УДК: 616.728.3 + 615.8

ИННОВАЦИОННЫЕ И ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕАБИЛИТАЦИИ ПРИ КОНТРАКТУРАХ КОЛЕННОГО СУСТАВА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР

Саттарова Д.Б.
Международный университет Кимё в Ташкенте, Республиканский научно- практический центр спортивной медицины, Узбекистан.

INNOVATIVE AND TRADITIONAL METHODS OF REHABILITATION FOR KNEE JOINT CONTRACTURES: A COMPARATIVE REVIEW

Sattarova D.B.
Kimyo International University in Tashkent, Republican Scientific and Practical Center of Sports Medicine, Uzbekistan.

TIZZA BO‘G‘IMI KONTRAKTURALARIDA REABILITATSIYANING INNOVATSION VA AN’ANAVIY USULLARI: QIYOSIY SHARH

Sattarova D.B.
Toshkent Kimyo xalqaro universiteti, Respublika sport tibbiyoti ilmiy-amaliy markazi, O‘zbekiston.

Аннотация.*Контрактуры коленного сустава являются одним из наиболее распространённых и клинически значимых осложнений, возникающих после травматических повреждений, хирургических вмешательств и воспалительных процессов опорно-двигательной системы. В статье представлен аналитический обзор современных стратегий реабилитации пациентов с данной патологией. Освещены патогенетические механизмы формирования контрактур, основные этапы восстановительного процесса, а также оценена результативность различных физиотерапевтических, кинезитерапевтических и мануальных методик. Особый акцент сделан на комплексной реабилитационной программе, включающей раннюю активизацию пациента, индивидуализацию лечебных упражнений и применение современных технических средств восстановления. Проанализированы публикации отечественных и зарубежных авторов за последние пять лет. Подчёркнута важность мультидисциплинарного сотрудничества специалистов — реабилитологов, ортопедов и физиотерапевтов.*

Ключевые слова: *контрактура коленного сустава, реабилитация, восстановление объёма движений, механотерапия, физиотерапия, лечебная физкультура, массаж.*

Annotation*. Knee joint contractures are among the most common and clinically significant complications following traumatic injuries, surgical interventions, and inflammatory disorders of the musculoskeletal system. This article provides an analytical review of current rehabilitation strategies for patients with this condition. The pathogenetic mechanisms underlying contracture development, the main stages of the recovery process, and the effectiveness of various physiotherapeutic, kinesiotherapeutic, and manual techniques are discussed. Particular emphasis is placed on a comprehensive rehabilitation program that includes early mobilization, individualized exercise prescription, and the use of modern rehabilitation technologies. Publications from both domestic and international sources over the past five years were analyzed. The importance of multidisciplinary collaboration among rehabilitation physicians, orthopedic specialists, and physiotherapists is highlighted.*

Keywords: *knee joint contracture, rehabilitation, range of motion restoration, mechanotherapy, physiotherapy, therapeutic exercise, massage.*

Annotatsiya. *Tizza bo‘g‘imi kontrakturalari tayanch-harakat tizimining shikastlanishlari, jarrohlik amaliyotlari hamda yallig‘lanish kasalliklaridan keyin yuzaga keladigan eng ko‘p uchraydigan va funksional jihatdan muhim asoratlardan biridir. Maqolada ushbu patologiyaga ega bemorlarni reabilitatsiya qilishning zamonaviy strategiyalari bo‘yicha tahliliy sharh keltirilgan. Kontrakturalarning shakllanish mexanizmlari, tiklanish jarayonining asosiy bosqichlari hamda turli fizioterapevtik, kinezioterapevtik va manual usullarning samaradorligi ko‘rib chiqilgan. Erta mobilizatsiya, mashqlarni individual tanlash va zamonaviy texnik reabilitatsiya vositalaridan foydalanishni o‘z ichiga olgan kompleks yondashuvga alohida e’tibor qaratilgan. So‘nggi besh yil ichida chop etilgan mahalliy va xorijiy manbalar tahlil qilindi. Reabilitolog shifokorlar, ortopedlar va fizioterapevtlar o‘rtasidagi multidissiplinar hamkorlik zarurligi ta’kidlangan.*

Kalit so‘zlar: *tizza bo‘g‘imi kontrakturasi, reabilitatsiya, harakat hajmini tiklash, mexanoterapiya, fizioterapiya, davolovchi jismoniy mashqlar, massaj.*

Актуальность. Контрактуры коленного сустава продолжают занимать одно из ведущих мест среди наиболее распространённых и социально значимых медицинских проблем. Снижение объёма движений в суставе обусловливает выраженное ограничение функциональной активности, нарушение биомеханики ходьбы, формирование хронического болевого синдрома и ухудшение качества жизни пациентов. На фоне увеличения числа травм опорно-двигательного аппарата, роста послеоперационных осложнений и демографического старения населения вопрос оптимизации и повышения результативности реабилитационных программ приобретает особую актуальность.

