilles tendon ruptures. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2018;26(10):3074-82. PMID: 29696317.
- Trivedi NN, Varshneya K, Calcei JB, Lin K, Sochaki KR, Voos JE, et al. Achilles Tendon repairs: identification of risk factors for and Economic Impact of complications and Reoperation. *Sports Health*. 2022;15(1):124-30. PMID: 35635017.
- Nilsson N, Helander KN, Senorski EH, Holm A, Karlsson J, Svensson M et al. The economic cost and patient-reported outcomes of chronic Achilles tendon ruptures. *J Exp Orthop*. 2020;7(1). PMID: 32748273.
- Mahieu NN, Witvrouw E, Stevens V, Van Tiggelen D, Roget P. Intrinsic risk factors for the development of achilles tendon overuse injury: a prospective study. *Am J Sports Med*. 2006;34(2):226-35. PMID: 16260469.
- O'Neill S, Barry S, Watson P. Plantarflexor strength and endurance deficits associated with mid-portion Achilles tendinopathy: the role of soleus. *Phys Ther Sport*. 2019;37:69-76. PMID: 30884279.
- Pedley JS, Lloyd RS, Read PJ, Moore IS, De Ste Croix M, Myer GD, et al. Utility of kinetic and kinematic jumping and landing variables as predictors of injury risk: a systematic review. *J Sci Sport Exerc*. 2020;2:287-304.
- Bartol V, Vauhnik R, Rugelj D. Influence of the sport specific training background on the symmetry of the single legged vertical counter movement jump among female ballet dancers and volleyball players. *Heliyon*. 2022;8(9). PMID: 36185156.
- Millar NL, Silbernagel KG, Thorborg K, Kirwan PD, Galatz LM, Abrams GD et al. Tendinopathy. *Nat Rev Dis Primers*. 2021;7(1):1. PMID: 33414454.
- Steinmann S, Pfeifer CG, Brochhausen C, Docheva D. Spectrum of Tendon Pathologies: Triggers, Trails and End-State. *Int J Mol Sci*. 2020;21(3). PMID: 32013018.
- Kozlovskaja M, Vlahovich N, Ashton KJ, Hughes DC. Biomedical Risk Factors of Achilles Tendinopathy in Physically Active People: a Systematic Review. *Sports Med Open*. 2017;3(1):20. PMID: 28523640.
- Matthews W, Ellis R, Furness JW, Rathbone E, Hing W. Staging achilles tendinopathy using ultrasound imaging: the development and investigation of a new ultrasound imaging criteria based on the continuum model of tendon pathology. *BMJ Open Sport Exerc Med*. 2020;6(1):e000699. PMID: 32341798.
- Cushman DM, Petrin Z, Eby S, Clements ND, Haight P, Snitily B, et al. Ultrasound evaluation of the patellar tendon and Achilles tendon and its association with future pain in distance runners. *Phys Sportsmed*. 2020;49(4):410-9. PMID: 33153352.
- Szaro P, Gataa KG. The correlations between dimensions of the normal tendon and tendinopathy changed Achilles tendon in routine magnetic resonance imaging. *Sci Rep*. 2021;11(1):6131. PMID: 33731785.
- Astrom M, Gentz CF, Nilsson P, Rausing A, Sjoberg S, Westlin N. Imaging in chronic achilles tendinopathy: a comparison of ultrasonography, magnetic resonance imaging and surgical findings in 27 histologically verified cases. *Skeletal Radiol*. 1996;25(7):615-20. PMID: 8915043.
- Ibrahim NMA, Elsaed HH. Lesions of the Achilles tendon: evaluation with ultrasonography and magnetic resonance imaging. *Egypt J Radiol Nucl Med*. 2013;44(3):581-7.
- Ma YJ, Chang EY, Bydder GM, Du J. Can ultrashort-TE (UTE) MRI sequences on a 3-T clinical scanner detect signal directly from collagen protons: freeze-dry and Dsub2/subO exchange studies of cortical bone and Achilles tendon specimens. *NMR Biomed*. 2016;29(7):912-7. PMID: 27148693.
- Kapinski N, Zielinski J, Borucki BA, Trzcinski T, Ciszowska-Lyson B, Nowinski KS. Estimating Achilles Tendon Healing Progress with Convolutional neural networks. *Medical Image Computing and Computer assisted intervention*. In: Frangi AF, Schnabel JA, Davatzikos C, Alberola-López C, Fichtinger G, editors. MICCAI 2018. Springer International Publishing; 2018. pp. 949-57.
- Smarter Diagnostics. *SmarterOrthoMRI v. 1.0.0 RC [Computer Software]*; 2023.
- Górski M, Starczewski M, Pastuszek A, Mazur-Różycka J, Gajewski J, Buśko K. Changes of strength and maximum power of lower extremities in adolescent handball players during a two-year training cycle. *J Hum Kinet*. 2018;63(1):95-103. PMID: 30279945.
- Bednarczuk G, Wiszomirska I, Rutkowska I, Skowroński W. Role of vision in static balance in persons with and without visual impairments. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2021;57(4):593-9. PMID: 33541039.
- Kokosz M, Loza T, Saulicz E. Kinesiotherapy. In: Zembaty A, editor. *Outline of Theoretical Foundations and Diagnostics in Kinesiotherapy*. Kasper; 2002.
- Konik M, Lorkowski J, Kotela I, Wychowawski M. Biomechanical evaluation of patients after severe treatment of Achilles tendon injuries using MIS procedure. *Chir Narzadow Ruchu Ortop Pol*. 2020;85(5-6):103-8.
- Sharma C, Habib A. Mutual information based stock networks and portfolio selection for intraday traders using high frequency data: an Indian market case study. *PLoS ONE*. 2019;08(8):1-19. PMID: 31465507.
- Breiman L. Classification and regression trees. Wadsworth International Group; 1984.
- Breiman L. Random forests. *Mach Learn*. 2001;45:5-32.
- Erickson N, Mueller J, Shirkov A, Zhang H, Larroy P, Li M et al. AutoGluon-Tabular: Robust and Accurate AutoML for Structured Data. 2020.
- Mansournia MA, Collins GS, Nielsen RO, Nazemipour M, Jewell NP, Altman DG, et al. A Checklist for statistical Assessment of Medical Papers (the CHAMP statement): explanation and elaboration. *Br J Sports Med*. 2021;55(18):1009-17.
- Siriwanarangsun P, Statum S, Biswas R, Bae WC, Chung CB. Ultrashort time to echo magnetic resonance techniques for the musculoskeletal system. *Quant Imaging Med Surg*. 2016;6(6):731-43. PMID: 28090449.
- Benjamin M, Kaiser E, Milz S. Structure-function relationships in tendons: a review. *J Anat*. 2008;212(3):211-28. PMID: 18304204.
- Cook JL, Purdam CR. Is tendon pathology a continuum? A pathology model to explain the clinical presentation of load-induced tendinopathy. *Br J Sports Med*. 2009;43(6):409-16. PMID: 18812414.
- Gan K, Xu D, Lin Y, Shen Y, Zhang T, Hu K, et al. Artificial intelligence detection of distal radius fractures: a comparison between the convolutional neural network and professional assessments. *Acta Orthop*. 2019;90(4):394-400. PMID: 30942136.
- Olczak J, Fahlberg N, Maki A, Razavian AS, Jilert A, Stark A et al. Artificial intelligence for analyzing orthopedic trauma radiographs. *Acta Orthop*. 2017;88(6):581-6. PMID: 28681679.
- Mazurowski MA, Buda M, Saha A, Bashir MR. Deep learning in radiology: an overview of the concepts and a survey of the state of the art with focus on MRI. *J Magn Reson Imaging*. 2018;49(4):939-54. PMID: 30575178.
- Moawad AW, Fuentes DT, ElBanan MG, Shalaby AS, Guccione J, Kamel S, et al. Artificial Intelligence in Diagnostic Radiology: where do we stand, challenges, and opportunities. *J Comput Assist Tomogr*. 2022;46(1):78-90. PMID: 35027520.
- Ramkumar PN, Luu BC, Haeberle HS, Karnuta JM, Nwachukwu BU, Williams RJ. *Sports Medicine and Artificial Intelligence: A Primer*. *Am J Sports Med*. 2022;50(4):1166-74. PMID: 33900125.
- Kakavas G, Malliaropoulos N, Pruna R, Maffulli N. Artificial intelligence: A tool for sports trauma prediction. *Injury*. 2020;51:563-5. PMID: 31472985.
- Saragiotto BT, Di Piero C, Lopes AD. Risk factors and injury prevention in elite athletes: a descriptive study of the opinions of physical therapists, doctors and trainers. *Braz J Phys Ther*. 2014;18(2):137-43. PMID: 24845023.

## Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

# 8-week additional sensomotoric warm-up drills improves motor performance and postural stability in high-performance female Rugby-7 players

Karol Jaskulski<sup>a,†</sup>, Patrycja Bobowik<sup>a,†</sup>, Bartosz Wysoczański<sup>a</sup>, Michal Starczewski<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Faculty of Rehabilitation, Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Poland

<sup>†</sup>These authors contributed equally as first author

**Purpose:** The purpose of this study was to evaluate the effectiveness of a personalized training program to improve lower limb muscle strength and balance in professional female rugby 7 players. Given the strong association between postural stability, muscle strength and injury risk among athletes, and given the high incidence of injuries in rugby, preventive measures are warranted.

**Methods:** The study group consisted of 15 rugby 7s players (aged:  $25.53 \pm 4.58$  years) who trained at least 3 times per week and had a minimum of 2 years of training experience. They underwent an 8-week training program (2 times per week) based on the FIFA-11 and Activate protocols. Anthropometric measurements, postural stability assessment using a stabilographic platform, and maximal muscle torque were measured in the participants.

**Results:** After completing the program, the players achieved significantly better values in static stabilographic indicators with closed eyes: overall stability index (OSI) ( $P < .05$ ), anterior-posterior stability index (APSI) ( $P < .01$ ), and medial-lateral stability index (MLSI) ( $P < .01$ ). Additionally, dynamic indices at various levels of platform instability showed improvement: fall risk index (FRI12-6) ( $P < .01$ ) and FRI6-2 ( $P < .001$ ). An increase in the strength of the thigh extensors (right- R:  $P = .001$ ; left- L:  $P < .01$ ) and flexors (R:  $P < .05$ ; L:  $P < .05$ ) was also observed.

**Conclusions:** The standard training for rugby players should be supplemented with exercises from the proposed intervention to improve muscle strength and postural stability and thereby enhance proprioception.

**Keywords:** rugby, body balance, muscle strength, injury prevention program;

## Introduction

Rugby Union is a widely popular team sport, with two teams competing on the field. The number of players per team can range from 7 to 15, depending on the version of the game. We distinguish variants of Rugby Union, such as Rugby League and the dynamic and spectacular Rugby 7s. The latter is characterized by a shortened match duration (2 x 7 minutes) and a reduced number of players—down to seven per team. The shorter match time contributes to the intensification of player actions<sup>1</sup>. The game's dynamic changes in direction, intense physical clashes, and high physical demands put players at a heightened risk of various injuries<sup>2</sup>. Over a 16-year period, around 11,000 injuries were recorded among professional rugby players, with an average of two players getting injured in each match<sup>3</sup>. Injuries most often occur in the head and lower limbs<sup>3</sup>. It is lower limb injuries that are among the most common. Primarily, the medial collateral ligament (MCL) and the anterior cruciate ligament (ACL) are affected<sup>3</sup>. These injuries lead to the longest recovery times, keeping players out of competition for extended periods<sup>4</sup>. It is worth noting that, using basketball as an example, women are five times more likely to suffer ACL injuries compared to men<sup>5</sup>. Similarly, in soccer, the occurrence of ACL injuries in women has been determined to be 3-6 times more frequent than in men<sup>6</sup>.

Research on the causes and costs of sports-related injuries across five sports disciplines in New Zealand (cricket, netball, rugby league, rugby union, and soccer) showed that during

the studied period, rugby union had the highest number of injury claims. The most effective method of injury prevention is training, which includes balancing the strength of different muscle groups<sup>7</sup> and properly conducted warm-ups<sup>8,9</sup>. An example of such a preventive program is FIFA 11 and FIFA 11+. It is a comprehensive set of exercises performed during warm-up to reduce the risk of injuries. The program focuses on improving muscle strength, balance, stability, coordination, and neuromuscular control<sup>10-13</sup>. Another program is the *Activate* program, which consists of balance exercises, strength exercises, movement control, and landing techniques, aimed at reducing the number of muscles, ligament injuries, and concussions in rugby players at various levels of experience<sup>14</sup>. However, it is a general warm-up program, not specifically aimed at preventing lower limb injuries, including those of the knee joint in soccer players.

The effectiveness of the above preventive programs likely results from the relationship between muscle strength, postural stability, and proprioception. Proprioception is the perception of stimuli generated within the body and refers to both the conscious and unconscious sense of postural stability, muscle control, and joint stability<sup>15</sup>. Proper proprioception reduces the risk of injury and improves quality of life, for instance, in cases of chronic instability<sup>7,16</sup>. Moreover, training aimed at improving proprioception results in enhanced strength and balance<sup>17,18</sup>. The literature also indicates that the above interventions prevent ankle sprains<sup>19</sup> or ACL injuries<sup>18,20</sup>. They demonstrated that there is a positive correlation between proprioception and both

static and dynamic balance, as well as between muscle strength and balance. Similarly, a correlation was shown between the strength ratio of knee joint extensors to flexors and postural stability<sup>18</sup>. There is also a relationship between the ability to maintain core stability, dynamic knee valgus, and the range of motion of the knee and ankle joints, and a higher risk of ACL injury in female athletes compared to male athletes<sup>21</sup>. Following this line of reasoning, female rugby 7 players who participated in the individually designed training program, which included strength, balance, and proprioceptive exercises, should show improvement in each of these parameters.

