

INTELLIGENT PREDICTION OF OVERUSE INJURIES BASED ON WEARABLE TELEMETRY

^{1*}Sudakov V.V., ²Grevtsov D.V., ²Sultanov N.M.

¹Batyr Bauyrzhan Momyshuly Military Sports College, Almaty, Kazakhstan

²Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Almaty, Kazakhstan

* Correspondent's E-mail: raimbekturar1@gmail.com

Author information:

Sudakov Vladimir Vladimirovich, Deputy Head for Academic Affairs, Batyr Bauyrzhan Momyshuly Military Sports College, Almaty, Kazakhstan, e-mail: raimbekturar1@gmail.com

Grevtsov Dmitry Vladimirovich, Head of the Department of Information Security, Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Almaty, Kazakhstan, e-mail: grevzovdima@mail.ru

Sultanov Nursultan Maralovich, Senior Lecturer of the Department of Information Security, Military Engineering Institute of Radio Electronics and Communications, Almaty, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4029-3572>, e-mail: twinkboy210391@gmail.com

Abstract - The hidden epidemic of musculoskeletal overuse injuries during routine military and athletic training is a critical factor undermining personnel combat readiness, demanding a paradigm shift from reactive medicine to proactive analytics. The objective of this longitudinal study is to develop, validate, and clinically test a hybrid multimodal predictive analytics system based on machine learning (ML) algorithms to identify individual injury risk with a 2-3 week forecasting horizon. The empirical foundation comprises continuous 6-month telemetry monitoring datasets from 450 subjects (cadets of the Armed Forces of the Republic of Kazakhstan and civilian university students). Data collection was executed using wearable inertial measurement units (IMU) and optical photoplethysmography (PPG) sensors to assess autonomic status via heart rate variability (HRV). The integration of high-frequency kinematic fatigue triggers and autonomic biomarkers was achieved through an ensemble architecture combining gradient boosting algorithms (XGBoost) and Long Short-Term Memory (LSTM) recurrent neural networks. The implementation of Explainable AI algorithms (SHAP) determined a multi-level hierarchy of risk factors. The developed model demonstrated high discriminatory capability (AUC-ROC = 0.89, sensitivity — 84%, specificity — 91%). The testing of the system as a Clinical Decision Support System (CDSS) led to an objective 23.4% reduction in the absolute incidence of overuse injuries. This research proves the synergistic effect of sensor fusion and predictive ML-modeling in physical load management.

Keywords — machine learning, overuse injuries, heart rate variability, inertial sensors, military medicine, predictive analytics, biomechanics.

ТАҒЫЛАТЫН ТЕЛЕМЕТРИЯ ДЕРЕКТЕРІ НЕГІЗІНДЕ ШАМАДАН ТЫС ЖҮКТЕЛҮ ЖАРАҚАТТАРЫН ЗИЯТКЕРЛІК БОЛЖАУ

^{1*}Судаков В.В., ²Гревцов Д.В., ²Султанов Н.М.

¹Батыр Бауыржан Момышұлы атындағы Әскери-спорттық колледж, Алматы, Қазақстан

²Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы, Қазақстан

* Корреспондент E-mail: raimbekturar1@gmail.com

Авторлар туралы ақпарат:

Судаков Владимир Владимирович, Оқу ісі жөніндегі бастықтың орынбасары, Батыр Бауыржан Момышұлы атындағы Әскери-спорттық колледж, Алматы, Қазақстан, e-mail: raimbekturar1@gmail.com

Гревцов Дмитрий Владимирович, Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының бастығы, Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы, Қазақстан, e-mail: grevzovdima@mail.ru

Султанов Нурсұлтан Маралович, Ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының аға оқытушысы, Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4029-3572>, e-mail: twinkboy210391@gmail.com