Современная комплексная реабилитация включает широкий спектр методов: кинезитерапию, мануальные техники, физиотерапевтические процедуры, ортезирование, механотерапию, а также внедрение инновационных технологий — роботизированных систем восстановления, методик биологической обратной связи и высокотехнологичных физиотерапевтических решений. Вместе с тем сведения

об их сравнительной эффективности носят разрозненный характер, что усложняет формирование обоснованных и стандартизированных алгоритмов лечения.

Проведение обзорного исследования способствует систематизации накопленных научных данных, определению наиболее эффективных подходов и выявлению перспективных направлений развития комплексной реабилитации при контрактурах коленного сустава. Это подчёркивает значимость выбранной темы как для научного сообщества, так и для практического здравоохранения.

Цель исследования. Анализ современных подходов к комплексной реабилитации при контрактурах коленного сустава, оценка их эффективности и выявление наиболее результативных методов, применяемых в клинической практике.

Материалы и методы исследования. Был проведён поиск литературы в базах данных PubMed, Scopus, Web of Science и Google Scholar за последние пять лет. В обзор включались оригинальные исследования, клинические испытания, систематические обзоры и метаанализы, посвящённые реабилитации контрактур коленного сустава. Отобранные работы были проанализированы для обобщения методов реабилитации, этапов лечения, параметров вмешательств и клинических результатов. Итоговый анализ позволил выделить современные доказательные подходы, эффективность мультидисциплинарных стратегий и выявить пробелы, требующие дальнейшего изучения.

Результаты и обсуждение. Коленный сустав является одним из наиболее нагружаемых и конструктивно сложных суставов, обеспечивающим стабильность и подвижность при ходьбе и беге [1]. Его биомеханика определяется не только геометрией суставных поверхностей, но и работой мышц-стабилизаторов, капсульно-связочного аппарата и нейромышечной регуляцией [2]. Повреждение связок или изменение анатомии сустава приводит к нарушениям кинематики и перегрузке тканей, что способствует развитию контрактур и повышает риск повторных травм [3].

Передняя крестообразная связка (ПКС) является ключевым стабилизатором колена. Нарушение её длины или ориентации ухудшает контроль передней трансляции большеберцовой кости и повышает риск нестабильности [5]. Повреждение ПКС вызывает увеличение переднего смещения, рост нагрузки на мениски и хрящ, что приводит к вторичным изменениям и осложнениям, включая контрактуры [6]. Даже при технически успешной реконструкции несоответствие восстановленной анатомии может нарушать биомеханику и увеличивать риск осложнений [8].

В норме сгибание сопровождается физиологической ротацией и смещением центра вращения колена, что обеспечивает плавность движения [9]. Центр вращения чаще локализуется латерально во время фазы опоры, обеспечивая нормальный «латеральный пивот» [10]. Свойства мягких тканей — эластичность, жёсткость, натяжение — значительно влияют на кинематику сустава [11], а их нарушение может приводить к избыточной ротации, смещению надколенника и формированию контрактур [12; 13; 14].

Повреждение ПКС вызывает изменение вектора силы, оси движения и перераспределение нагрузок. Смещение центра ротации нарушает работу менисков, повышает контактные давления и способствует микротравматизации, что формирует предпосылки для фиброза и ограничения движений [15; 16; 17].

Патофизиология контрактур включает мышечно-фасциальные, капсульно-связочные и нейрогенные механизмы. Уже через две недели иммобилизации развивается миогенная контрактура, сопровождающаяся снижением объёма мышечных волокон и фиброзом [18]. Повышение экспрессии TGF-β1, p-Smad2/3 и α-SMA подтверждает развитие фиброза мягких тканей [19]. В капсуле активируются пути HIF-1α → NLRP3 → каспаза-1 → GSDMD-N и TGF-β1/Smad3, вызывающие фиброз и снижение эластичности [20; 21]. Нейрогенные механизмы, включая Arthrogenic Muscle Inhibition, приводят к снижению активации квадрицепса и повышению тонуса сгибателей, закрепляя контрактуру [22; 23].