The current research results indicate the need for preventive measures among rugby players<sup>22</sup>. It is important to highlight that current scientific literature contains few studies on women participating in this sport, and most of them focus on injury rates rather than preventive strategies<sup>23,24</sup>. Therefore, it is reasonable to attempt to develop a set of exercises that would improve muscle strength and postural stability parameters, which female athletes could additionally incorporate into their training cycle. This, in turn, would lead to improved proprioception in players. As mentioned, improving proprioception is one of the fundamental preventive measures that would result in a reduction in the number of injuries. Therefore, the aim of this study is to evaluate the effectiveness of a customized training program aimed at improving muscle strength and postural stability.

## Material and methods

### Participants

A total of 21 women were qualified for the study. The minimum required group size was set at  $n=20$  with the assumptions of  $\alpha=.05$ ; effect size  $=.6$ ; test power $=.8$ . The inclusion criteria were female gender, age 18-35 years, at least 2 years of rugby 7 training experience, and regular participation in training (at least 3 times a week). The players reported an average weekly training time of  $7.97 \pm 2.13$  hours. Players younger or older than 18-35 years, those reporting less than 2 years of training experience, and those who had suffered upper or lower limb injuries preventing training within the 6 months preceding the study were excluded. All participants provided written consent to participate in the study. In consequence of injuries a total of fifteen players completed the full training program and the pre- and post-tests.

### Procedure

The study evaluated 15 Rugby 7s players with a mean age of 25.5 years ( $\pm 4.58$ ). Their average body mass was 69.58 kg ( $\pm 12.62$ ), while the mean waist circumference (WC) and hip circumference (HC) were 77.27 cm ( $\pm 6.91$ ) and 95.87 cm ( $\pm 7.29$ ), respectively. The average body height of the players was 167.87 cm ( $\pm 6.32$ ). All the measurements were performed after the participants were familiarized with the measurement protocol and completed a warm-up

### Methods

Measurements of the maximum muscle strength moments for the hip, knee, and ankle joints were performed using the Maximum Voluntary Contraction (MVC) method on measurement equipment TBK3-P (JBA Staniak, Warsaw, Poland). Participants were instructed to exert maximal effort while pushing a bar or testing apparatus for 3 s. The participants were stabilized by a close-fitting roller at the level of the anterior iliac spine at the proximal part of the thigh and posteriorly at the lumbar spine. The upper limbs were crossed over the chest. The highest value (peak) was used for the statistical analysis. Finally, the absolute [N·m] and relative to body mass [N·m·kg<sup>-1</sup>] values of the

following parameters were analyzed.

Normalized values of muscle torque per body weight of each participant were obtained. Measurement positions were chosen in accordance with the producer's manual (sitting for hip flexors and knee extensors as well as foot flexors and extensors, prone position for hip extensors) with measurement readouts from mounted tensometric enhancer WPT 005 (JD Jarosław Doliński Systemy Mikroprocesorowe, Warsaw, Poland).

Stabilographic assessments were conducted to evaluate postural stability using the 950-440 System, Balance SD, 115 VAC Biodex Balance System SD platform by Biodex Medical Systems (Inc. New York, USA). Three protocols, each lasting 20 s with 10 s breaks, were implemented on the BBS. The Postural Stability Test (PST) was performed with starting position: standing, upper limbs along the torso, on the platform set to level 12 with eyes open (EO) and eyes closed (EC), and the following values were determined: Overall Stability Index (OSI), Anterior-Posterior Stability Index (APSI), and Medial-Lateral Stability Index (MLSI). The Fall Risk Test was performed with EO on the platform with increasing instability from level 12 to 6 and from 6 to 2 (level 12 being the most stable). Based on this, the Fall Risk Index (FRI) was determined.

### Intervention

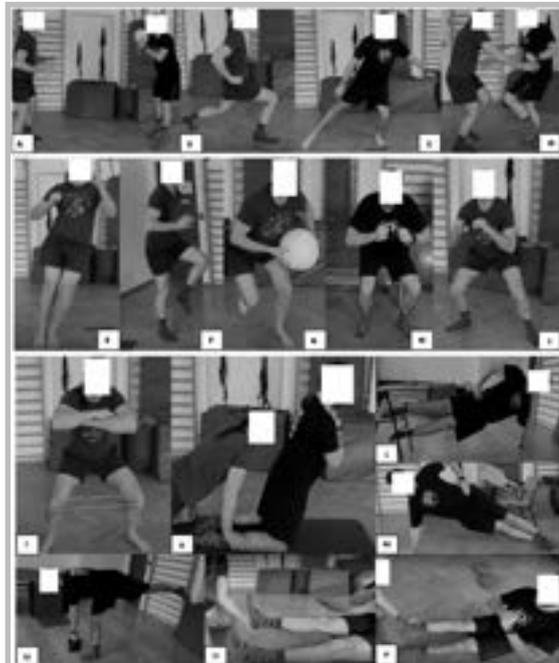
As part of the intervention, a customized training program Knee Armor Training (KAT) was designed to improve knee joint stability, balance, and muscle strength. The program lasted for 8 weeks, with sessions held twice a week for 45 minutes each. The exercises were divided into three main parts and were based on the "The FIFA 11", "FIFA 11+" and "Activate" programs<sup>25-28</sup>. To increase the effectiveness of the therapeutic intervention in terms of improving proprioception, some exercises were performed on an unstable surface<sup>29,30</sup>. The first part consisted of the following exercises: ball throws performed on unstable surface (Fig. 1A), single-leg lunges onto a sensorimotor cushion (Fig. 1B), the single-leg clock exercise, where the athlete reaches out with the free leg toward various "clock" directions as indicated by the coach (Fig. 1C), and "Testing the partner" a single-leg balance challenges involving players pushing each other to challenge stability<sup>26,27</sup> (Fig. 1D).

The second part of the intervention consisted of five exercises aimed at improving postural stability and plyometric performance. These exercises included: jumping with both feet in eight directions, changing direction each time based on the coach's signal (Fig. 1E), skip A drill (Fig. 1F), side-to-side jumps with weights (Fig. 1G), two-footed box jumps landing with a controlled squat (Fig. 1H) and lateral steps in a squat position, responding to verbal commands from the coach (Fig. 1I).

The final part of the intervention consisted of the following exercises: crab walks with resistance bands (Fig. 1J), Nordic hamstring curls for eccentric hamstring strength (Fig. 1K), side planks with hip raises (Fig. 1M), high side planks with leg adduction, on elevated support (Fig. 1L), single-leg hip hinge with a barbell (Fig. 1N), and assisted lower limb stabilization exercises, where a partner provided resistance in various directions (Fig. 1O-P)<sup>26,27,29</sup>.

### Changes in relation to FIFA 11, FIFA 11+, Activate:

1. Unstable surfaces: The inclusion of unstable surfaces aligns with proprioceptive training's goal of improving neuromuscular coordination and balance control, commonly found in both FIFA 11+ and Activate programs, where dynamic balance under challenging conditions is a key focus.
2. Plyometrics: Jumping in multiple directions and adding



**Figure 1.** Exercises of the Knee Armor Training (KAT) protocol.

coach-driven directional changes integrates dynamic balance and agility, similar to the change-of-direction drills seen in FIFA 11+. These kinds of exercises help improve reaction time and landing mechanics, both critical for injury prevention.

3. Single-leg movements: Exercises like the single-leg clock and single-leg hip hinge mirror proprioceptive drills that aim to increase core stability and control of the hip and knee joints, reducing the risk of ACL injuries, which is a focus in both injury prevention programs.
4. Resistance work: Using resistance bands in exercises like the crab walks and weight-based jumps, mirrors the eccentric strengthening principles of Activate and FIFA 11+, which aim to strengthen key stabilizer muscles (such as the glutes and hamstrings), crucial for reducing knee valgus and other injury-prone movements in athletes.

#### Statistical analysis

Statistical analysis was performed using the Statistica version 14 software by TIBCO Software Inc. Palo Alto, USA 2017. The normality of the variable distribution was assessed using the Shapiro-Wilk test. To evaluate the differences in the values of individual variables, a paired t-test and the Wilcoxon test were used. A significance level of  $P \leq .05$  was adopted. For the analysis

of variance (ANOVA), eta squared ( $\eta^2$ ) was used to measure the proportion of variance explained by the independent variable. Thresholds were defined as follows: for a small effect  $\eta^2 \geq .01$ ; for a medium effect  $\eta^2 \geq .06$ ; and for a large effect  $\eta^2 \geq .14$ .

#### Results

Following the intervention, significant improvements were observed in stabilographic parameters, indicating enhanced postural control and dynamic balance in professional female rugby 7s players. Specifically, reductions in static stabilographic indicators with eyes closed (EC) and dynamic indicators were evident. The Overall Stability Index (OSI) showed a significant reduction under EC conditions, with values decreasing from 3.2 to 1.7 (95% CI), a  $P$ -value of .027, and an  $\eta^2$  of .302, indicating a moderate effect size. Similarly, the Anterior-Posterior Stability Index (APSI) improved significantly, with values decreasing from 2.9 to 1.3, accompanied by a  $P$ -value of .006 and an  $\eta^2$  of .482, highlighting a strong effect size. Improvements were also observed in the Medial-Lateral Stability Index (MLSI), which decreased from 2.0 to 0.9, with a  $P$ -value of .009 and an  $\eta^2$  of .417, reflecting a substantial effect size. Furthermore, the Fall Risk Index (FRI) demonstrated significant reductions under both the 12-6 ( $P = .002$ ,  $\eta^2 = .524$ ) and 6-2 ( $P = .001$ ,  $\eta^2 = .73$ )

**Table 1.** Differences in stabilographic parameter values before and after the intervention

Parameters	Pre-tests			Post-test			P-value	F	$\eta^2$	
	mean±SD	Me	CI 95% [SI]	mean±SD	Me	CI 95% [SI]				
OSI	EO	.77±.46	.80	.52-1.03	.71±.19	.70	.6-.81	.60	.29	.20
	EC	2.97±2.28	3.20	1.71-4.23	1.68±.6	1.70	1.35-2.01	.03	6.07	.30
APSI	EO	.62±.39	.60	.41-.83	.56±.19	.60	.46-.66	.61	.27	.02
	EC	2.44±1.48	2.90	1.62-3.26	1.22±.36	1.30	1.02-1.42	<.01	13.06	.48
MLSI	EO	.35±.24	.40	.21-.48	.31±.12	.30	.24-.37	.53	.58	.04
	EC	1.89±1.31	2.00	1.17-2.62	1.01±.33	.90	.83-1.19	<.01	10.02	.42
FRI	12-6	1.26±.59	1.20	.93-1.59	.73±.2	.70	.61-.84	<.01	15.42	.52
	6-2	1.55±.7	1.40	1.16-1.94	.9±.35	.50	.71-1.09	<.01	37.39	.73

Legend 1. EO – eyes open; EC – eyes closed; OSI – Overall Stability Index; APSI – Anterior-Posterior Stability Index; MLSI – Medial-Lateral Stability Index; FRI – Fall Risk Index, platform instability levels, 12-6 more stable platform, 6-2 very unstable platform; Me – median, F – ratio of variance, SI – Stability Index unit.

= .727) conditions, indicating enhanced platform stability with very large effect sizes. These results suggest that the intervention was effective in improving postural stability and balance, particularly under conditions that challenge both dynamic and static control. Detailed data are presented in Table 1. The results are presented in SI (Stability Index units), as proposed by the device manufacturer.

A comparative analysis of the maximum muscle torques [Nm] normalized to the participants' body weight [kg] was performed before and after the intervention. Statistical analysis showed a significant increase in the strength of the thigh extensors. Detailed results are presented in Table 2 (Table 2).

The intervention resulted in significant improvements in muscle strength across specific lower limb muscle groups, particularly

**Table 2.** Differences in normalized muscle strength values for individual lower limb muscle groups, by body weight, before and after the intervention

Variables		Pre-tests			Post-test			P-value	F	$\eta^2$
		mean±SD	Me	CI 95%	mean±SD	Me	CI 95%			
Hip Extension [N·m·kg <sup>-1</sup> ]	R	1.17±.46	1.15	.92-1.43	1.74±.51	1.79	1.45-2.02	.001	19.020	.576
	L	1.46±.59	1.55	1.14-1.79	1.98±.54	1.91	1.68-2.28	.014	7.937	.361
Hip Flexion [N·m·kg <sup>-1</sup> ]	R	1.43±.32	1.35	1.26-1.61	1.71±.35	1.76	1.51-1.9	.027	6.229	.307
	L	1.34±.4	1.27	1.12-1.56	1.64±.37	1.69	1.43-1.85	.047	4.614	.247
Knee Extension [N·m·kg <sup>-1</sup> ]	R	1.75±.31	1.77	1.58-1.92	1.86±.29	1.83	1.71-2.02	.340	.977	.065
	L	1.72±.34	1.78	1.54-1.91	1.64±.18	1.65	1.54-1.73	.397	.763	.051
Knee Flexion [N·m·kg <sup>-1</sup> ]	R	1.22±.23	1.26	1.09-1.34	1.2±.19	1.19	1.1-1.3	.810	.059	.004
	L	1.27±.43	1.73	1.04-1.51	1.05±.23	1.05	.92-1.18	.068	3.916	.218
Foot extension [N·m·kg <sup>-1</sup> ]	R	.74±.18	.77	.64-.84	.78±.2	.74	.67-.89	.488	.507	.034
	L	.82±.2	.83	.71-.93	.8±.19	.78	.69-.91	.729	.125	.008
Foot Flexion [N·m·kg <sup>-1</sup> ]	R	2.42±.54	2.56	2.12-2.72	2.02±.71	1.86	1.63-2.42	.03	5.867	.295
	L	2.6±.46	2.64	2.34-2.84	1.92±.63	2.0	1.57-2.27	.001	16.440	.540

Legend 2. P – right; L – left; Me – median, F – ratio of variance.

in hip extension and foot flexion. Both the right and left limbs exhibited substantial gains in normalized hip extension strength, with P-values of .001 and .014, and effect sizes ( $\eta^2$ ) of .576 and .361, indicating large to moderate improvements. For hip flexion, significant gains were observed in both limbs, with P-values of .027 and .047, and  $\eta^2$  values of .307 and .247, reflecting medium to small effect sizes. However, no significant changes were found in knee extension strength for the right (P = .340) or left (P = .397) limbs. In knee flexion, the right limb showed no significant improvement (P = .810), while the left limb exhibited a marginal gain (P = .068) with a small effect size ( $\eta^2$  = .218). Similarly, no significant differences were observed in foot extension for either limb (P = .488 and .729). In contrast, significant improvements were noted in foot flexion strength for both the right (P = .03) and left (P = .001) limbs, with large effect sizes ( $\eta^2$  = .295 and .540), indicating substantial gains. These findings highlight the intervention's effectiveness in enhancing muscle strength in hip extension and foot flexion, though minimal or no improvements were noted in other areas.