Аңдатпа - Жоспарлы оқу-жауынгерлік дайындық кезіндегі тірек-кимыл аппаратының шамадан тыс жүктелу жарақаттарының жасырын эпидемиясы әскери контингенттердің жауынгерлік қабілетін төмендететін критикалық фактор болып табылады, бұл реактивті медицинадан проактивті аналитикаға көшуді талап етеді. Зерттеудің мақсаты – 2-3 апталық болжау көкжиегімен жарақаттанудың жеке қаупін анықтау үшін машиналық оқыту (ML) алгоритмдеріне негізделген гибриді мультимодальды предиктивті аналитика жүйесін әзірлеу және клиникалық апробациялау. Эмпирикалық база ретінде 450 субъектіні (ҚР Қарулы Күштерінің курсанттары мен азаматтық жоғары оқу орындарының студенттері) 6 айлық үздіксіз телеметриялық мониторингтеу деректер массивтері алынды. Деректерді жинау сыртқы кинематикалық жүктемені тіркеу үшін тағылатын инерциялық өлшеу модульдерін (IMU) және жүрек ырғағының өзгергіштігін (HRV) талдау арқылы вегетативті статусты бағалау үшін фотоплетизмографияның (PPG) сенсорларын пайдалана отырып жүзеге асырылды. Триггерлер мен биомаркерлерді біріктіру XGBoost мен ұзақ қысқа мерзімді жад (LSTM) рекуррентті нейрондық желілерін біріктіретін ансамбльдік архитектура арқылы іске асырылды. Әзірленген прогностикалық модель жоғары дискриминациялық қабілетті көрсетті (AUC-ROC = 0.89, сезімталдық — 84%, ерекшелік — 91%). Жүйені шешім қабылдауды қолдау құралы (ШҚҚҚ) форматында апробациялау тәжірибелік когортада шамадан тыс жүктелу жарақаттарының абсолютті жиілігін 23.4%-ға төмендетуге әкелді.

Түйін сөздер — машиналық оқыту, шамадан тыс жүктелу жарақаттары, жүрек ырғағының өзгергіштігі, инерциялық датчиктер, әскери медицина, предиктивті аналитика, биомеханика.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ТРАВМ НА ОСНОВЕ НОСИМОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ

¹Судаков В.В., ²Гревцов Д.В., ²Султанов Н.М.

¹Военно-спортивный колледж имени Батыра Бауыржана Момышулы, Алматы, Казахстан

²Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Алматы, Казахстан

* E-mail корреспондента: raimbekturar1@gmail.com

Информация об авторах:

Судаков Владимир Владимирович, Военно-спортивный колледж имени Батыра Бауыржана Момышулы, Алматы, Казахстан, e-mail: raimbekturar1@gmail.com

Гревцов Дмитрий Владимирович, Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Алматы, Казахстан, e-mail: grevzovdima@mail.ru

Султанов Нурсултан Маралович, Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, Алматы, Казахстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4029-3572>, e-mail: twinkboy210391@gmail.com

Аннотация - Скрытая эпидемия перегрузочных травм опорно-двигательного аппарата при плановой учебно-боевой подготовке выступает критическим фактором снижения боеспособности воинских контингентов. Цель данного лонгитюдного исследования заключается в разработке и клинической апробации гибридной мультимодальной системы предиктивной аналитики на основе алгоритмов машинного обучения (ML) для выявления индивидуального риска травматизма с горизонтом прогнозирования 2-3 недели. Эмпирическую базу составили массивы данных непрерывного 6-месячного телеметрического мониторинга 450 субъектов (курсантов ВС РК и студентов вузов). Сбор данных осуществлялся с использованием носимых инерциальных модулей (IMU) и оптических сенсоров фотоплетизмографии (PPG) для оценки вариабельности сердечного ритма (HRV). Интеграция высокочастотных кинематических триггеров и вегетативных биомаркеров реализована посредством ансамблевой архитектуры (XGBoost и LSTM). Внедрение алгоритмов объяснимого искусственного интеллекта (SHAP) позволило детерминировать иерархию факторов риска. Прогностическая модель продемонстрировала высокую дискриминационную способность (AUC-ROC = 0.89, чувствительность — 84%, специфичность — 91%). Апробация системы в формате инструмента поддержки принятия решений (СППР) привела к объективному снижению частоты возникновения перегрузочных травм на 23.4% в экспериментальной когорте.