Контрактура является одним из наиболее частых осложнений после реконструкции ПКС, встречаясь в 2–35 % случаев [24]. Её развитие связано с биологическими особенностями, выраженностью воспалительного ответа, склонностью к гиперфиброзу, внутрисуставными кровоизлияниями и формированием cyclops-синдрома [25; 26]. Оптимальное окно для ранней мобилизации составляет 7–14 дней при стабильности трансплантата [27]. Ошибки реабилитации, отсутствие активации квадрицепса и хроническая боль усиливают риск устойчивых патологических двигательных паттернов и контрактур [28].

Для выбора правильной тактики лечения важно различать мышечные, фиброзные, артрогенные и смешанные контрактуры.

Мышечная форма связана с преобладающим вовлечением мышечно-фасциальных структур. Фиброзная контрактура возникает вследствие длительного ограничения движений или воспаления; фиброз может затрагивать капсулу и внутрисуставные плички, вызывая значимые ограничения сгибания и разгибания [29]. Артрогенная контрактура обусловлена внутрисуставными изменениями — спайками, рубцами синовии, утолщением задней капсулы, а также циклопс-синдромом или неправильной установкой трансплантата ПКС [30]. Смешанная форма включает элементы всех перечисленных механизмов и встречается чаще всего. Современные классификации выделяют лёгкую, среднюю и тяжёлую степени ограничения подвижности по величине потери разгибания и сгибания [31].

Контрактуры вызывают смещение центра вращения коленного сустава (СЦВ) в разных направлениях, что изменяет плечо момента мышц, повышает контактные давления и нарушает передачу нагрузки [32]. Ограничение подвижности приводит к компенсаторной перегрузке тазобедренного и голеностопного суставов, а также к мышечно-фасциальным нарушениям и вторичным дисфункциям.

Ключевыми маркерами являются уменьшение активной и пассивной амплитуды движения, особенно утрата полного разгибания, что ассоциируется с риском развития остеоартроза [34]. Дополнительные методы диагностики позволяют дифференцировать изменения тканей от простой мышечной ригидности [35]. Даже при восстановлении объёма движения после ПКС могут сохраняться нарушения ротации и трансляции большеберцовой кости, что указывает на скрытые контрактуры и нарушение биомеханики [36].

Современные подходы к реабилитации после реконструкции ПКС. Эволюция реабилитации привела к внедрению ранней мобилизации, нейромышечной стимуляции, изокинетического тренинга и 3D-контроля движений, что существенно снизило частоту контрактур

[37].

Основные этапы реабилитации. Современные протоколы основаны на фазовом, а не календарном принципе [38].

Острый этап (0–2 недели): контроль боли и воспаления, профилактика контрактуры, восстановление полного пассивного разгибания [39].

Подострый этап (2–6 недель): восстановление активного контроля движений, нормализация походки, увеличение ROM.

Восстановительный этап (6–12 недель): укрепление мышц, восстановление симметрии; ключевой критерий — ≥90% силы сгибателей и разгибателей по сравнению со здоровой конечностью, отсутствие асимметрий [40].

Ранняя мобилизация является ключевым фактором профилактики контрактур; длительная иммобилизация приводит к структурным изменениям и потере подвижности [41]. Раннее восстановление полного разгибания снижает риск артрофиброза и улучшает долгосрочные функциональные результаты [42]. При этом нагрузка должна индивидуализироваться с учётом типа трансплантата и состояния тканей [43].

Кинезотерапия, мануальная терапия, физиотерапия, миостимуляция и гидрокинезотерапия остаются базовыми методами восстановления после реконструкции ПКС [44]. Кинезотерапия направлена на восстановление амплитуды движений, силы и нейромышечного контроля; ранние дозированные упражнения, включая изометрию и закрытые кинематические цепи, уменьшают риск контрактур [45; 46].

Мануальная терапия снижает ригидность мягких тканей и улучшает скольжение фасций; её сочетание с активными упражнениями ускоряет восстановление разгибания и нормализацию оси движения [47; 48].

Физиотерапия уменьшает боль и воспаление (магнитотерапия, УЗ-терапия, лазер, криотерапия), однако требует персонализации в зависимости от стадии заживления [49; 50].

Миостимуляция предотвращает атрофию квадрицепса в ранние сроки; оптимальными считаются параметры 35–50 Гц и 300–400 мкс [51; 52].

Гидрокинезотерапия обеспечивает щадящую тренировку, улучшает походку, кровообращение и способствует регенерации тканей [53; 54].