## Discussion

The conducted intervention showed that the 8-week of Knee Armor Training (KAT) custom training positively impacts muscle strength and postural stability in a group of professional rugby-7 players. It had a particularly significant effect on dynamic and static balance indicators with eyes closed. Moreover, there was a significant increase in the strength of thigh flexors and extensors, which regulate pelvic movements and help maintain postural stability. This indicates an improvement

in neuromuscular control from the central nervous system, and thus the effectiveness of the presented training.

Current literature mainly focuses on the preventive aspects of specialized training designed for professional rugby players<sup>25</sup>. The use of the Activate program is an example of the long-term application of preventive training, as demonstrated by Attwood et al., who achieved a 40% reduction in lower limb injuries and a 60% reduction in concussions in the intervention group<sup>28</sup>. Steffen et al. observed that the key to maximizing the benefits of specialized training is performing the intervention three or more times a week, which was associated with a 60% reduction in selected injuries<sup>12,23</sup>. Currently, however, there are few reports confirming the effectiveness of the aforementioned interventions in improving muscle strength torques and postural stability in rugby players<sup>14,31</sup>.

So far, it has been shown that strength (resistance) training brings many benefits for different population of patients and athletes<sup>32,33</sup>. In addition to increasing muscle strength, strength training improves neuromuscular conduction<sup>32</sup>. Moreover, it stimulates the remodelling of ligaments and tendons, increases muscle endurance, enhances bone mass<sup>33</sup>, and improves postural stability<sup>18</sup>.

The results showed a significant increase in the strength of the hip flexors and extensors in rugby 7 players. In the study of Lee et al. (2018) concluded that weakness in knee flexors may increase the risk of injury in this muscle group. In men, when the concentric strength of the knee flexors falls below 2.4 N m/kg, the risk of injury increases fivefold (P<.001). Additionally, when the ratio of concentric strength of the hamstring muscles

to the quadriceps falls below 50.5%, the risk of injury to the hamstring group increases more than threefold ( $P < .01$ )<sup>34</sup>. Therefore, in the conducted studies, considering the preventive nature of the intervention, an attempt was made to assess the impact of the custom program on lower limb muscle strength and balance. On the other hand, after a 6-week training program, Cochrane, Harnett, and Pinfold in 2017 obtained different results to presented in this study. In their study, rugby players did not achieve an increase in muscle strength or greater activation of the muscles in the lower limb girdle ( $P < .05$ )<sup>31</sup>. According to the authors of the cited study, bodyweight exercises among professional athletes may not have been a sufficient stimulus to trigger adaptation in the musculoskeletal system.

The strength of the lower limb girdle muscles, particularly the hip extensors and rotators, is essential for maintaining pelvic stability<sup>35</sup>. Therefore, the final set of exercises in our proposed training program focused on strengthening these muscles. According to the Krosshaug et al. 2007, women with weakened thigh extensors more often experience knee valgus during landing, including a greater dynamic knee valgus angle (DKV). It was found that if the DKV angle increases within 50 milliseconds of the initial ground contact, women have a fivefold higher chance of anterior cruciate ligament (ACL) injury compared to men ( $P < .05$ )<sup>5</sup>. On the other studies by Wan et al. (2021), participants engaged in training sessions three times a week for two months, focusing on flexibility and strengthening the hamstring muscles. In their program, individuals who underwent strength training showed a significant increase in muscle strength ( $P < .001$ ) and an increase in hamstring length ( $P < .05$ )<sup>36</sup>. In the other studies, Barengo et al. observed positive results after adding just two extra training sessions per week. However, the primary focus of their intervention was to reduce injury risk rather than to improve muscle strength itself<sup>5,35,37</sup>. In the presented study, the athletes showed a decrease in the muscle strength of the foot flexors and extensors, with a significant result observed in the flexor strength (R:  $P < .05$ ; L:  $P < .01$ ). Other reports indicate that training twice a week for a period of 6 weeks resulted in a significant increase in ankle flexor strength ( $P < .01$ ); however, the study group consisted of only 9 amateur male athletes. The strength parameters that showed significant improvements were the thigh flexors and extensors. However, it would be beneficial to consider incorporating exercises with external resistance, such as squats and deadlifts. Research suggests that performing strength exercises with progressively increasing external loads, ranging from 25% to 90% of body weight, leads to an increase in lower leg extensor strength ( $P < .05$ ) and a significant improvement in maximal squat performance ( $P < .001$ )<sup>38</sup>.

Notably, the rugby players showed significantly lower post-tests values in stabilographic parameters with eyes closed, including OSI, APSI, and MLSI, as well as in FRI 12-6 and FRI 6-2 with eyes open in compare to pretests. This indicates an improvement in postural stability, possibly due to training. Similar results were reported with relation of lower limb strength in climbers, paralleling improvements seen in Rugby-7 players<sup>39</sup>. A study conducted one 16 elite players of premier football league, evaluated similar parameters following a 16-week intervention focused on proprioceptive exercises. These findings support the effectiveness of proprioceptive training in enhancing postural stability among professional athletes.

Research on the effects of using external loads to improve stability and, by extension, prevent injuries in women's rugby needs to be expanded. There is currently a lack of studies focusing on professional rugby players, with most available research addressing amateur athletes<sup>38</sup>.

The primary limitations of this study include the absence of a control group, which confines the findings to a pilot study and limits the ability to attribute the observed changes directly to the intervention. This limitation arose from the practical necessity to address performance issues identified by the coach, making it impractical to divide the group into those needing and not needing the intervention. Additionally, the study did not evaluate specific skills such as sprints, directional changes, or ball handling, including tasks like catching and passing, as incorporating these assessments could have disrupted training and preparation. Furthermore, the performance assessment was conducted immediately after the KAT protocol, preventing an evaluation of the long-term sustainability of the observed benefits.

## Practical Applications

The findings from this study indicate that incorporating a custom-designed training program focused on proprioception, muscle strength, and postural stability can significantly enhance performance and reduce injury risks for female rugby 7 players. Specifically, the exercises targeting hip flexors and extensors, as well as improving both static and dynamic balance, were shown to positively impact proprioception and neuromuscular control. To maximize these benefits, it is recommended that standard training routines for rugby players be expanded to include exercises from the custom program used in this study. The inclusion of these exercises can enhance hip stability, knee alignment, and overall balance, which are critical for reducing the occurrence of common injuries like ACL tears and lower limb strains.

Proprioceptive training, as demonstrated, also contributes to postural stability, potentially decreasing the dynamic knee valgus angle, which has been linked to higher risks of ACL injuries in female athletes. Therefore, this intervention could serve as a valuable addition to injury prevention strategies in women's rugby, and possibly other contact sports, to mitigate injury rates and promote long-term athletic performance.

## Conclusions

The implementation of the customized training program enhances proprioception in rugby 7 players by increasing the strength of hip flexors and extensors, as well as improving postural stability in both static and dynamic conditions. Standard training for rugby players should be supplemented with exercises from this program to boost muscle strength and postural stability, thereby improving proprioception. This approach could help reduce the risk of the most common injuries in the sport.

## Acknowledgments

The authors thank the participants for their participation in the training program. The authors gratefully thank the university colleagues for their cooperation and support during the writing process.

## Ethical Committee approval

SKE01 – 44/2022.

## Informed Consent Statement

Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

## ORCID

Karol Jaskulski ID <https://orcid.org/0000-0002-0781-5291>  
Patrycja Bobowik ID <https://orcid.org/0000-0003-0166-3810>  
Bartosz Wysoczański ID <https://orcid.org/0000-0003-4984-5795>  
Michał Starczewski ID <https://orcid.org/0000-0001-7419-8943>

## Topic

Orthopedic sports medicine

## Conflicts of interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

## Funding

No funding was received for this investigation.

## Author-s contribution

K.J. and P.B. made substantial contributions to the conception and design of the work, while K.J., P.B., B.W., and M.S. contributed to data acquisition, analysis, and interpretation. Drafting and Critical Revision: The initial draft was prepared by K.J. and P.B., with critical revisions contributed by K.J., P.B., B.W., and M.S. to enhance intellectual content. Final Approval: All authors (K.J., P.B., B.W., and M.S.) provided final approval for the version to be published. Accountability and Integrity: Each author agrees to be accountable for all aspects of the work, ensuring the accuracy and integrity of all parts are thoroughly investigated and resolved.

## References

1. Rugby Sevens 2024 3rd European Games official website. European Games - Rugby Sevens. <https://european-games.org/sports/rugby-sevens/>. Published October 20, 2024. Accessed October 20, 2024.
2. Schuh-Renner A, Canham-Chervak M, Grier TL, Hauschild VD, Jones BH. Expanding the injury definition: evidence for the need to include musculoskeletal conditions. *Public Health*. 2019;169:69-75. doi:10.1016/j.puhe.2019.01.002
3. West SW, Starling L, Kemp S, et al. Trends in match injury risk in professional male rugby union: A 16-season review of 10 851 match injuries in the English Premiership (2002-2019): The Professional Rugby Injury Surveillance Project. *Br J Sports Med*. 2021;55(12):676-682. doi:10.1136/bjsports-2020-102529
4. Fuller C, Taylor A, Douglas M, Raftery M. ORIGINAL RESEARCH 1 SAJSM VOL. 32 NO. 1 2020 Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) International License Rugby World Cup 2019 injury surveillance study. 2020:1-6. doi:10.17159/2078-516X/2020/v32i1a8062
5. Krosshaug T, Nakamae A, Boden BP, et al. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: Video analysis of 39 cases. *Am J Sports Med*. 2007;35(3):359-367. doi:10.1177/0363546506293899
6. Montalvo AM, Schneider DK, Yut L, et al. "What's my risk of sustaining an ACL injury while playing sports?" A systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2019;53:1003-1012. doi:10.1136/bjsports-2016-096274
7. Foss KDB, Thomas S, Khoury JC, Myer GD, Hewett TE. A school-based neuromuscular training program and sport-related injury incidence: A prospective randomized controlled clinical trial. *J Athl Train*. 2018;53(1):20-28. doi:10.4085/1062-6050-173-16
8. Id AN, Jelsma J, Dunleavy Id K, Burgess T. Effect of the FIFA 11+ soccer specific warm up programme on the incidence of injuries: A cluster-randomised controlled trial. 2021:7-16. doi:10.1371/journal.pone.0251839
9. Trzepizur M, Bielecki T, Jędrusik-Pawłowska M, Cieślak-Bielecka A. Analiza obrażeń u zawodników trenujących rugby. *J. Orthop. Trauma Surg. Relat. Res*. 2016;41(4):28-31.
10. Lopes M, Simões D, Costa R, Oliveira J, Ribeiro F. Effects of the FIFA 11+ on injury prevention in amateur futsal players. *Scand J Med Sci Sports*. 2020;30(8):1434-1441. doi:10.1111/SMS.13677
11. Franchina M, Turati M, Tercier S, Kwiatkowski B. FIFA 11+ Kids: Challenges in implementing a prevention program. *J Child Orthop*. 2023;17(1):22-27. doi:10.1177/18632521221149057
12. Steffen K, Emery CA, Romiti M, et al. High adherence to a neuromuscular injury prevention programme (FIFA 11+) improves functional balance and reduces injury risk in Canadian youth female football players: A cluster randomised trial. *Br J Sports Med*. 2013;47(12):794-802. doi:10.1136/bjsports-2012-091886
13. Bukry SA, Justine M, Azidin RMFR, et al. Effects of the FIFA 11+ injury prevention programme on muscle strength and landing biomechanical markers of ACL injury during fatigue among youth soccer players. *Biomed Hum Kinet*. 2024;16(1):173-184. doi:10.2478/bhk-2024-0018
14. Dempsey A, Roberts S, Williams S, Singh V, Shaun D. Manual for Activate training programmes programme A 1 programme U15 2 programme U16 3 programme U18 4 MANUAL World Rugby TM Injury Prevention Exercise Programme. 2023:1-10. <http://bjism.bmj.com/content/52/6/368>. Accessed November 6, 2023.
15. Gidu DV, Badau D, Stoica M, et al. The Effects of Proprioceptive Training on Balance, Strength, Agility and Dribbling in Adolescent Male Soccer Players. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19:2028. doi:10.3390/ijerph19042028
16. Cruz-Díaz D, Lomas Vega R, Osuna-Pérez MC, Hita-Contreras F, Martínez-Amat A. Effects of joint mobilization on chronic ankle instability: A randomized controlled trial. *Disabil Rehabil*. 2015;37(7):601-610. doi:10.3109/09638288.2014.935877
17. Shadrach JL, Gomez-Frittelli J, Kaltschmidt JA. Proprioception revisited: where do we stand? *Curr Opin Physiol*. 2021;21:23-28. doi:10.1016/j.cophys.2021.02.003
18. Wang H, Ji Z, Jiang G, Liu W, Jiao X. Correlation among proprioception, muscle strength, and balance. *J Phys Ther Sci*. 2016;28(12):3468-3472. doi:10.1589/jpts.28.3468
19. Riva D, Bianchi R, Rocca F, Mamo C. *J Strength Cond Res*. 2016;2(30):461-475. [www.nsc.com](http://www.nsc.com).
20. Mandelbaum BR, Silvers HJ, Watanabe DS, et al. Effectiveness of a neuromuscular and proprioceptive training program in preventing anterior cruciate ligament injuries in female athletes: 2-Year follow-up. *Am J Sports Med* 2005;33(7):1003-1010.