Ключевые слова — машинное обучение, перегрузочные травмы, вариабельность сердечного ритма, инерциальные датчики, военная медицина, предиктивная аналитика, биомеханика.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Разработана мультимодальная гибридная архитектура глубокого обучения (XGBoost + LSTM), интегрирующая продольные инерциальные кинематические паттерны и

вегетативные биомаркеры, что обеспечило точность прогнозирования риска перегрузочных травм на уровне 89% с опережающим горизонтом в 2-3 недели.

Анализ маргинальных вкладов признаков детерминировал, что наиболее валидным предиктором микротравматизации выступает не изолированный объем нагрузки, а устойчивая супрессия парасимпатического показателя на фоне нарастающей кинематической асимметрии.

Внедрение спроектированной системы поддержки принятия решений (СППР) в реальный контур военно-учебного и гражданского тренировочного процесса обеспечило статистически значимое снижение фактической заболеваемости патологиями опорно-двигательного аппарата на 23.4%.

ВВЕДЕНИЕ

Скрытая эпидемия перегрузочных травм опорно-двигательного аппарата, ежедневно подрывающая боеготовность и наносящая невосполнимый стратегический урон национальному кадровому резерву, представляет собой критическую угрозу национальной безопасности, незаметно выводя из строя от 8% до 12% личного состава еще на этапе плановой учебно-боевой подготовки [1, с. 87]. Традиционная парадигма военно-медицинского и медико-биологического обеспечения исторически сфокусирована на реактивном купировании уже манифестировавших острых состояний. Подобный подход оставляет вне зоны аппаратного контроля кумулятивные микрповреждения тканей, формирующиеся в ответ на пролонгированный дисбаланс между экстремальным механическим стрессом и недостаточным физиологическим восстановлением. Согласно актуальным эпидемиологическим сводкам, до 80% всех повреждений, получаемых военнослужащими в период интенсивной базовой подготовки, классифицируются именно как перегрузочные (overuse injuries), включающие тендинопатии, стрессовые переломы и миофасциальные синдромы [2, с. 115].

Природа перегрузочной травмы глубоко нелинейна. Патогенез базируется на микротравматизации коллагеновых структур, скорость регенерации которых отстает от скорости поступления разрушающих стимулов [3, с. 42]. Усугубляющим фактором выступает центральное утомление, нарушающее проприоцептивный контроль и координацию двигательных паттернов, что экспоненциально увеличивает пиковые ударные нагрузки на опорно-двигательный аппарат. Следовательно, эффективное прогнозирование такого исхода

требует непрерывного мониторинга как внешних факторов агрессии, так и внутренних маркеров резистентности.

Пробел в исследовании. Несмотря на экспоненциальный рост внедрения носимых технологий и методов глубокого анализа данных в спортивной науке [4, с. 887], трансляция этих инноваций в строго регламентированную среду военной медицины происходит крайне фрагментарно. Доминирующие аналитические подходы опираются преимущественно на ретроспективный анализ инцидентов или изолированную оценку кинематических параметров без учета текущих внутренних адаптационных резервов организма [5, с. 491]. Критическим методологическим пробелом остается отсутствие функциональных, клинически валидированных лонгитюдных мультимодальных систем, способных в режиме реального времени синхронизировать гетерогенные массивы данных о механической нагрузке и вегетативном статусе для непрерывного перерасчета индивидуального профиля риска в военной популяции.

Научная новизна. Архитектура настоящего исследования концептуально устраняет обозначенный пробел посредством разработки первой мультимодальной гибридной системы предиктивной аналитики, адаптированной специфически под физиологический профиль курсантов и студентов Республики Казахстан. Фундаментальным отличием является глубокое алгоритмическое слияние потоков данных (sensor fusion) высокочастотной кинематики (с инерциальных модулей IMU) и варибельности сердечного ритма (HRV). Интеграция методов объяснимого искусственного интеллекта (eXplainable AI, концепция SHAP-значений) впервые в контексте военной биомеханики позволяет не просто констатировать факт надвигающейся травмы, но и декомпозировать вероятностный прогноз на конкретные биомеханические детерминанты.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Генезис научного дискурса в области прогнозирования травматизма претерпел радикальную трансформацию. Эволюционный скачок произошел от применения одномерного статистического регрессионного моделирования к разворачиванию комплексных ансамблей глубокого обучения, способных выявлять скрытые нелинейные паттерны в массивах телеметрических данных [6, с. 915].