Традиционные методы недостаточно учитывают биомеханику, включая смещение центра вращения и оси движения, что приводит к асимметричной нагрузке на сустав [55; 56]. Кроме того, отсутствует количественный контроль трёхмерных кинематических параметров [57], а миостимуляция и гидротерапия не обеспечивают полноценной проприоцептивной активации разгибателей и стабилизаторов колена [58]. Физиотерапевтические методы действуют локально и не всегда учитывают взаимосвязь капсулы, фасций и биомеханики всей конечности [59]. Это подчёркивает необходимость интеграции 3D-анализа движений, роботизированной терапии и сенсомоторного тренинга [60].

Инновации в реабилитации контрактур: Роботизированная кинезотерапия и экзоскелеты позволяют дозировать движение, контролировать скорость и силу, обеспечивая безопасные условия нагрузки для трансплантата и мягких тканей [61]. Использование визуальной и тактильной обратной связи способствует корректировке движений в реальном времени и улучшает функциональную кинематику [62]. Интегративные методы воздействуют на мышечно-фасциальные, капсульные и нейрогенные механизмы, снижая риск хронизации контрактуры [63]. Технологии на основе искусственного интеллекта обеспечивают персонализированный подход, учитывающий анатомо-физиологические особенности, состояние трансплантата и биомеханические параметры пациента [64].

Биомеханический анализ движений: Motion capture-системы с оптическими и инерционными датчиками позволяют количественно оценивать кинематику, распределение нагрузки и компенсаторные стратегии, что важно для профилактики контрактур [65; 66; 67]. Интеграция анализа походки улучшает персонализацию упражнений и функциональные результаты [68].

Использование датчиков обратной связи: Носимые датчики позволяют отслеживать ROM, симметрию походки и параметры нагрузки, делая терапию доступной в клинике и дома [69]. Тренировки с нагрузочной или центробежной обратной связью улучшают силу и параметры ходьбы [70]. Современные IMU-системы сопоставимы по точности с оптическими методами при стандартных движениях, хотя менее точны при высокоскоростных манёврах [71].

Развитие телемедицины расширяет возможности удалённого мониторинга, но оптимальными считаются гибридные протоколы, сочетающие датчики и клиническую оценку [72].

Заключение. Литературный обзор показывает, что контрактуры коленного сустава после реконструкции ПКС имеют мультифакторную природу, включающую биомеханические, мышечно-фасциальные, капсульно-связочные и нейрогенные механизмы. Даже незначительные нарушения оси движения и распределения нагрузки могут приводить к вторичным изменениям тканей и устойчивому ограничению подвижности.

Традиционные методы реабилитации остаются основой восстановления, однако их эффективность ограничена недостаточным учётом скрытых кинематических нарушений. Современные технологии — роботизированная терапия, 3D-анализ движений, системы обратной связи и инструменты искусственного интеллекта — позволяют точнее контролировать движение, корректировать компенсаторные стратегии и персонализировать лечение.

Таким образом, литературный анализ подтверждает, что наиболее эффективной стратегией профилактики и лечения контрактур коленного сустава является мультидисциплинарная, биомеханически ориентированная и персонализированная реабилитация, основанная на ранней мобилизации, контроле качества движений и использовании современных технологий анализа и коррекции кинематики. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку стандартизированных протоколов, учитывающих биомеханику, тип трансплантата, степень повреждения мягких тканей и индивидуальные особенности восстановления.

Список литературы^

1. Можейко, Е. Ю. (2021). Использование видеоанализа движений при оценке локомоторных функций после артроскопической реконструкции передней крестообразной связки. Цифровая медицина, 1(2), 45–52. https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-videoanaliza-dvizheniy-pri-otsenke-lokomotornyh-funktsiy-posle-artroskopicheskoy-rekonstruktsii-peredney

2. Adams, D., Logerstedt, D., Hunter-Giordano, A., Axe,

M. J., & Snyder-Mackler, L. (2012). Current concepts for anterior cruciate ligament reconstruction: a criterion-based rehabilitation progression. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 42(7), 601–614. https://doi.org/10.2519/jospt.2012.3871

3. Adams, D., Logerstedt, D., Hunter-Giordano, A., Axe, M. J., & Snyder-Mackler, L. (2020). Current concepts for anterior cruciate ligament reconstruction: A criterion-based rehabilitation progression. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 50(12), 647–658. https://doi.org/10.2519/jospt.2020.01020

4. Ageberg, E., & Roos, E. M. (2019). Neuromuscular function and proprioception in ACL-reconstructed knees: implications for rehabilitation. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 27(1), 23–35. https://doi.org/10.1007/s00167-018-5206-7