- doi:10.1177/0363546504272261
21. Larwa J, Stoy C, Chafetz RS, Boniello M, Franklin C. Stiff landings, core stability, and dynamic knee valgus: A systematic review on documented anterior cruciate ligament ruptures in male and female athletes. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(7). doi:10.3390/ijerph18073826
  22. King D, Hume PA, Hardaker N, et al. Female rugby union injuries in New Zealand: A review of five years (2013-2017) of Accident Compensation Corporation moderate to severe claims and costs. *J Sci Med Sport*. 2019;22(5):532-537. doi:10.1016/J.JSAMS.2018.10.015
  23. Hislop MD, Stokes KA, Williams S, et al. The efficacy of a movement control exercise programme to reduce injuries in youth rugby: a cluster randomised controlled trial. *BMJ Open Sport Exerc Med*. 2016;2(1):1-12. doi:10.1136/BMJSEM-2015-000043
  24. Hislop MD, Stokes KA, Williams S, et al. Reducing musculoskeletal injury and concussion risk in schoolboy rugby players with a pre-activity movement control exercise programme: a cluster randomised controlled trial. *Br J Sports Med*. 2017;51(15):1140-1146. doi:10.1136/BJSPORTS-2016-097434
  25. Barden C, Hancock M V, Stokes KA, Roberts SP, McKay CD. Effectiveness of the Activate injury prevention exercise programme to prevent injury in schoolboy rugby union. *Br J Sports Med*. 2022;56(14):812. doi:10.1136/bjsports-2021-105170
  26. Thorborg K, Krommes KK, Esteve E, Clausen MB, Bartels EM, Rathleff MS. Effect of specific exercise-based football injury prevention programmes on the overall injury rate in football: A systematic review and meta-analysis of the FIFA 11 and 11+ programmes. *Br J Sports Med*. 2017;51(7):562-571. doi:10.1136/bjsports-2016-097066
  27. Soligard T, Myklebust G, Steffen K, et al. Comprehensive warm-up programme to prevent injuries in young female footballers: Cluster randomised controlled trial. *BMJ (Online)*. 2009;338(7686):95-99. doi:10.1136/bmj.a2469
  28. Attwood MJ, Roberts SP, Trewartha G, England ME, Stokes KA. Efficacy of a movement control injury prevention programme in adult men's community rugby union: A cluster randomised controlled trial. *Br J Sports Med*. 2018;52(6):368-374. doi:10.1136/bjsports-2017-098005
  29. Lederman E. *Functional Exercise Prescription: Supporting Rehabilitation in Movement and Sport*. Jessica Kingsley Publishers; 2022. <https://books.google.pl/books?id=RaNnEAAAQBAJ>.
  30. Lee J, Kim J. Effects of an 8-week lunge exercise on an unstable support surface on lower-extremity muscle function and balance in middle-aged women. *Phys Act Nutr*. 2022;26(4):14-21. doi:10.20463/pan.2022.0020
  31. Cochrane DJ, Harnett MC, Pinfold SC. Does short-term gluteal activation enhance muscle performance? *Res Sports Med*. 2017;25(2):156-165. doi:10.1080/15438627.2017.1282358
  32. Harøy J, Clarsen B, Wiger EG, et al. The Adductor Strengthening Programme prevents groin problems among male football players: A cluster-randomised controlled trial. *Br J Sports Med*. 2019;53(3):145-152. doi:10.1136/bjsports-2017-098937
  33. Cauley JA, Giangregorio L. Physical activity and skeletal health in adults. *Lancet Diabetes Endocrinol*. 2020;8(2):150-162. doi:10.1016/S2213-8587(19)30351-1
  34. Lee JWY, Mok KM, Chan HCK, Yung PSH, Chan KM. Eccentric hamstring strength deficit and poor hamstring-to-quadriceps ratio are risk factors for hamstring strain injury in football: A prospective study of 146 professional players. *J Sci Med Sport*. 2018;21(8):789-793. doi:10.1016/j.jsams.2017.11.017
  35. Kibler W Ben, Press J, Sciascia A. The Role of Core Stability in Athletic Function. *Sports Medicine*. 2006;36(3):189-198. doi:10.2165/00007256-200636030-00001
  36. Wan X, Li S, Best TM, Liu H, Li H, Yu B. Effects of flexibility and strength training on peak hamstring musculotendinous strains during sprinting. *J Sport Health Sci*. 2021;10(2):222-229. doi:10.1016/J.JSHS.2020.08.001
  37. Barengo NC, Meneses-Echávez JF, Ramírez-Vélez R, Cohen DD, Tovar G, Enrique Correa Bautista J. The impact of the fifa 11+ training program on injury prevention in football players: A systematic review. *Int J Environ Res Public Health*. 2014;11(11):11986-12000. doi:10.3390/ijerph111111986
  38. Stock MS, Thompson BJ. Sex comparisons of strength and coactivation following ten weeks of deadlift training. *J Musculoskelet Neuronal Interact*. 2014;3(14):387-397.
  39. Bobowik P, Świerczek J, Jaskulski K, Wiszomirska I, Gajewski J. Evaluation of balance and muscle strength of upper and lower limbs in rock climbers. *Pol. J. Sport Tour*. 2023;30(4):19-25. doi:10.2478/pjst-2023-0021

### **Corresponding information:**

Received: 12.12.2024.

Accepted: 16.12.2024.

Correspondence to: Karol Jaskulski MSc PT  
 University: Faculty of Rehabilitation Józef Piłsudski  
 University of Physical Education in Warsaw,  
 Warsaw, Poland, Marymoncka, 34, 00-968 Warsaw,  
 Poland  
 E-mail: karol.jaskulski@awf.edu.pl



Article

# Knee Armor Training Program: An 8-Week Sensorimotor Approach to Reducing Knee Injury Risk in Women's Rugby

Karol Jaskulski <sup>1,\*</sup>, Patrycja Bobowik <sup>1,†</sup>, Bartosz Wysoczański <sup>1,\*</sup>, Agnė Predkeliėnė <sup>2,3</sup>  
and Michał Starczewski <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Rehabilitation, Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Warsaw Marymoncka Str., No. 34, 00-968 Warsaw, Poland

<sup>2</sup> Institute of Educational Research, Vytautas Magnus University, 44248 Kaunas, Lithuania

<sup>3</sup> Education Academy, Vytautas Magnus University, 44248 Kaunas, Lithuania

\* Correspondence: karol.jaskulski@awf.edu.pl (K.J.); bartosz.wysoczanski@awf.edu.pl (B.W.);  
Tel.: +48-22-834-04-31 (B.W.)

† These authors contributed equally as first author.

**Abstract: Background:** Anterior cruciate ligament (ACL) rupture is one of the most common injuries in playing rugby. The aim of this study was to assess the effect of a custom-designed training program on changes in dynamic knee valgus angle (DKV) and Reactive Strength Index (RSI), which are the main risk factors, in a group of female Rugby-7 players. **Methods:** A total of 16 professional Rugby-7 players completed an 8-week KAT program intervention, which was incorporated twice a week throughout this time. In both the pre- and post-tests, dynamic knee valgus was assessed during the drop jump (DJ) test using the frontal plane projection angle (FPPA) method. The jumps were analyzed using Dartfish 2024 software. **Results:** The post-tests revealed an increase in RSI values ( $p = 0.0496$ ;  $SD = 1.25 \pm 0.44$  vs.  $1.40 \pm 0.35$ ) and a reduction in valgus of the left knee joint ( $p = 0.01$ ;  $SD = 9.08 \pm 11.86$  vs.  $0.00 \pm 7.42$ ). The correlation between RSI and the valgus angle produced inconclusive results ( $r_s = -0.69$ ;  $p < 0.01$ ;  $r_s = -0.35$ ;  $p = 0.25$ ;  $r_s = -0.38$ ;  $p = 0.2$ ;  $r_s = -0.2$ ;  $p = 0.51$ ). Cohen's  $d = -0.37964$ . **Conclusions:** The training program proved effective in improving RSI scores and reducing the valgus angle of the left lower limb, which functioned as the supporting leg. These findings potential KAT implementation as a warm-up routine in professional women's rugby clubs.

**Keywords:** injury; anterior cruciate ligament; reactive strength index; dynamic knee valgus; rugby



Academic Editors: Giannis Giakas  
and Nili Steinberg

Received: 1 April 2025

Revised: 12 May 2025

Accepted: 25 May 2025

Published: 28 May 2025

**Citation:** Jaskulski, K.; Bobowik, P.; Wysoczański, B.; Predkeliėnė, A.; Starczewski, M. Knee Armor Training Program: An 8-Week Sensorimotor Approach to Reducing Knee Injury Risk in Women's Rugby. *J. Clin. Med.* **2025**, *14*, 3779. <https://doi.org/10.3390/jcm14113779>

**Copyright:** © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Rugby is growing rapidly among female athletes globally, with a 11% increase in participation and 37% rise in registered players reported in 2023 [1]. In Poland, the seven-a-side variant (Rugby-7) dominates women's competitions. However, this format's high-intensity, multi-match tournaments elevate injury risks [2]. During the 2023/2024 season, 384 injuries were recorded in women's Rugby-7, translating to 97.5 injuries/1000 play hours (95% CI: 88.3–107.6), with an average severity of 49.2 days lost (95% CI: 42.7–55.8) [3].

Modifiable factors that predispose individuals to knee joint injuries include lack of proper range of motion [4], improper biomechanics during landing after jump, and inadequate postural control [5]. Those also contribute to dynamic knee valgus (DKV). This abnormal movement pattern combination of hip adduction and internal rotation, anterior translation and external rotation of the tibia, and eversion of the ankle joint [6] increases

ACL strain, anterior knee pain often referred as a “runner’s knee”, patella lateralization, and accelerates chondromalacia [7–9]. Moreover, according to the research by Fuller and Taylor (2020), knee injuries, particularly ACL tears, were not listed among the most common injuries in male competitions [10] but disproportionately affect female players, accounting for 21.5% of total time lost from play compared to 10.9% [11].

The measurement of DKV is conducted while the athlete performs a movement task. One of the most used tests for this purpose is the drop vertical jump (DVJ) or drop jump (DJ) [12]. This test is not only utilized for injury risk assessment but also for evaluating motor potential. The drop vertical jump (DVJ) test is widely used to evaluate DKV and neuromuscular control. It demonstrates high inter-rater reliability ( $\kappa = 0.92$ ; 95% CI: 0.829–0.969) and concurrently measures the Reactive Strength Index (RSI), a marker of stretch-shortening cycle efficiency calculated as jump height divided by ground contact time.

The achieved jump height serves as an indicator of an athlete’s explosive power [13] and demonstrates a high level of inter-rater reliability ( $\kappa = 0.92$ ; 95% CI = 0.829–0.969;  $p < 0.05$ ). Additionally, it has a sensitivity of 95% and a specificity of 46% [14]. The Reactive Strength Index (RSI) is one of the methods used to assess the function of the stretch-shortening cycle [15]. Plyometric exercises are particularly well-suited for the purpose of determining RSI, as they enable the generation of high force in a very short time [13]. As such, the Index is also used as an ACL tear predictor [16]. The literature describes three different formulas for calculating RSI [17], with the most accurate method being the calculation of jump height based on ground reaction forces, when a force plate is available [18].

While 3D motion analysis remains the gold standard for DKV assessment [19,20], 2D video analysis offers a practical alternative, making it feasible for clinical and team settings. It involves recording movement or a functional test using a digital camera positioned directly in front of the participant and then importing the footage into video analysis software (e.g., Dartfish, Quintic, Kinovea) for evaluation [21]. Using the appropriate technique, it is possible to determine the dynamic knee valgus angle. Studies comparing the 2D method to 3D analysis have shown high reliability (ICC = 0.95 to 0.99) and strong correlation of results (ICC: 0.96; 95% CI: 0.82–0.98; ICC: 0.94; 95% CI: 0.90–0.96) [22]. This allows the results of functional tests to be easily objectified and the identification of abnormal movement patterns [23].

Since the available literature has shown that knee injuries in women’s competitions occur frequently and are associated with long recovery periods, this study focused on prevention in this area [24]. Due to the high injury rate in rugby, implementing preventative measures is essential. In sports such as basketball, soccer, and handball, differences in injury incidence between genders have been documented [25–27]; however, most studies on rugby injuries focus solely on men’s competitions, making it necessary to conduct research specifically on female athletes.

There are already many preventative training programs [28,29]. One of them is the FIFA 11+ program, which was specifically designed to combat the occurrence of non-contact injuries. It is intended for both male and female players over the age of 14. The program should be conducted as a warm-up before the main part of a training session and to be effective, it must be performed at least twice a week [30]. Activate is a warm-up exercise program designed to be used three times per week prior to rugby training and matches [29]. Moreover, the effectiveness of preventative programs also depends on the correct execution of exercises, through neuromuscular training [31]. However, none of these programs specifically target the joints most vulnerable to injury in rugby—the knee joints—despite the existing literature highlighting the necessity of such an intervention.

This gap underscores the need for a tailored intervention and led to the development of the Knee Armor Training (KAT) protocol.

The aim of this study was to evaluate the efficacy of the Knee Armor Training (KAT) protocol—an 8-week program targeting DKV and RSI—in improving knee stability among female Rugby-7 athletes, and to check if KAT will significantly reduce DKV angles and increase RSI values by enhancing neuromuscular control and plyometric capacity.

## 2. Material and Methods

The study group consisted of female rugby players. The selection was intentional, with inclusion criteria requiring at least two years of experience in Rugby-7, no current lower limb injuries, and an age range of 18 to 35 years. A total of 24 athletes were recruited; however, due to unforeseen circumstances and player transfers, 16 participants completed this study.