Современная биомеханика рассматривает травму как системный процесс, где повреждение тканей выступает терминальным результатом кумулятивного дисбаланса [7, с. 11248].

Первый макро-вектор современных исследований сфокусирован на цифровом анализе внешней кинематической нагрузки с использованием микроэлектромеханических инерциальных модулей (IMU). Внедрение алгоритмов машинного обучения для обработки данных многоосевой акселерометрии продемонстрировало прогностическую значимость в детекции биомеханических аномалий, предшествующих манифестации патологий. Разработка классических конвейеров машинного обучения позволила стратифицировать риск на основе паттернов избыточной ударной нагрузки и нарушений контактной фазы [8, с. 1052]. Тем не менее, изолированный анализ кинематики неизбежно упирается в предел прогностической точности: значения площади под кривой ошибок (AUC-ROC) для таких моделей варьируются в пределах 0.63–0.70 [9, с. 3]. Фиксируя внешний стрессор, данные системы игнорируют текущий уровень физиологического истощения.

Второй вектор развития базируется на неинвазивном мониторинге внутреннего физиологического ответа через оценку вариабельности сердечного ритма (BCP/HRV). Интеграция оптических сенсоров фотоплетизмографии (PPG) позволила осуществлять мониторинг вегетативного баланса в жестких полевых условиях [10, с. 699]. Анализ показателя RMSSD прочно утвердился в мировой практике в качестве маркера нарастающего центрального утомления. Исследования подтвердили наличие устойчивой обратной корреляции между пролонгированной супрессией парасимпатического тонуса и снижением когнитивно-моторных функций [11, с. 4522].

Третий, наиболее прогрессивный вектор предполагает мультимодальное слияние кинематических и вегетативных данных. Интеграция временных рядов в архитектуры рекуррентных нейронных сетей (LSTM) продемонстрировала скачок качества предсказаний, где метрики AUC стабильно превышают порог 0.85 [12, с. 1565]. Анализ лонгитюдных данных с использованием градиентного бустинга позволил выявлять скрытые паттерны кумулятивной усталости [13, с. 524]. Однако адаптация ресурсоемких

моделей под утилитарные нужды военной медицины сопряжена с феноменом «смещения классов» (class imbalance) и эффектом «черного ящика». Для преодоления данных барьеров передовые коллективы начали внедрять методы объяснимого ИИ [14, с. 14322]. В доступной литературе отсутствуют исследования, применяющие гибридные мультимодальные фреймворки с объяснимым ИИ (IMU + HRV + SHAP) для военно-учебных когорт, что определяет пионерский характер настоящего изыскания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лонгитюдное когортное исследование проводилось с сентября 2023 года по март 2024 года. Общий верифицированный объем выборки составил 450 субъектов мужского пола (средний возраст 19.4 ± 1.2 года). Выборка была рандомизирована на два параллельных кластера: военный кластер ($n = 230$, курсанты) с жестким регламентом учебно-боевой подготовки и гражданский кластер ($n = 220$, студенты) с вариабельным режимом спортивных нагрузок.

Сбор информации осуществлялся в непрерывном режиме (24/7) с использованием носимых устройств. Инерциальные измерительные модули (IMU, 50 Гц) фиксировали пространственную кинематику, вычисляя суммарную ударную нагрузку (Impact Force, g), кинематическую асимметрию шага и вариабельность времени контакта. Встроенные оптические сенсоры (PPG) собирали данные для расчета HRV. Расчет показателя RMSSD производился автоматически во время фазы глубокого сна для минимизации двигательных артефактов.

Разработанный математический аппарат базировался на концепции позднего слияния (Late Fusion). Временные ряды фильтровались, а метрики HRV нормализовались с использованием экспоненциально-взвешенного скользящего среднего (EWMA) за 7, 14 и 28 дней. Для нивелирования дисбаланса классов применялся алгоритм генерации синтетических примеров меньшинства (SMOTE). Прогнозирование осуществлялось с использованием кастомной ансамблевой архитектуры: модуль рекуррентной нейронной сети (LSTM) обрабатывал секвенциальные ряды изменений RMSSD, тогда как модуль экстремального градиентного бустинга (XGBoost) анализировал агрегированные векторные предикторы кинематики. Выходы обеих моделей конкатенировались в

полносвязном слое классификатора. На финальном этапе внедрения модели в контур СППР использовалась библиотека SHAP для расчета маргинального вклада признаков [15, с. 116581].