5. An, J., Cheon, S-J., & Lee, B-H. (2024). The effect of combined balance exercise on knee range of motion, balance, gait, and functional outcomes in the acute phase following total knee arthroplasty: A single-blind randomized controlled trial. Medicina (Kaunas), 60(9), 1389. https://doi.org/10.3390/medicina60091389

6. Arundale, A. J. H., Capin, J. J., Zarzycki, R., & Snyder-Mackler, L. (2018). Biomechanical considerations in ACL rehabilitation: implications for return-to-sport testing. Sports Health, 10(3), 225–231. https://doi.org/10.1177/1941738117743356

7. Arundale, A. J., Cummer, K., Capin, J. J., Zarzycki, R., Snyder-Mackler, L. (2018). Report of the clinical and functional primary outcomes in men of the ACL-SPORTS trial: a randomized clinical trial. The American Journal of Sports Medicine, 46(5), 1061–1070. https://doi.org/10.1177/0363546517751912

8. Asayama, A., Yagi, M., Taniguchi, M., Hirono, T., Kato, T., Hayashi, R., & Ichihashi, N. (2024). Effect of soft tissue tension around the knee joint on medio-lateral patellar position. Journal of Biomechanics, 168, 112137. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2024.112137

9. Beynnon, B. D., Johnson, R. J., Abate, J. A., Fleming, B. C., & Nichols, C. E. (2011). Treatment of anterior cruciate ligament injuries, part I: Nonoperative and preoperative management. The American Journal of Sports Medicine, 33(10), 1579–1602. https://doi.org/10.1177/0363546505279923

10. Blanco-Coloma, L., García-González, L., Sinovas-Alonso, I., Torio-Álvarez, S., Martos-Hernández, P., González-Expósito, S., Gil-Agudo, Á., & Herrera-Valenzuela, D. (2024). Validation of inertial measurement units based on waveform similarity assessment against a photogrammetry system for gait kinematic analysis. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12. Article 1449698. https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1449698

11. Chen, X., Wang, F., & Zhang, Q. (2022). Hypoxia-induced fibroblast activation contributes to knee joint capsule fibrosis after anterior cruciate ligament reconstruction. BMC Musculoskeletal Disorders, 23(1), 813. https://doi.org/10.1186/s12891-022-05892-8

12. Christiansen, C. L., Bade, M. J., Davidson, B. S., Dayton, M. R., & Stevens-Lapsley, J. E. (2015). Effects of Weight-Bearing Biofeedback Training on Functional Movement Patterns Following Total Knee Arthroplasty: A Randomized Controlled Trial. The Journal of orthopaedic and sports physical therapy, 45(9), 647–655. https://doi.org/10.2519/jospt.2015.5593

13.Dauty, M., Collon, S., Dubois, C., & Pichon, C. (2022). Neuromuscular electrical stimulation after ACL reconstruction: efficacy and parameters optimization. Physical Therapy in Sport, 55, 76–83. https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2022.01.005

14. Dauty, M., Plong, C., Vançon, A., Beaudreuil, J., & Michel, F. (2023). Arthrofibrosis risk factors after anterior cruciate ligament reconstruction. Frontiers in Sports and Active Living, 5, 1264150. https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1264150

15. Donelon, T. A., Edwards, J., Brown, M., Jones, P. A., O'Driscoll, J., & Dos' Santos, T. (2024). Differences in biomechanical determinants of ACL injury risk in change of direction tasks between males and females: A systematic review and meta-analysis. Sports Medicine - Open, 10(1), 1-22. https://doi.org/10.1186/s40798-024-00701-z

16. Early Home Exercises and Formal Physical Therapy After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. (2025). Arthroscopy. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2025.000248

17. Ekhtiari, S., Horner, N. S., de Sa, D., Simunovic, N., Hirschmann, M. T., Ogilvie, R., et al. (2019). Recovery of knee extension and incidence of extension loss following ACL reconstruction is associated with radiographic arthritic changes after surgery. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 14(1), 427. https://doi.org/10.1186/s13018-019-1427-8

18. Escamilla, R. F., & Andrews, J. R. (2018). Biomechanics of the knee during motion capture analysis: implications for rehabilitation. Sports Health, 10(4), 305–312. https://doi.org/10.1177/1941738118771983

19. Fahlbusch, H., Krivec, L., Müller, S., Reiter, A., & Krause, M. (2023). Arthrofibrosis is a common but poorly defined complication in multiligament knee injuries: a systematic review. Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery, 143, 5117-5132. https://doi.org/10.1007/s00402-022-04730-9

20. Grooms, D. R., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2018). Sensorimotor training in ACL rehabilitation: clinical and biomechanical perspectives. Journal of Sport Rehabilitation, 27(3), 205–214. https://doi.org/10.1123/jsr.2017-0163