The absence of a control group in this study was a deliberate methodological choice aligned with the research's pragmatic focus on real-world applicability. The intervention targeted a homogeneous cohort of elite female rugby players from a single professional club (Legia Warszawa), where logistical constraints (e.g., limited roster size, synchronized training schedules) made randomized group allocation unfeasible. By adopting a pre-post intervention design, this study prioritized assessing individual responsiveness to the training program within this specific athletic population, mirroring practical scenarios where entire teams adopt preventative protocols without parallel control groups. This approach is consistent with similar sports science studies evaluating training efficacy in elite cohorts.

The athletes underwent pre-tests, followed by an 8-week custom intervention based on the FIFA-11 and Activate protocols [31], and then post-tests. This study received approval from the local ethics committee in Poland (SKE 01-44/2022), and all participants provided written informed consent. The anthropometric characteristics of the athletes are presented in Table 1.

**Table 1.** Group anthropometric characteristics.

	<b>n</b>	<b>Age [Years]</b>	<b>Body Weight [kg]</b>	<b>Body Height [cm]</b>
players	16	23.0 ± 4.33	69.83 ± 11.84	168.0 ± 5.85

Both before the pre-tests and post-tests, a standardized, supervised warm-up was conducted. Next, bony landmarks were marked on the athletes' bodies using a black marker, specifically the tibial tuberosity on both lower limbs, which served as a reference point for measuring knee valgus during recordings.

The athletes then performed the drop jump (DJ), which involved stepping off a 40 cm high wooden platform onto the center of a force plate positioned 40 cm away, landing on both feet, and immediately executing a maximal vertical jump. A JBA Staniak force plate (80 × 80 cm JBA Staniak, Warsaw, Poland) with MVJ6v0 software (JBA Staniak, Warsaw, Poland) was used to measure lower limb power and calculate the RSI (the ratio of jump height to ground contact time). The RSI measurements were obtained using the DJ with both feet simultaneously on the platform mode.

Jump height was determined using ground reaction force data recorded by the force platform, allowing for objective measurement. The Reactive Strength Index (RSI) was then calculated using the formula shown below [32,33]:

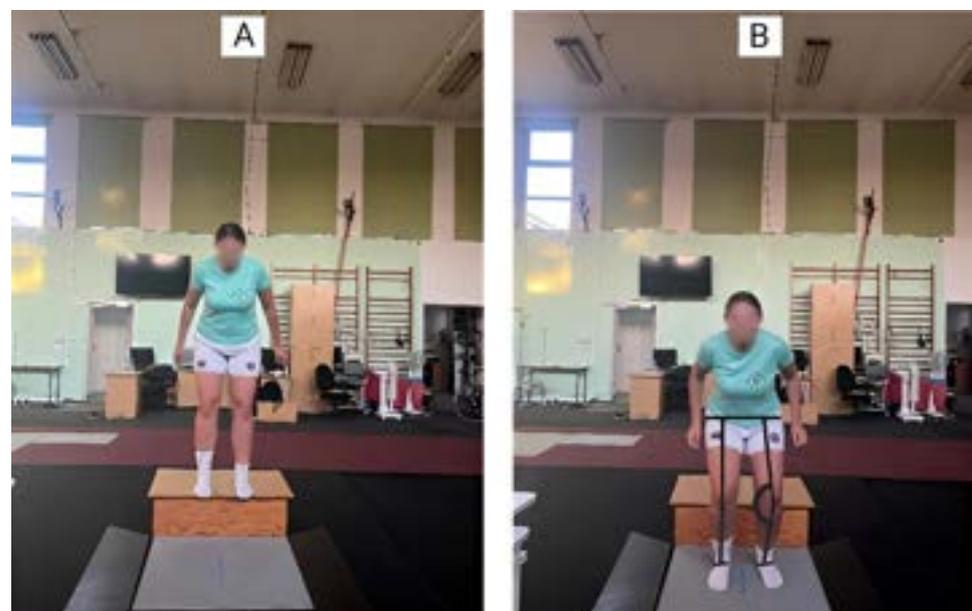
$$RSI = \frac{\text{jump height}}{\text{time of contact with the platform}}$$

To dynamically assess knee valgus, the jumps were recorded using a smartphone (Samsung Galaxy S20FE, Samsung Group, Suwon, South Korea) in super slow-motion mode, positioned 220 cm from the platform. The recordings were analyzed to measure the dynamic knee valgus angle with an accuracy of  $0.01^\circ$  using the Dartfish Live software within the Dartfish 2024 (Dartfish, Fribourg, Switzerland) application (with software 11.3.1115.0).

Each athlete performed three drop jump trials. The trial in which the athlete achieved the highest jump was selected for measurement, and the moment of maximum knee flexion during landing was used to assess the knee valgus angle. Maximum knee flexion was defined as the video frame immediately before the knee joint began extending for the take-off phase.

Regarding outlier management, the protocol emphasized maximizing data integrity rather than exclusion. Participants performed three trial repetitions of the drop jump test to account for intra-athlete variability and mitigate measurement errors inherent in dynamic tasks. The selection of the best-performing trial (highest jump height) ensured the analysis reflected each athlete's peak capacity, a common practice in performance testing to capture "game-ready" neuromuscular output. While explicit outlier criteria (e.g.,  $\pm 3$  SD) were not applied, the triplicate trial design inherently reduced the impact of anomalous single attempts without discarding participants—a critical consideration given the small sample size ( $n = 16$  post-attrition). This strategy balanced methodological rigor with the practical reality of limited athlete availability in elite sports.

To determine the dynamic knee valgus angle, a straight line was drawn bisecting the thigh, ending between the lateral and medial epicondyles, and another line was drawn separating the lower leg, ending between the lateral and medial malleolus [22]. Based on this method, DKV was calculated using the FPPA method for both the right and left limbs. The DJ test is illustrated in Figure 1.



**Figure 1.** Start (A) and end position (B) in DJ test.

### 2.1. Intervention

After the first testing session, an intervention was introduced in the form of a custom-designed training program aimed at improving knee joint stability, balance, and muscle strength. It was incorporated into regular training sessions before the main part of practice. The program was applied twice a week, with each session lasting 45 min, for a total duration of eight weeks. The exercises performed by the athletes are presented in Table 2.

**Table 2.** Exercises of the Knee Armor Training (KAT) protocol.

Exercise Name	Description	Time/Repetitions
Balance Pads and Ball Throwing	Athletes stand opposite each other on balance pads. Step onto the pad, catch the ball → throw it back → step down. Three athlete switches.	15 reps per set
Balance Pads–Lunges	Lunge onto the balance pad, push off with the front leg, and return.	Each leg ×45/alternating
One-Leg Clock	Standing on one leg, reach with the lifted leg as far as possible along the lines on the floor (coach signals the ‘hour’ direction).	1 min per leg ×3
One-Leg Pushing	Athletes stand on one leg and push against each other, trying to off-balance partner.	1 min per leg ×3
Box Jump Landing	Jump off a 30 cm box and land with a loud stomp, holding a half-squat.	15 reps
Lateral Step	Step laterally in the direction indicated by a partner or coach (3 steps in the signaled direction, then quick return).	1 min
Star Jumps	Jump with both feet in 8 directions as indicated by the partner or coach, returning to the start position between jumps.	30 s–1 min
Lateral Jumps with Weight	Wide lateral jumps (alternating L and R), landing on one leg while holding a heavy weight (10/15 kg) in front.	45 s
Skip A+	Skip A with a two-foot stomp on signal.	30 s
Crab Walk	Lateral step in a low squat position, resistance band below knees.	1 min per side
Side Plank	In a side plank, raise and lower the hip then switch sides.	45 s per side
Copenhagen plank	In a side plank, place the upper leg on an elevated surface (chair/bench). The lower leg is lifted towards the upper leg and lowered.	45 s per side
Hamstring Lean	In a kneeling position, lower the torso forward while keeping the calves stabilized (Nordic curl).	30 s
Single Leg RDL	Standing on one leg (slightly bent), hold a kettlebell in the opposite hand. Lean forward, touching the kettlebell outside the support leg, with the airborne leg parallel to the body.	45 s per side
Lower Limb Stabilization with Assistance	Partner exercise—one person in long sitting position, the assistant supports the heel 10 cm above the ground. The athlete presses the heel against the assistant’s hand (isometric) for 2–3 s in 8 different directions (down, side, up, up and inside, etc.).	2–3 min per limb, switching athletes

The KAT program was conducted by the team coach, who had been previously introduced it to and taught the program. The correctness and the fact of performing the

exercises were checked by unannounced and randomly occurring visits of researchers during training sessions.

## 2.2. Statistical Analysis

Statistical analysis was performed using the Statistica software (version 14, TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA, 2017). The normality of the variable distribution was assessed using the Shapiro–Wilk test. For all data, means, standard deviations, minimum, and maximum values were calculated. To compare data before and after the intervention, the Wilcoxon signed-rank test and the paired *t*-test were applied. A significance level of  $p < 0.05$  was used for all tests and Cohen's  $|d| = 0.2$  (small effect), 0.5 (moderate), and 0.8 (large) were used to interpret strength of the comparison.

To examine the relationship between RSI and knee valgus angle, Spearman's rank correlation analysis was conducted. The correlation strength was interpreted as follows: trivial ( $r = 0.0$ – $0.1$ ), small ( $r = 0.1$ – $0.3$ ), moderate ( $r = 0.3$ – $0.5$ ), strong ( $r = 0.5$ – $0.7$ ), very strong ( $r = 0.7$ – $0.9$ ), and nearly perfect ( $r = 0.9$ – $1$ ) [16].

## 3. Results

The results of RSI and knee valgus angles in the pre- and post-tests are presented in Table 3. Positive angle values indicate valgus, while negative values indicate varus.

**Table 3.** Descriptive statistics (mean, standard deviation, minimum, maximum) for RSI and knee valgus angles before and after the intervention.

Variable	Test	Median	SD	Minimum	Maximum
RSI [a.u.]	Pre-test	1.25	0.44	0.73	2.25
RSI [a.u.]	Post-test	1.40	0.35	0.87	1.97
FPPA R [°]	Pre-test	10	7.46	−10.38	15.4
FPPA R [°]	Post-test	6.52	3.13	2.20	12.48
FPPA L [°]	Pre-test	9.08	11.63	−14.42	21.53
FPPA L [°]	Post-test	0	7.42	−14.89	7.53

Legend: RSI—Reactive Strength Index; FPPA—frontal plane projection Angle; R—right lower limb; L—left lower limb. Positive angle values indicate valgus, while negative values indicate varus.

The statistical analysis revealed a statistically significant increase in RSI values in the post-tests compared to the pre-tests ( $p = 0.0496$ ). Detailed results of this analysis are presented in Figure 2.

For knee valgus angles, the left knee reduction ( $9.08^\circ$  to  $0.00^\circ$ ) demonstrated a large effect size ( $d = 0.92$ ), aligning with benchmarks for biomechanically relevant changes in ACL loading. However, the right knee's non-significant trend ( $p = 0.06$ ;  $d = 0.61$ ) underscores the importance of reporting CIs: the 95% CI [0.24, 6.72] indicates plausible meaningful improvements that this study may have been underpowered to detect conclusively. The results are presented in Figure 3.

Additionally, RSI values in the pre-tests showed a strong negative correlation with the valgus angle of the right lower limb ( $r_s = -0.69$ ;  $p < 0.01$ ), while no significant correlation was found with the angle of the left limb ( $r_s = -0.35$ ;  $p = 0.25$ ). RSI values in the post-tests did not show significant correlations with the valgus angle of either the right ( $r_s = -0.38$ ;  $p = 0.2$ ) or left lower limb ( $r_s = -0.2$ ;  $p = 0.51$ ).

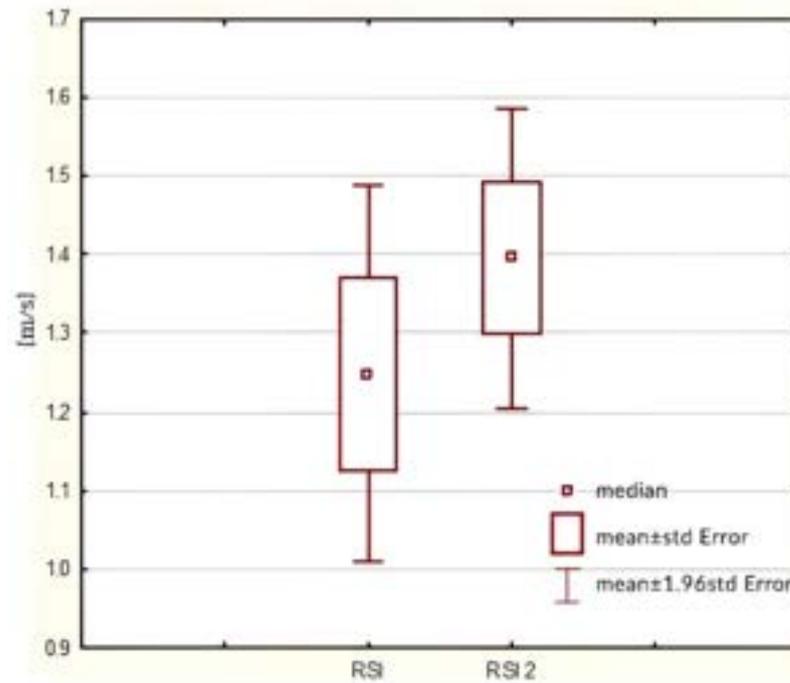


Figure 2. RSI values in pre- (RSI) and post-tests (RSI2) graph.