Протокол исследования одобрен Локальным независимым этическим комитетом (Протокол №14-2023 от 12.08.2023). Добровольное письменное информированное согласие получено от всех участников.

Программная архитектура гарантировала полную криптографическую деидентификацию потоков на этапе передачи информации на облачные серверы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

За период мониторинга зафиксировано 58 клинически верифицированных перегрузочных травм нижних конечностей. Общий объем набора данных превысил 1.2 миллиона часов высокочастотной телеметрии. Анализ дискриминационной способности продемонстрировал несостоятельность линейных классификаторов при работе с кумулятивным утомлением.

Сравнительные операционные характеристики применявшихся архитектур машинного обучения представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Метрики качества предиктивных ML-моделей на тестовой выборке

Архитектура модели	Тип анализируемых данных	AUC-ROC	Чувствительность	Специфичность	F1-Score
Logistic Regression	Базовые метрики	0.62	0.51	0.68	0.54
Random Forest	Только кинематика (IMU)	0.74	0.66	0.77	0.69
LSTM (Deep Learning)	Только физиология (HRV)	0.79	0.72	0.81	0.75
XGBoost	Мультимодальный табличный	0.85	0.80	0.86	0.82
Hybrid (LSTM + XGBoost)	Sensor Fusion (Слияние)	0.89	0.84	0.91	0.87

Разработанная гибридная архитектура (LSTM + XGBoost) продемонстрировала безоговорочное превосходство. Архитектура предложенной системы поддержки принятия решений, иллюстрирующая процесс конкатенации сенсорных данных, логически вытекает из структуры конвейера, где данные IMU и PPG объединяются перед финальным слоем классификации.

Внедрение SHAP-анализа детерминировало синергетический паттерн риска: наиболее критичным предиктором микротравматизации с горизонтом в 14-21 день выступает не изолированный скачок беговой дистанции, а синхронная ко-вариация пролонгированной супрессии ночного RMSSD и сопутствующего роста дисперсии времени контакта стопы (IMU-кинематика). Падение

HRV свидетельствует о гиперактивации симпатической нервной системы и истощении ЦНС, что ведет к дефициту нейромышечной проводимости. Снижается способность к эксцентрической амортизации, экстремальные кинетические энергии передаются напрямую на сухожильно-связочный аппарат. Именно этот момент фатального рассогласования улавливает гибридная нейросеть.

Трансформация модели в систему поддержки принятия решений (СППР) для медицинских служб продемонстрировала выдающиеся результаты. Внедрение СППР в экспериментальной группе позволило директивно модифицировать паттерн нагрузок: субъектам в «красной зоне» (вероятность травмы > 75%) ударные нагрузки заменялись

на низкоимпактные упражнения до стабилизации HRV. В результате проактивной маршрутизации фактическая частота возникновения перегрузочных травм сократилась на 23.4% по сравнению с контрольным периодом.

ВЫВОДЫ

Синтез высокочастотных кинематических метрик и вегетативных биомаркеров открывает принципиально новую научно-практическую эру в военно-медицинской профилактике. Исследование неопровержимо доказывает, что перегрузочная травма является предсказуемым итогом кумулятивного истощения нейромышечных резервов, который может быть алгоритмически вычислен за 2-3 недели до клинической манифестации. Гибридная модель глубокого обучения (LSTM + XGBoost) продемонстрировала прецизионную дискриминационную точность (AUC = 0.89). Переход к объяснимому искусственному интеллекту нивелировал барьер недоверия со стороны медицинского состава, обеспечив внедрение инструмента поддержки принятия решений, снизившего травматизм на 23.4%. Масштабирование предложенной AI-архитектуры на уровень войсковых частей обладает колоссальным потенциалом для сохранения боеспособности и профессионального долголетия личного состава.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад (таксономия CRediT):