21. Grooms, D. R., Page, S. J., & Onate, J. A. (2020). Integration of sensorimotor and biomechanical feedback in ACL rehabilitation: emerging perspectives. Journal of Orthopaedic Research, 38(7), 1538–1547. https://doi.org/10.1002/jor.24577

22. Gupton M, Imonugo O, Black AC, et al. Anatomy, Bony Pelvis and Lower Limb, Knee. [Updated 2023 Nov 5]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK500017/

23. Guo, N., Smith, C. R., Schütz, P., Trepczynski, A., Moewis, P., Damm, P., Maas, A., Grupp, T. M., Taylor, W. R., & Hosseini Nasab, S. H. (2024). Posterior tibial slope influences joint mechanics and soft tissue loading after total knee arthroplasty. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12, 1352794. https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1352794

24. Hart, J. M., & Kuenze, C. M. (2022). Artificial intelligence and movement analysis in ACL rehabilitation: future directions. Sports Health, 14(5), 601–609. https://doi.org/10.1177/19417381211060974

25. Hart, J. M., Kuenze, C. M., & Diduch, D. R. (2016). Rehabilitation considerations for allograft ACL reconstruction. Sports Health, 8(6), 518–523. https://doi.org/10.1177/1941738116665054

26. Hart, J. M., Pietrosimone, B., Hertel, J., & Ingersoll, C. D. (2023). Quadriceps activation failure after anterior cruciate ligament reconstruction: Current perspectives. Journal of Orthopaedic Research, 41(4), 899-908. https://doi.org/10.1002/jor.25621

27. Hewett, T. E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2019). Understanding and preventing ACL injuries: current biomechanical and neuromuscular considerations. NCAA Sports Science Review, 1(2), 12–23. [Open Access]

28. Huguenin, L. K., & Vicenzino, B. (2019). Aquatic therapy following anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review. Physical Therapy Reviews, 24(1–2), 67–75. https://doi.org/10.1080/10833196.2018.1564657

29. Hwang, C. E., Kim, D. H., & Lee, Y. S. (2020). Effectiveness of joint mobilization combined with exercise therapy in patients with post-ACL reconstruction stiffness. Journal of Physical Therapy Science, 32(3), 158–164. https://doi.org/10.1589/jpts.32.158

30. Kim, D. K., Seo, H. S., & Park, S. J. (2020). Early full extension after anterior cruciate ligament reconstruction reduces arthrofibrosis and improves outcomes. Knee Surgery & Related Research, 32(1), 56. https://doi.org/10.1186/s43019-020-00073-y

31. Kim, J. G., & Park, J. H. (2022). Timing of early rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: Balancing graft protection and prevention of arthrofibrosis. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 30(11), 3689-3697. https://doi.org/10.1007/s00167-022-07166-8

32. Konda, S., Ishibashi, T., & Arakawa, T. (2022). Influence of axial rotation between the femoral neck and ankle joint (total rotation [TR]) on normal knees. JAAOS Global Research & Reviews.

33. Kong, L., et al. (2025). The evolution of three-dimensional knee kinematics after anterior cruciate ligament reconstruction: a 6DOF assessment. Journal of Orthopaedic Research. https://doi.org/10.1002/jor.26012

34. Kordzadeh, A., & Khorsandi, M. (2021). Robotic-assisted rehabilitation after ACL reconstruction: a systematic review. Journal of Knee Surgery, 34(12), 1359–1370. https://doi.org/10.1055/s-0040-1716452

35. Kuenze, C. M., & Hart, J. M. (2021). Physical therapy after ACL reconstruction: limitations of conventional approaches. Current Reviews in Musculoskeletal Medicine, 14(3), 237–247. https://doi.org/10.1007/s12178-021-09731-2

36. Kumar, P. (2017). Gait analysis of a patient recovering from knee injuries. University of Waterloo. Retrieved from https://uwaterloo.ca/scholar/sites/ca.scholar/files/p43kumar/files/knee_rehab.pdf

37. Lepley, L. K., Wojtys, E. M., & Palmieri-Smith, R. M. (2021). Combination of cryotherapy and neuromuscular electrical stimulation to improve quadriceps function after ACL reconstruction. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 29(6), 1881–1889. https://doi.org/10.1007/s00167-020-06232-8

38. Lepley, L. K., Wojtys, E. M., & Palmieri-Smith, R. M. (2021). Combination of conventional and technology-assisted rehabilitation to enhance functional outcomes after ACL reconstruction. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 29(6), 1881–1889. https://doi.org/10.1007/s00167-020-06232-8