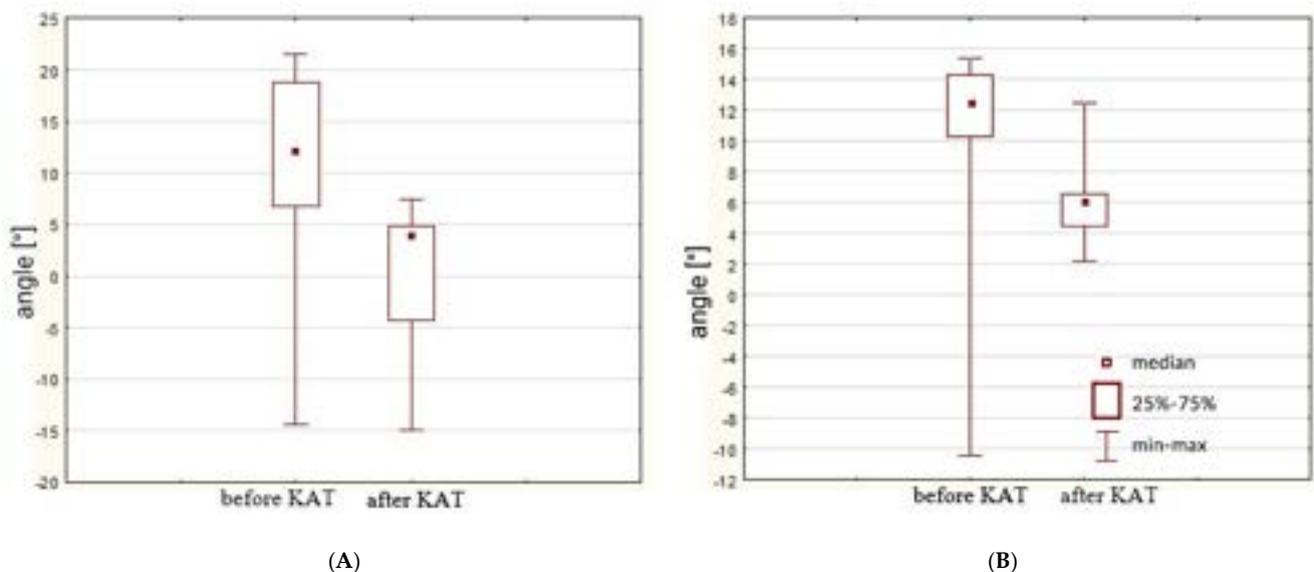


Figure 3. Changes in knee valgus angle values [°] for the left (A) and right (B) lower limbs after KAT training.

#### 4. Discussion

Given the high injury rate in this sport, there are significant considerations regarding the costs of surgical treatment and rehabilitation, the potential for missing entire seasons, and long-term consequences such as early degenerative changes in the knee joints or an increased risk of subsequent injuries [34,35].

The main observation from this study is the positive impact of the custom training program on dynamic parameters defining knee joint stability in professional female rugby players. This study is the first in female rugby players to examine the hypothesis that dynamic knee valgus (DKV), reactive strength index (RSI), and lower limb asymmetry—as recognized predictors of lower limb injury—can be ameliorated by a targeted intervention

combining biomechanical assessment and a KAT protocol. This program, developed by the authors, integrates neuromuscular control exercises and asymmetry correction strategies with the goal of establishing a new framework for injury prevention in this high-risk group.

The effectiveness of the FIFA 11+ program was demonstrated in a study conducted on young female soccer players in Norway, where it reduced the incidence of injuries by up to 50% [36]. An attempt to implement the FIFA 11+ program in basketball achieved partial success. While the overall incidence of lower limb injuries was significantly lower among young basketball players, no difference in knee injury frequency was observed between the control and experimental groups [37]. Surprisingly, in American football players, the FIFA 11+ program did not help reduce lower limb injuries, but those who did a regular warm-up had fewer injuries per 1000h of play [38]. It has been proven that after properly completing the FIFA 11+ program, the following aspects improve: neuromuscular control, static and dynamic balance, agility, lower limb muscle strength, muscle imbalance, and jump performance [39–41]. Additionally, exercises incorporating unstable surfaces, such as a sensorimotor cushion, have been proven to be effective and essential in designing injury prevention training programs [42,43]. Instability, detected by the muscle-tendon unit, triggers a response from the central nervous system to recognize and correct the movement to a proper pattern [43]. Additionally, when designing training programs, it is important to incorporate balance exercises that include elements relevant to in-game movements [44]. In rugby, players engage in short but highly intense anaerobic activities such as sprints and explosive force bursts to evade opponents [45]. Sudden changes in direction require players to generate maximum power in the shortest possible time. Various aspects of the game, such as tackling and scrum, demand significant muscle strength development [46]. As a result, players must develop motor skills such as aerobic and anaerobic endurance, speed, strength, jumping ability, and agility [47].

Since jump training has been shown to reduce dynamic knee valgus and lower the incidence of ACL injuries, elements of box jumps were incorporated into the program, with the primary focus on controlling movement patterns [48,49]. Understanding the injury mechanism, learning how to correct improper limb positioning, and reinforcing proper posture are key components of injury prevention programs [28].

The custom training program, inspired by the FIFA 11+ and Activate protocols, successfully increased the RSI in this study group. Improved post-test results indicate enhanced neuromuscular control among the athletes, which is crucial for the optimal distribution of forces on the muscle-tendon unit during rugby-specific movements such as sudden changes in direction or landing on one leg [50]. Sprints and jumps require the efficient functioning of the stretch-shortening cycle [15]. It is defined as the sequence of muscle activity in natural human movements, where the first phase is an eccentric contraction followed by a concentric contraction. Its purpose is to enhance force generation compared to a purely concentric contraction that does not involve prior muscle stretching. Additionally, this mechanism helps conserve energy by reducing the metabolic cost of movement [51]. In clinical and club settings, assessing RSI in rugby players is beneficial not only for evaluating plyometric performance or tracking training progress. This index also serves as a valuable tool for assessing the risk of ACL injuries [15]. It is recognized that the lower the RSI value, the weaker the function of the stretch-shortening cycle. This, in turn, affects movement efficiency and increases the risk of injury in athletes. It is also important to note that there are challenges in interpreting RSI values in rugby players. These challenges arise from the use of different tests to assess RSI, variations in calculation methods, and, most importantly, the diversity of sports disciplines. In his study, Flanagan (2016) established RSI threshold values for the drop jump test, using a calculation method that takes into account jump height and ground contact time [52]. However, the author emphasizes that the data used

for these benchmarks were derived from multiple sports disciplines, each with different demands for explosive force generation. When comparing the results of female rugby players, it appears that their average reactive strength index (RSI = 14) is surprisingly low, placing them in the weakest performance group (Figure 3). Interpreting these results suggests that the athletes are not adequately prepared even for moderate-intensity exercises. Their training should focus on the most basic plyometric drills and increasing lower limb muscle strength. The impact of another custom training program, “KneeRugbyWoman”, on RSI values was also studied in amateur rugby clubs in the Czech Republic [15]. The training program included strength, balance, and plyometric components. After 12 weeks, the athletes were re-evaluated, successfully achieving an increase in RSI values. However, comparing the values between Czech and Polish athletes is nearly impossible. A different test than the drop jump was used to determine the RSI, resulting in significantly lower average values for the Czech rugby players (RSI = 0.86). For this reason, Flanagan et al. (2016) suggested that sports clubs should independently create their own datasets for their athletes. This would allow RSI to serve as an individual performance indicator, reflecting progress, neuromuscular control, and fatigue. Additionally, it could be used as a recovery metric, indicating an athlete’s readiness to return to training after an injury [52,53].

Frontal plane projection angle (FPPA) is a technique used to determine the knee valgus angle in the frontal plane. The main challenge with this method appears to be the lack of a standardized approach for defining the lines that form this angle. It is determined by connecting two straight lines running through the thigh and lower leg; however, variations in research arise due to different starting and ending points for these segments.

In some studies, the first line extends from the anterior superior iliac spine to the center of the knee, which is described as the midpoint between the lateral and medial femoral condyles. The second line runs from this knee point to the center of the ankle, defined as the midpoint between the lateral and medial malleoli of the tibia [22,54–56].

The scientific literature also describes alternative methods for determining the angle between the thigh and lower leg. In these approaches, a straight line is drawn bisecting the thigh, ending at the intersection of the femoral epicondyles. From this point, another straight line is drawn, bisecting the lateral and medial malleoli of the tibia [23].

Unfortunately, no studies have yet been published comparing the accuracy or reliability of these different methods for measuring knee valgus angle. This may present a limitation when comparing publications that use different techniques. Nevertheless, FPPA allows for the objectification of functional test results, making it possible to compare a patient’s outcomes before and after a given therapy or intervention. Additionally, various studies describe different methodologies for the DJ test, with variations in drop height, landing distance, and specific execution instructions [57,58].

However, no studies have compared different drop heights and their impact on DKV. Due to the lack of existing publications measuring FPPA in female rugby players during the DJ test, it was not possible to reference a specific procedure. Therefore, a custom methodology was applied. Observing its impact on dynamic knee valgus, the training program was statistically successful. The mean valgus angles of both lower limbs decreased following the custom intervention. It is worth noting that a statistically significant difference between pre- and post-tests was observed in the left lower limb, which served as the supporting leg. In summary, the training proved to be an effective tool in reducing the average dynamic knee valgus angle, which in turn indicates a reduced risk of knee joint injuries [28].

In 2010, Herrington published reference values for dynamic knee valgus angles in physically active men and women, with the inclusion criterion being at least three hours of physical activity per week. Comparing these data shows that before the intervention,

female rugby players exhibited higher valgus angle values than the women in Herrington's study ( $L = 8.2^\circ$  vs.  $9.08^\circ$ ,  $p = 9.9^\circ$  vs.  $10.0^\circ$ ) [55]. Additionally, nearly half of the Polish athletes (7 out of 16) exceeded the reference values proposed by Herrington. In his study, he suggests that achieving more than  $7\text{--}13^\circ$  in the drop jump is significantly associated with an increased risk of ACL and patellofemoral joint injuries. Thanks to the applied intervention, every athlete remained within the proposed normative range ( $\text{max} = 12.5^\circ$ ), which can be considered a significant success demonstrating the effectiveness of the custom training program. Since RSI values and dynamic knee valgus angles are commonly used in research to assess injury risk and can be measured using the same test, it was decided to examine whether there is a correlation between them [59,60]. Due to the association of RSI with better neuromuscular control, strength, and movement efficiency, it was hypothesized that individuals with a higher RSI would exhibit a better movement pattern, meaning a smaller dynamic knee valgus angle [61]. Unfortunately, the results are inconclusive and insufficient to confirm this hypothesis. Only the pre-test data showed the expected outcome for the right lower limb, with a strong negative correlation ( $r_s = -0.69$ ;  $p < 0.05$ ). The current literature does not provide any studies examining the relationship between these two parameters, making this an important area for future research. Nevertheless, the KAT custom training program contributed to reducing modifiable risk factors for knee joint injuries.

#### 4.1. Limitations of the Study

The current research had some limitations. To confirm its effectiveness in lowering injury rates, long-term observation of athletes over multiple seasons would be necessary. Unfortunately, this extends beyond the scope and objectives of this study but leaves room for future research in this direction. This study has several limitations that should be acknowledged. The most significant is the small sample size, which may reduce the reliability of the findings and create challenges in interpreting the results. The small group of participants in this study is the result of the small overall population of professional female rugby players, whose number in Poland—despite the growing interest in this discipline—oscillates around 150–200 women (2–3% of all registered rugby players in Poland). It was therefore decided to maintain the homogeneity of the group (research conducted on one team) to exclude additional variables. However, this necessitates extending the research to other rugby teams or even other disciplines in order to be able to determine with greater certainty the effect of using KAT. Therefore, future researchers are encouraged to gather a larger study group to improve the reliability of the findings and assess the long-term effects of the custom training program.

There was no real possibility of blinding this study (participants, coaches or analyzers) in this particular research project. This is typical of many intervention studies in sports, where both participants and researchers are aware of the intervention and its purpose.

Another limitation is the focus solely on non-contact knee injuries. In rugby, a significant proportion of injuries also result from contact events, such as tackles [24]. Injuries in rugby affect not only the knees but also the shoulders and the head and facial area. Since this was one of the first studies on the implementation of a preventative training program for women in rugby, it is suggested that future research could modify the program by incorporating additional exercises or elements aimed at preventing these types of injuries.

#### 4.2. Practical Application

The findings of this study suggest that implementing a structured training program focused on neuromuscular control, proprioception, and explosive strength can enhance performance and reduce injury risks for female Rugby-7 players. The exercises targeting knee

stability, balance, and muscle strength were shown to positively influence movement patterns and injury prevention. Integrating this program into standard training routines may improve knee alignment, reactive strength, and overall biomechanics, which should lower the risk of ACL injuries and lower limb dysfunctions. Given the high injury rate in rugby, particularly non-contact knee injuries, incorporating these exercises into warm-up sessions could be a valuable strategy for long-term injury prevention and athletic development.

## 5. Conclusions

The assessment of dynamic knee valgus angle and RSI helps identify athletes at an increased risk of knee joint injuries. This study demonstrates how a simple diagnostic test can enable clinicians and coaches to evaluate both parameters effectively.

1. Professional female rugby players often display improper movement patterns, weak neuromuscular control, and insufficient explosive strength. These factors increase the risk of knee injuries, including ACL tears, highlighting the need for a targeted training program to address these weaknesses and reduce injury risk.
2. The custom training program KAT should be incorporated into regular rugby training, as it is safe to perform and has been shown to improve key dynamic stability measures of the knee joint when applied consistently.

**Author Contributions:** K.J. and P.B. made substantial contributions to the conception and design of the work; meanwhile, K.J., P.B., B.W., A.P. and M.S. contributed to data acquisition, analysis, and interpretation. Drafting and Critical Revision: the initial draft was prepared by K.J. and P.B., with critical revisions contributed by K.J., P.B., B.W. and M.S. to enhance the intellectual content. Final Approval: All authors (K.J., P.B., B.W., M.S. and A.P.) provided final approval for the version to be published. Accountability and Integrity: Each author agrees to be accountable for all aspects of the work, ensuring the accuracy and integrity of all parts are thoroughly investigated and resolved. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Institutional Review Board Statement:** The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board: Senacka Komisja Etyki Badań Naukowych Akademii Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego w Warszawie (Senate Committee on Ethics of Scientific Research at Józef Piłsudski's University of Physical Education in Warsaw) SKE01–44/2022. Institutional Review Board approval date is 22 December 2022.