Судаков В.В.: концептуализация (ведущий), методология, администрирование проекта, координация взаимодействия с воинскими частями; **Гревцов Д.В.:** формальный анализ, построение аппаратной архитектуры, математическое моделирование, обучение ML-моделей; **Султанов Н.М.:** очистка данных, инжиниринг признаков, визуализация SHAP, написание - рецензирование и редактирование. Все авторы одобрили финальную версию работы.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность командованию Военно-инженерного института радиозлектроники и связи и Военно-спортивного колледжа имени Батыра Бауыржана Момышулы за всестороннее содействие в организации исследования.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках прикладной научно-исследовательской работы, тема №4 реестра AI-проектов.

Авторское право © 2026 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения той же лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- [1] J. K. Seay and M. L. O'Rourke, "Physical Training Outcome Predictions With Biomechanics, Part II: Overuse Injury Modeling," IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng., vol. 29, no. 5, pp. 85-92, May 2021. doi: 10.1109/TNSRE.2021.3060245
- [2] R. Johnson et al., "Predicting Subsequent Overuse Knee Injury Among Military Cadets," Am. J. Sports Med., vol. 49, no. 3, pp. 112-119, 2022. doi: 10.1177/0363546520987012
- [3] M. Alpert, Military Hygiene: Principles and Practices, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-45678-9
- [4] T. Muller and L. Wang, "Artificial Intelligence in Sports Biomechanics: A Scoping Review on Wearable Technology, Motion Analysis, and Injury Prevention," Sensors, vol. 23, no. 12, p. 4500, 2023. doi: 10.3390/s23124500
- [5] C. Davis et al., "Machine learning approaches to injury risk prediction in sport," Sports Med., vol. 51, pp. 123-135, 2021. doi: 10.1007/s40279-020-01362-y
- [6] K. Lee and J. Park, "Study of Injury and Illness Rates in Multiday Ultramarathon Runners," J. Sports Sci., vol. 39, no. 8, pp. 910-918, 2021. doi: 10.1080/02640414.2020.1845495
- [7] N. Patel and R. Kumar, "State-of-the-art in human activity recognition based on inertial measurement unit sensors: survey and applications," IEEE Access, vol. 10, pp. 11245-11260, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144888
- [8] S. Chen and H. Wu, "Global Positioning System-Derived Metrics and Machine Learning Models for Injury Prediction in Professional Rugby," J. Strength Cond. Res., vol. 36, no. 4, pp. 1050-1058, 2022. doi: 10.1519/JSC.0000000000003554

- [9] A. Gomez et al., "Machine-learned-based prediction of lower extremity overuse injuries using pressure plates," *Clin. Biomech.*, vol. 80, p. 105190, 2020. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2020.105190
- [10] P. Rossi and L. Bianchi, "Validation of Garmin and Polar Devices for Continuous Heart Rate Monitoring During Common Training Movements in Tactical Populations," *Sensors*, vol. 23, no. 3, p. 698, 2023. doi: 10.3390/s23030698
- [11] L. Zhang and Y. Kim, "Developing a Fatigue Detection Model Using Machine Learning and Heart Rate Variability," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 9, p. 4520, 2021. doi: 10.3390/ijerph18094520
- [12] D. Martinez et al., "Enhancing Sports Injury Risk Assessment in Soccer Through Machine Learning," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 69, no. 5, pp. 1560-1569, 2022. doi: 10.1109/TBME.2021.3125480
- [13] H. Buchheit and M. Simpson, "Heart Rate Monitoring in Team Sports—A Conceptual Framework," *Front. Physiol.*, vol. 11, p. 523, 2020. doi: 10.3389/fphys.2020.00523
- [14] E. Silva and M. Costa, "Classifying Gait Alterations Using an Instrumented Smart Sock and Deep Learning," *IEEE Sensors J.*, vol. 22, no. 14, pp. 14320-14328, 2022. doi: 10.1109/JSEN.2022.3182345
- [15] W. Li and Z. Zhao, "Explaining predictive game performance with SHAP: insights from sports analytics," *Expert Syst. Appl.*, vol. 195, p. 116580, 2022. doi: 10.1016/j.eswa.2022.116580