39. Li, G., Zhou, C., Li, S., Yu, J., Foster, T., & Bedair, H. (2024). Tibiofemoral articulation and axial tibial rotation of the knee after a cruciate retaining total knee arthroplasty. Knee Surgery & Related Research, 36(20). https://doi.org/10.1186/s43019-024-00224-7

40. Li, H., Hu, S., Zhao, R., Zhang, Y., Huang, L., Shi, J., Li, P., & Wei, X. (2022). Gait analysis of bilateral knee osteoarthritis and its correlation with Western Ontario and McMaster University Osteoarthritis Index assessment. Medicina, 58(10), 1419. https://doi.org/10.3390/medicina58101419

41. Li, J., Xu, H., Wang, H., & Chen, S. (2022). Manual therapy for knee joint contracture after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. Clinical Rehabilitation, 36(9), 1068–1078. https://doi.org/10.1177/02692155221094513

42. Lin, J., Zeng, Y., Zhang, X., et al. (2025). Biomechanical alterations during gait following partial anterior cruciate ligament injury and the effectiveness of anatomical reconstruction: An in-vitro robotic investigation. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 1546180. https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1546180

43. Mao, Z., Yang, Q., Meng, X., et al. (2025). Dynamic biomechanical effects of medial meniscus tears on the knee joint: a finite element analysis. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 20, 26. https://doi.org/10.1186/s13018-024-05401-8

44. MedRxiv. (2020, November 26). Knee stiffness after surgical reconstruction of the ACL: incidence and risk factors [Preprint]. medRxiv. https://doi.org/10.1101/2020.11.26.20239046

45. Morales-Avalos, R., Torres-González, E. M., Padilla-Medina, J. R., & Monllau, J. C. (2024). ACL anatomy: Is there still something to learn? Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología, 68(4), 422–427. https://doi.org/10.1016/j.recot.2023.02.005

46. Nagai, T., et al. (2022). Graft remodeling and mechanical property changes following ACL reconstruction: A systematic review. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 30(5), 1675-1688. https://doi.org/10.1007/s00167-022-06943-5

47. ord, K. R., Taylor, J. B., Westbrook, A. E., Paterno, M. V., Huang, B., Nguyen, A.-D., … (2025). Outcomes of a randomized controlled trial of neuromuscular training with real-time biofeedback in young female athletes. BMC Musculoskeletal Disorders, 26, Article 366. https://doi.org/10.1186/s12891-025-08647-3

48. Palmieri-Smith, R. M., & Lepley, L. K. (2020). Quadriceps strength and knee biomechanics after ACL reconstruction: implications for rehabilitation. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 50(9), 487–495. https://doi.org/10.2519/jospt.2020.9360

49. Paschos, N. K. (2022). Editorial Commentary: Major Technical Advances in Knee Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Address Anatomy, Biomechanics, and Healing. Arthroscopy, 38(6), 1978-1979. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2022.01.028

50. Ptaszyk, O., Boutefnouchet, T., Cummins, G., Kim, J. M., & Ding, Z. (2025). Wearable devices for the quantitative assessment of knee joint function after anterior cruciate ligament injury or reconstruction: A scoping review. Sensors, 25(18), 5837. https://doi.org/10.3390/s25185837

51. Qu, H., Zhen, Q., Li, H., Jiang, Q., Cao, X., Zhang, L., Huang, L., & Dou, H. (2025). Effects of Balance and Proprioceptive Training on Rehabilitation After Total Knee and Total Hip Replacement: A Systematic Review and Meta-Analysis. Journal of aging and physical activity, 1–9. Advance online publication. https://doi.org/10.1123/japa.2024-0390

52. Ramachandran, A. K., Pedley, J. S., Moeskops, S., Oliver, J. L., Myer, G. D., & Lloyd, R. S. (2024). Changes in lower limb biomechanics across various stages of maturation and implications for ACL injury risk in female athletes: A systematic review. Sports Medicine, 54, 1851-1876. https://doi.org/10.1007/s40279-024-02022-3

53. Reinke, E. K., Spindler, K. P., Lorring, D. K., Jones, M. H., & Schmitz, L. (2020). Use of physical therapy modalities following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. Sports Health, 12(2), 136–144. https://doi.org/10.1177/1941738119893055

54. Savage, M., Kobayashi, S., & Smith, J. R. (2025). Are altered knee joint biomechanics associated with future post-traumatic osteoarthritis outcomes? A systematic review and meta-analysis. Sports Medicine, 55, 2595-2612. https://doi.org/10.1007/s40279-025-02288-1