**Informed Consent Statement:** Informed consent was obtained from all subjects involved in this study.

**Data Availability Statement:** The original contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries can be directed to the corresponding author(s).

**Acknowledgments:** The authors thank the participants for their participation in the training program. The authors gratefully thank their university colleagues for their cooperation and support during the writing process.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## References

1. World Rugby. Accelerating the Global Development of Women in Rugby 2021–2025. PDF Document. Available online: [https://resources.world.rugby/worldrugby/document/2021/11/27/207301cf-071e-42cd-9d9c-ab23ee02e337/2021-Womens\\_Plan-EN-3.pdf](https://resources.world.rugby/worldrugby/document/2021/11/27/207301cf-071e-42cd-9d9c-ab23ee02e337/2021-Womens_Plan-EN-3.pdf) (accessed on 16 February 2025).
2. Takahashi, I.; Umeda, T.; Mashiko, T.; Chinda, D.; Oyama, T.; Sugawara, K.; Nakaji, S. Effects of rugby sevens matches on human neutrophil-related non-specific immunity. *Br. J. Sports Med.* **2007**, *41*, 13–18. [CrossRef] [PubMed]

3. Fuller, C.; Taylor, A. Injury Surveillance Studies 2023/24 SVNS Men's and Women's Tournaments Final Report. 2024. Available online: [https://resources.worldrugby-rims.pulselive.com/worldrugby/document/2024/09/13/cd6b0568-0790-41d2-b368-4cee881ec802/SM7\\_2024\\_Sevens-Series.pdf](https://resources.worldrugby-rims.pulselive.com/worldrugby/document/2024/09/13/cd6b0568-0790-41d2-b368-4cee881ec802/SM7_2024_Sevens-Series.pdf) (accessed on 16 February 2025).
4. Klimowska, N.; Jaskulski, K.; Zdrodowska, A. The influence of percussion massage on knee's range of motion in two positions. *Biomed. Hum. Kinet.* **2023**, *15*, 181–184. [[CrossRef](#)]
5. Holden, S.; Boreham, C.; Delahunt, E. Sex Differences in Landing Biomechanics and Postural Stability During Adolescence: A Systematic Review with Meta-Analyses. *Sports Med.* **2016**, *46*, 241–253. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Hewett, T.E.; Myer, G.D.; Ford, K.R. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes: Part 1, mechanisms and risk factors. *Am. J. Sports Med.* **2006**, *34*, 299–311. [[CrossRef](#)]
7. Levy, B.J.; Cossell, C.; Grimm, N.L.; Jimenez, A.E.; Bisson, L.J. Chondromalacia patellae: Cartilaginous lesions of the patella in the setting of anterior knee pain. *J. Cartil. Jt. Preserv.* **2023**, *3*, 100096. [[CrossRef](#)]
8. Petersen, W.; Rembitzki, I.; Liebau, C. Patellofemoral pain in athletes. *Open Access J. Sports Med.* **2017**, *8*, 143–154. [[CrossRef](#)]
9. Bukry, S.A.; Justine, M.; Azidin, R.M.F.R.; Azhar, N.I.; Zolkafi, M.A.A.; Lo, C.N.; Manaf, H. Effects of the FIFA 11+ injury prevention programme on muscle strength and landing biomechanical markers of ACL injury during fatigue among youth soccer players. *Biomed. Hum. Kinet.* **2024**, *16*, 173–184. [[CrossRef](#)]
10. Fuller, C.; Taylor, A. World Rugby Surveillance Studies Rugby World Cup Sevens 2022 Report Men's and Women's Tournaments. 2022. Available online: <https://resources.world.rugby/worldrugby/document/2023/01/20/c881f9a0-148e-4054-896c-a299a84aae7b/7s-RWC-2022-Final-Report-22-December-2022-.pdf> (accessed on 7 February 2025).
11. Fuller, C.W.; Taylor, A. Ten-season epidemiological study of match injuries in men's international rugby sevens. *J. Sports Sci.* **2020**, *38*, 1595–1604. [[CrossRef](#)]
12. DiCesare, C.A.; Montalvo, A.; Barber Foss, K.D.; Thomas, S.M.; Ford, K.R.; Hewett, T.E.; Jayanthi, N.A.; Straccolini, A.; Bell, D.R.; Myer, G.D. Lower extremity biomechanics are altered across maturation in sport-specialized female adolescent athletes. *Front. Pediatr.* **2019**, *7*, 268. [[CrossRef](#)]
13. Bober, T.; Rutkowska-Kucharska, A.; Pietraszewski, B. Ćwiczeniapyometryczne—Charakterystykabiomechaniczna, wskaźniki, zastosowania. *Sport Wyczyn.* **2007**, 511–513. Available online: <http://polona.pl/item/16499049> (accessed on 20 December 2024).
14. Redler, L.H.; Watling, J.P.; Dennis, E.R.; Swart, E.; Ahmad, C.S. Reliability of a field-based drop vertical jump screening test for ACL injury risk assessment. *Physician Sportsmed.* **2016**, *44*, 46–52. [[CrossRef](#)]
15. Sikora, O.; Lehnert, M.; Hanzlíková, I.; Hughes, J. The Impact of a Novel Neuromuscular Training Program on Leg Stiffness, Reactive Strength, and Landing Biomechanics in Amateur Female Rugby Players. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 1979. [[CrossRef](#)]
16. Maestroni, L.; Turner, A.; Papadopoulos, K.; Pedley, J.; Sideris, V.; Read, P. Single leg drop jump is affected by physical capacities in male soccer players following ACL reconstruction. *Sci. Med. Footb.* **2024**, *8*, 201–211. [[CrossRef](#)]
17. McMahon, J.J.; Suchomel, T.J.; Lake, J.P.; Comfort, P. Relationship between reactive strength index variants in rugby league players. *J. Strength Cond. Res.* **2021**, *35*, 280–285. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. Walker, J.; Clarke, S.B.; Waller, E.; Robey-Broome, A.; Jensen, R.L. Reactive strength index-modified in different plyometric tasks. In Proceedings of the 34th International Conference on Biomechanics in Sports, Tsukuba, Japan, 18–22 July 2016; International Society of Biomechanics in Sports. pp. 964–967.
19. Cuesta-Vargas, A.I.; Galán-Mercant, A.; Williams, J.M. The use of inertial sensors system for human motion analysis. *Phys. Ther. Rev.* **2010**, *15*, 462–473. [[CrossRef](#)]
20. Pang, J.C.Y.; Tsang, R.S.W. Reliability of three-dimensional motion analysis during single-leg side drop landing test after anterior cruciate ligament reconstruction: An in vivo motion analysis study. *Hong Kong Physiother. J.* **2022**, *42*, 65–73. [[CrossRef](#)]
21. Ruiz-Pérez, I.; Elvira, J.L.; Myer, G.D.; Croix, M.D.S.; Ayala, F. Validez relacionada con el criterio de las medidas bidimensionales de la cinemática de la cadera, la rodilla y el tobillo durante los aterrizajes bilaterales con salto y caída. *Eur. J. Hum. Mov.* **2021**, *47*, 100–120. [[CrossRef](#)]
22. Ortiz, A.; Rosario-Canales, M.; Rodríguez, A.; Seda, A.; Figueroa, C.; Venegas-Ríos, H. Reliability and concurrent validity between two-dimensional and three-dimensional evaluations of knee valgus during drop jumps. *Open Access J. Sports Med.* **2016**, *7*, 65–73. [[CrossRef](#)]
23. Mizner, R.L.; Chmielewski, T.L.; Toepke, J.J.; Tofte, K.B. Comparison of 2-Dimensional Measurement Techniques for Predicting Knee Angle and Moment During a Drop Vertical Jump. *Clin. J. Sport Med. Off. J. Can. Acad. Sport Med.* **2012**, *22*, 221–227. Available online: <http://rsb.info.nih.gov/ij/> (accessed on 20 December 2024). [[CrossRef](#)]
24. Starling, L.T.; Gabb, N.; Williams, S.; Kemp, S.; Stokes, K.A. Longitudinal study of six seasons of match injuries in elite female rugby union. *Br. J. Sports Med.* **2023**, *57*, 212–217. [[CrossRef](#)]
25. Zelisko, J.A.; Noble, H.B.; Porter, M. A comparison of men's and women's professional basketball injuries. *Am. J. Sports Med.* **1982**, *10*, 297–299. [[CrossRef](#)]
26. Raya-González, J.; Clemente, F.M.; Beato, M.; Castillo, D. Injury profile of male and female senior and youth handball players: A systematic review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 3925. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

27. Związek Piłki Nożnej, P.; Barlewicz, K.; Dawidziuk, A.; Gąsior, B.; Kasprowicz, M.; Kawalec, P.; Matuszczak, A.; Paszkowski, M.; Patalon, N.; Stępiński, M.; et al. Piłka Nożna Kobiet Narodowy Model Gry PZPN. Available online: [www.pzpn.pl](http://www.pzpn.pl) (accessed on 20 December 2024).
28. Rostami, M.; Sedaghati, P.; Daneshmandi, H. The effectiveness of the STOP-X training program on the knee valgus angle and balance in female basketball players with dynamic knee valgus: A randomized controlled trial. *BMC Sports Sci. Med. Rehabil.* **2024**, *16*, 52. [[CrossRef](#)]
29. Barden, C.; Hancock, M.V.; Stokes, K.A.; Roberts, S.P.; McKay, C.D. Effectiveness of the Activate injury prevention exercise programme to prevent injury in schoolboy rugby union. *Br. J. Sports Med.* **2022**, *56*, 812–817. [[CrossRef](#)]
30. Daneshjoo, A.; Mokhtar, A.H.; Rahnema, N.; Yusof, A. The Effects of Injury Preventive Warm-Up Programs on Knee Strength Ratio in Young Male Professional Soccer Players. *PLoS ONE* **2012**, *7*, e50979. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. Bizzini, M.; Junge, A.; Dvorak, J. The “11+” A Complete Warm-Up Programme to Prevent Injuries Manual. 2022. Available online: [https://poweruptoplay.org/wp-content/uploads/2022/12/11plus\\_workbook\\_e-1.pdf#page=8](https://poweruptoplay.org/wp-content/uploads/2022/12/11plus_workbook_e-1.pdf#page=8) (accessed on 6 February 2025).
32. Jaskulski, K.; Bobowik, P.; Wysoczański, B.; Starczewski, M. 8-week additional sensomotoric warm-up drills improves motor performance and postural stability in high-performance female Rugby-7 players. *Acta Kinesiol.* **2024**, *18*, 72–78. [[CrossRef](#)]
33. Barker, L.A.; Harry, J.R.; Mercer, J.A. Relationships Between Countermovement Jump Ground Reaction Forces and Jump Height, Reactive Strength Index, and Jump Time. *J. Strength Cond. Res.* **2018**, *32*, 248–254. Available online: [https://journals.lww.com/nsca-jscr/fulltext/2018/01000/relationships\\_between\\_countermovement\\_jump\\_ground.32.aspx](https://journals.lww.com/nsca-jscr/fulltext/2018/01000/relationships_between_countermovement_jump_ground.32.aspx) (accessed on 20 December 2024). [[CrossRef](#)]
34. Hewett, T.E.; Myer, G.D.; Ford, K.R.; Heidt, R.S., Jr.; Colosimo, A.J.; McLean, S.G.; Van Den Bogert, A.J.; Paterno, M.V.; Succop, P. BiomBiomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: A prospective study. *Am. J. Sports Med.* **2005**, *33*, 492–501. [[CrossRef](#)]
35. Cesar, G.M.; Tomasevich, C.L.; Burnfield, J.M. Frontal plane comparison between drop jump and vertical jump: Implications for the assessment of ACL risk of injury. *Sports Biomech.* **2016**, *15*, 440–449. [[CrossRef](#)]
36. Soligard, T.; Myklebust, G.; Steffen, K.; Holme, I.; Silvers, H.; Bizzini, M.; Junge, A.; Dvorak, J.; Bahr, R.; Andersen, T.E. Comprehensive warm-up programme to prevent injuries in young female footballers: Cluster randomised controlled trial. *BMJ* **2009**, *337*, a2469. [[CrossRef](#)]
37. Longo, U.G.; Loppini, M.; Berton, A.; Marinozzi, A.; Maffulli, N.; Denaro, V. The FIFA 11+ program is effective in preventing injuries in elite male basketball players: A cluster randomized controlled trial. *Am. J. Sports Med.* **2012**, *40*, 996–1005. [[CrossRef](#)]
38. Slauterbeck, J.R.; Choquette, R.; Tourville, T.W.; Krug, M.; Mandelbaum, B.R.; Vacek, P.; Beynnon, B.D. Implementation of the FIFA 11+ Injury Prevention Program by High School Athletic Teams Did Not Reduce Lower Extremity Injuries: A Cluster Randomized Controlled Trial. *Am. J. Sports Med.* **2019**, *47*, 2844–2852. [[CrossRef](#)]
39. Brito, J.; Figueiredo, P.; Fernandes, L.; Seabra, A.; Soares, J.M.; Krustup, P.; Rebelo, A. Isokinetic strength effects of FIFA’s “The 11+” injury prevention training programme. *Isokinet. Exerc. Sci.* **2010**, *18*, 211–215. [[CrossRef](#)]
40. Reis, I.; Rebelo, A.; Krustup, P.; Brito, J. Performance Enhancement Effects of Fédération Internationale de Football Association’s “The 11+” Injury Prevention Training Program in Youth Futsal Players. 2013. Available online: [www.cjsportmed.com](http://www.cjsportmed.com) (accessed on 20 December 2024).
41. Steffen, K.; Emery, C.A.; Romiti, M.; Kang, J.; Bizzini, M.; Dvorak, J.; Finch, C.F.; Meeuwisse, W.H. High adherence to a neuromuscular injury prevention programme (FIFA 11+) improves functional balance and reduces injury risk in Canadian youth female football players: A cluster randomised trial. *Br. J. Sports Med.* **2013**, *47*, 794–802. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
42. Griffin, L.Y.E. Neuromuscular Training and Injury Prevention in Sports. *Clin. Orthop. Relat. Res.* **2003**, *409*, 53–60. [[CrossRef](#)]
43. Hilberg, T.; Herbsleb, M.; Puta, C.; Gabriel, H.H.W.; Schramm, W. Physical training increases isometric muscular strength and proprioceptive performance in haemophilic subjects. *Haemophilia* **2003**, *9*, 86–93. [[CrossRef](#)]
44. Mehl, J.; Diermeier, T.; Herbst, E.; Imhoff, A.B.; Stoffels, T.; Zantop, T.; Petersen, W.; Achten, A. Evidence-based concepts for prevention of knee and ACL injuries. 2017 guidelines of the ligament committee of the German Knee Society (DKG). *Arch. Orthop. Trauma Surg.* **2018**, *138*, 51–61. [[CrossRef](#)]
45. Gasik, T.; Stupnicki, R. Assessment of the anaerobic endurance of rugby players. *Zesz. Nauk. WSKFiT* **2013**, *8*, 27–32.
46. Duthie, G.; Pyne, D.; Hooper, S. Applied Physiology and Game Analysis of Rugby Union. *Sports Med.* **2003**, *33*, 973–991. [[CrossRef](#)]
47. Elloumi, M.; Makni, E.; Moalla, W.; Bouaziz, T.; Tabka, Z.; Lac, G.; Chamari, K. Monitoring Training Load and Fatigue in Rugby Sevens Players. *Asian J. Sports Med.* **2012**, *3*, 175–184. [[CrossRef](#)]
48. Mandelbaum, B.R.; Silvers, H.J.; Watanabe, D.S.; Knarr, J.F.; Thomas, S.D.; Griffin, L.Y.; Kirkendall, D.T.; Garrett, W. Effectiveness of a neuromuscular and proprioceptive training program in preventing anterior cruciate ligament injuries in female athletes: 2-Year follow-up. *Am. J. Sports Med.* **2005**, *33*, 1003–1010. [[CrossRef](#)]
49. Colclough, A.; Munro, A.; Herrington, L.; McMahon, J.; Comfort, P. The effects of a four week jump-training program on frontal plane projection angle in female gymnasts. *Phys. Ther. Sport* **2018**, *30*, 29–33. [[CrossRef](#)]