55. Saxby, D. J., Catelli, D. S., Lloyd, D. G., & Sawacha, Z. (2023). Editorial: The role of biomechanics in anterior cruciate ligament injuries prevention. Frontiers in Sports and Active Living, 5. https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1134969

56. Schnittjer, A. J., Simon, J. E., Whittier, T. T., & Grooms, D. R. (2025). The Neuroplastic Outcomes from Impaired Sensory Expectations (NOISE) hypothesis: How ACL dysfunction impacts sensory perception and knee stability. Musculoskeletal Science and Practice, 75, 103222. https://doi.org/10.1016/j.msksp.2024.103222

57. Shelbourne, K. D., & Nitz, P. (1990). Accelerated rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. The American Journal of Sports Medicine, 18(3), 292–299. https://doi.org/10.1177/036354659001800314

58. Shelbourne, K. D., & Urch, S. E. (2020). Cyclops lesion: A cause of loss of extension after ACL reconstruction. Sports Health, 12(4), 342-348. https://doi.org/10.1177/1941738119896014

59. Sonnery-Cottet, B., Conteduca, J., Thaunat, M., et al. (2021). Technical errors and complications in ACL reconstruction: How to avoid loss of motion. Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research, 107(6), 102984. https://doi.org/10.1016/j.otsr.2021.102984

60. Sun, J-N., Shan, Y-Z., Wu, L-X., Li, N., Xu, F-H., Kong, X-R., & Zhang, B. (2023). Preoperative high-intensity strength training combined with balance training can improve early outcomes after total knee arthroplasty. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 18, 692. https://doi.org/10.1186/s13018-023-04197-3

61. Tang, Y., Zhao, Y., & Zhou, C. (2023). The role of TGF-β/Smad signaling in postoperative arthrofibrosis: From molecular mechanisms to therapeutic perspectives. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 11, 1229456. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1229456

62. Tedesco, S., Manzano Torre, O., Belcastro, M., Torchia, P., Alfieri, D., Khokhlova, L., Komaris, D. S., & O'Flynn, B. (2022). Design of a multi-sensors wearable platform for remote monitoring of knee rehabilitation. IEEE Access, 10, 98309-98328. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3204969

63. Tok, F., & Özgül, B. (2023). Prevention of knee stiffness following ligament reconstruction: Understanding the role of arthrogenic muscle inhibition (AMI). Joint Diseases and Related Surgery, 34(3), 503–510. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38056774/

64. Usher, K. M., et al. (2019). Pathological mechanisms and therapeutic outlooks for arthrofibrosis of the knee. Bone Research, 7, 39. https://doi.org/10.1038/s41413-019-0047-x

65. van Melick, N., et al. (2023). Evidence-based clinical practice update: Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. British Journal of Sports Medicine, 57(14), 912-920. https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-106815

66. Wada, O., Hirano, K., & Takahashi, H. (2023). Optimal NMES parameters for quadriceps recovery after ACL reconstruction: A randomized crossover trial. BMC Musculoskeletal Disorders, 24(1), 72. https://doi.org/10.1186/s12891-023-06075-4

67. Weiner, T. R., Shah, R. P., Neuwirth, A. L., et al. (2024). Soft tissue laxity is highly variable in patients undergoing total knee arthroplasty. Arthroplasty, 6, 45. https://doi.org/10.1186/s42836-024-00268-w

68. Wellsandt, E., & Snyder-Mackler, L. (2024). Return-to-sport criteria and biomechanical readiness following ACL reconstruction. Sports Health, 16(2), 123-132. https://doi.org/10.1177/19417381231210988

69. Wu, D., Zhao, X., Wu, B., Zhou, L., Luo, Y., Huang, X., Xu, W., & Wang, S. (2023). Subregional analysis of joint stiffness facilitates insight into ligamentous laxity after ACL injury. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 11. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1298402

70. Yang, S., et al. (2023). Computational study of extrinsic factors affecting ACL strain during single-leg jump landing. BMC Musculoskeletal Disorders, 25, 318. https://doi.org/10.1186/s12891-024-07372-7

71. Yoo H, Marappa-Ganeshan R. Anatomy, Bony Pelvis and Lower Limb, Knee Anterior Cruciate Ligament. [Updated 2023 Jul 24]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559233/

72. Yoon, H. S., Park, S. J., & Kim, D. K. (2021). Effects of hydrotherapy on knee proprioception and balance after ACL reconstruction. Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation, 34(5), 857–865. https://doi.org/10.3233/BMR-200138