50. Faude, O.; Rössler, R.; Petushek, E.J.; Roth, R.; Zahner, L.; Donath, L. Neuromuscular adaptations to multimodal injury prevention programs in youth sports: A systematic review with meta-analysis of randomized controlled trials. *Front. Physiol.* **2017**, *8*, 791. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
51. Turner, A.N.; Jeffreys, I. The Stretch-Shortening Cycle: Proposed Mechanisms and Methods for Enhancement. *Strength Cond. J.* **2010**, *32*, 87–99. [[CrossRef](#)]
52. Flanagan, E. The Reactive Strength Index Revisited Part 2. Available online: <http://www.fitstoronto.com/wp-content/uploads/2017/12/The-Reactive-Strength-Revisited-Part-2.pdf> (accessed on 7 February 2025).
53. Flanagan, E.P.; Comyns, T.M. The Use of Contact Time and the Reactive Strength Index to Optimize Fast Stretch-Shortening Cycle Training. *Strength Cond. J.* **2008**, *30*, 32–38. [[CrossRef](#)]
54. Willson, J.D.; Davis, I.S. Utility of the Frontal Plane Projection Angle in Females with Patellofemoral Pain. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* **2008**, *38*, 606–615. [[CrossRef](#)]
55. Herrington, L.; Munro, A. Drop jump landing knee valgus angle; normative data in a physically active population. *Phys. Ther. Sport* **2010**, *11*, 56–59. [[CrossRef](#)]
56. Munro, A.; Herrington, L.; Comfort, P. Comparison of landing knee valgus angle between female basketball and football athletes: Possible implications for anterior cruciate ligament and patellofemoral joint injury rates. *Phys. Ther. Sport* **2012**, *13*, 259–264. [[CrossRef](#)]
57. Prieske, O.; Chaabene, H.; Puta, C.; Behm, D.G.; Büsch, D.; Granacher, U. Effects of drop height on jump performance in Male and female elite adolescent handball players. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2019**, *14*, 674–680. [[CrossRef](#)]
58. Baena-Raya, A.; Sánchez-López, S.; Rodríguez-Pérez, M.A.; García-Ramos, A.; Jiménez-Reyes, P. Effects of two drop-jump protocols with different volumes on vertical jump performance and its association with the force–velocity profile. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2020**, *120*, 317–324. [[CrossRef](#)]
59. Ford, K.R.; Myer, G.D.; Toms, H.E.; Hewett, T.E. Gender differences in the kinematics of unanticipated cutting in young athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2005**, *37*, 124–129. [[CrossRef](#)]
60. Guy-Cherry, D.; Alanazi, A.; Miller, L.; Staloch, D.; Ortiz-Rodriguez, A. Landing Styles Influences Reactive Strength Index without Increasing Risk for Injury. *Sports Med. Int. Open* **2018**, *02*, E35–E40. [[CrossRef](#)]
61. Jarvis, P.; Turner, A.; Read, P.; Bishop, C. Reactive Strength Index and its Associations with Measures of Physical and Sports Performance: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Med.* **2022**, *52*, 301–330. [[CrossRef](#)]

**Disclaimer/Publisher’s Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

## Wykaz innych osiągnięć naukowych doktoranta

### Publikacje naukowe:

1. **Jaskulski K.**, Wysoczański B., Urbański J., Klimowicz P. (2025). *Incidence of injuries in judo and the potential preventive interventions: a systematic review*. Acta Kinesiologica 19(1), 10–20, DOI: 10.51371/issn.1840-2976.2025.19.1.2, (IF = 1.600, MNiSW/MEiN = 140).
2. Kaczmarczyk K., Płoszczyca K., **Jaskulski K.**, Czuba M. (2025). *Eight weeks of resistance training is not a sufficient stimulus to improve body composition in post-COVID-19 elderly adults*. Journal of Clinical Medicine 14(1), art. 174, DOI: 10.3390/jcm14010174, (IF = 2.900, MNiSW/MEiN = 140).
3. **Jaskulski K.**, Bobowik P. (2024). Rola i znaczenie fizjoterapii w e-sporcie. *W: E-sport: problemy badawcze i perspektywy rozwoju* (Studia i Monografie, 181), s. 178–199, (MNiSW/MEiN = 20).
4. Klimowska N., **Jaskulski K.**, Zdrodowska A. (2023). *The influence of percussion massage on knees range of motion in two positions*. Biomedical Human Kinetics 15(1), 181–184, DOI: 10.2478/bhk-2023-0021, (IF = 0.800, MNiSW/MEiN = 140).
5. Bobowik P., Świerczek J., **Jaskulski K.**, Wiszomirska I., Gajewski J. (2023). *Evaluation of balance and muscle strength of upper and lower limbs in rock climbers*. Polish Journal of Sport and Tourism 30(4), 19–25, DOI: 10.2478/pjst-2023-0021, (MNiSW/MEiN = 140).
6. Bobowik P. Ż., Mańka J., **Jaskulski K.**, Kaczmarczyk K. (2022). *Hip joint mobility in relation to measurement position, gender, and limb dominance*. Acta of Bioengineering and Biomechanics 24(2), 65–73, DOI: 10.37190/ABB-02044-2022-01, (IF = 1.000, MNiSW/MEiN = 100).

7. Mańka J., Bobowik P., **Jaskulski K.**, Wiszomirska I., Kaczmarczyk K. (2022). *The influence of three different test positions and thigh asymmetry on measurements of isometric hip flexion strength in men and women*. Acta of Bioengineering and Biomechanics 24(4), 1–14, DOI: 10.37190/ABB-02160-2022-01, (IF = 1.000, MNiSW/MEiN = 100).

**Bibliometryczne podsumowanie całości dorobku naukowego – jedenastu prac naukowych:**

**IF = 19.300, MNiSW/MEiN = 1220**

## **Wystąpienia czynne na konferencjach naukowych**

1. **Jaskulski K.**, Bobowik P., Mańka J., Kaczmarczyk K. „Różnice w zakresie ruchomości stawów biodrowych w zależności od pozycji badanego, płci i dominacji kończyny”. XVII Sympozjum „Analiza ruchu – teoria i praktyka w zastosowaniach klinicznych”, Instytut „Pomnik – Centrum Zdrowia Dziecka”. Warszawa, 04/03/2022.
2. Nowaczewski K., **Jaskulski K.**, Wysoczański B., Starczewski M., Bobowik P. „Wpływ autorskiego programu na poprawę siły mięśniowej kończyn dolnych i stabilności posturalnej u profesjonalnych zawodniczek rugby 7”. XIX Sympozjum Analiza ruchu teoria i praktyka w zastosowaniach klinicznych, Centrum Zdrowia Dziecka (pod patronatem Polskiego Towarzystwa Biomechaniki). Warszawa, 08/03/2024.
3. Kędziorek J., Borkowski R., **Jaskulski K.**, Błażkiewicz-Janeczko M. „Analiza stabilności posturalnej podczas wykonywania zadań dual task”. XX Sympozjum Analiza ruchu teoria i praktyka w zastosowaniach klinicznych, Centrum Zdrowia Dziecka (pod patronatem Polskiego Towarzystwa Biomechaniki). Warszawa (online), 07/03/2025.
4. Kaczorowski M., **Jaskulski K.**, Wiszomirska I. „Minimalna efektywna dawka rozciągania statycznego wśród osób trenujących rekreacyjnie”. XX Sympozjum Analiza ruchu teoria i praktyka w zastosowaniach klinicznych, Centrum Zdrowia

Dziecka (pod patronatem Polskiego Towarzystwa Biomechaniki). Warszawa (online), 07/03/2025.

5. Urbański J., **Jaskulski K.**, Wysoczański B. H. „Częstotliwość występowania urazów w judo na podstawie najnowszej literatury”. XX Sympozjum Analiza ruchu teoria i praktyka w zastosowaniach klinicznych, Centrum Zdrowia Dziecka (pod patronatem Polskiego Towarzystwa Biomechaniki). Warszawa (online), 07/03/2025.
6. **Jaskulski K.**, Wysoczański B., Bobowik P., Wiszomirska I., Starczewski M. „Wpływ autorskiego programu na poprawę Dynamicznej koślowości kolan i Reactive Strength Index u profesjonalnych zawodniczek rugby 7”. XX Sympozjum Analiza ruchu teoria i praktyka w zastosowaniach klinicznych, Centrum Zdrowia Dziecka (pod patronatem Polskiego Towarzystwa Biomechaniki). Warszawa (online), 07/03/2025.

## Zgoda na badania Komisji Etycznej

Senacka Komisja ds. Etyki Badań Naukowych  
Akademia Wychowania Fizycznego  
JÓZEFA PIŁSUDSKIEGO w Warszawie  
00-968 Warszawa 45, skr. poczt. 55  
ul. Marymoncka 34, tel./fax 022 834-35-14

SENACKA KOMISJA ETYKI BADAŃ NAUKOWYCH  
AKADEMIA WYCHOWANIA FIZYCZNEGO  
JÓZEFA PIŁSUDSKIEGO  
Warszawa, ul. Marymoncka 34

### OPINIA O ZGODNOŚCI PROJEKTU BADANIA NAUKOWEGO Z ZASADAMI ETYCZNYMI

**Tytuł badania** (pełny i skrócony, jeśli dotyczy)

Ocena skuteczności autorskiego treningu siłowo-proprioceptywnego na poprawę stabilizacji stawu kolanowego u kobiet trenujących rugby.

**Kierownik badania**

Imię i nazwisko: Karol Jaskulski  
Stopień/tytuł naukowy: mgr  
Stanowisko: asystent  
Kierunek/stopień/rok studiów (dot. studenta/doktoranta):  
Uczelnia/Wydział/Katedra/Zakład: AWF/WR/Katedra Podstaw Fizjoterapii

Po uważnym zapoznaniu się z przedłożoną dokumentacją projektu w/w badania naukowego, Komisja Etyki Badań Naukowych wydała:

- POZYTYWNA OPINIE** o zgodności tego projektu badania naukowego z zasadami etycznymi. Komisja stwierdziła, że projekt jest zgodny ze standardami etyki badań naukowych i może być realizowany.
- WARUNKOWO POZYTYWNA OPINIE** o zgodności tego projektu badania naukowego z zasadami etycznymi. Komisja stwierdziła, że projekt może być realizowany pod warunkiem, że we wskazanym niżej terminie Wnioskodawca wprowadzi do niego wskazane zmiany i przedłoży poprawiony projekt Komisji do ponownego zaopiniowania w trybie § 10 Regulaminu Komisji.
- NEGATYWNA OPINIE** o zgodności tego projektu badania naukowego z zasadami etycznymi. Komisja stwierdziła, że projekt nie spełnia podstawowych standardów etyki badań naukowych i nie może być realizowany.

Uzasadnienie opinii/Określenie warunków dla opinii warunkowo pozytywnej

Projekt zgodny z zasadami etyki badań naukowych.

Warszawa, 22.12.2022 r.  
SKE 01- 44/2022

Podpis przewodniczącego Senackiej Komisji  
Etyki Badań Naukowych

PRZEWODNICZĄCA  
Senackiej Komisji  
Etyki Badań Naukowych  
Prof. dr hab. Alicja Prochowska-Fiszler