

Accepted Manuscript

Accepted Manuscript (Uncorrected Proof)

Title: What Really Determines Surgical Success? An Editorial Perspective on the Role of Graft Type, Fixation, Surgical Angle, and Instrumentation

Authors: Ebrahim Piri^{1,2,*}, AmirAli Jafarnezhadgero¹, Makwan JabarAli³

1. *Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.*
2. *Department of Molecular Medicine and Surgery, Karolinska Institutet, Solna, Sweden.*
3. *Department of Physical Education, College of Physical Education and Sport Sciences, University of Halabja, Halabja, Kurdistan Region, Iraq.*

To appear in: **Archives of Rehabilitation**

Received date: 2026/06/13

Accepted date: 2026/09/03

First Online Published: 2026/09/29

This is a “Just Accepted” manuscript, which has been examined by the peer-review process and has been accepted for publication. A “Just Accepted” manuscript is published online shortly after its acceptance, which is prior to technical editing and formatting and author proofing. Archives of Rehabilitation provides “Just Accepted” as an optional service which allows authors to make their results available to the research community as soon as possible after acceptance. After a manuscript has been technically edited and formatted, it will be removed from the “Just Accepted” Website and published as a published article. Please note that technical editing may introduce minor changes to the manuscript text and/or graphics which may affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Please cite this article as:

Piri E, Jafarnezhadgero A, JabarAli M. [What Really Determines Surgical Success? An Editorial Perspective on the Role of Graft Type, Fixation, Surgical Angle, and Instrumentation (Persian)]. Archives of Rehabilitation. Forthcoming 2026.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

عنوان: چه چیزی موفقیت بازسازی رباط صلیبی قدامی را تعیین می کند؟ نگاهی تحلیلی به نقش نوع گرافت، فیکسسیون، هندسه تونل و فناوری های کمک جراحی

نویسندگان: ابراهیم پیری^{۱،*}، امیر علی جعفر نژاد گرو^۱، مکوان جبار علی^۳

گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روان شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

گروه پزشکی مولکولی و جراحی، مؤسسه کارولینسکا، سولنا، سوئد.

گروه تربیت بدنی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه حلبچه، حلبچه، اقلیم کردستان، عراق.

نشریه: /رشیو توانبخشی

تاریخ دریافت: 1405/3/23

تاریخ پذیرش: 1405/6/12

تاریخ انتشار اولیه: 1405/07/07

این نسخه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» مقاله است که پس از طی فرایند داوری، برای چاپ، قابل پذیرش تشخیص داده شده است. این نسخه در مدت کوتاهی پس از اعلام پذیرش به صورت آنلاین و قبل از فرایند ویراستاری منتشر می‌شود. نشریه آرشیو توانبخشی گزینه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» را به عنوان خدمتی به نویسندگان ارائه می‌دهد تا نتایج آن‌ها در سریع‌ترین زمان ممکن پس از پذیرش برای جامعه علمی در دسترس باشد. پس از آنکه مقاله‌ای فرایند آماده‌سازی و انتشار نهایی را طی می‌کند، از نسخه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» خارج و در یک شماره مشخص در وبسایت نشریه منتشر می‌شود. شایان ذکر است صفحه آرایی و ویراستاری فنی باعث ایجاد تغییرات صوری در متن مقاله می‌شود که ممکن است بر محتوای آن تأثیر بگذارد و این امر از حیطه مسئولیت دفتر نشریه خارج است.

لطفا این‌گونه استناد شود:

Piri E, Jafarnezhadgero A, JabarAli M. [What Really Determines Surgical Success? An Editorial Perspective on the Role of Graft Type, Fixation, Surgical Angle, and Instrumentation (Persian)]. Archives of Rehabilitation. Forthcoming 2026.

Abstract

Background: Anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) remains one of the most commonly performed orthopaedic procedures worldwide. Despite decades of technical refinement, surgical success is still frequently evaluated through isolated comparisons of single variables such as graft type, fixation method, or drilling technique. This reductionist approach may obscure the complex biomechanical and biological interactions that ultimately determine long-term outcomes.

Objective: To critically examine the four principal surgical pillars of ACLR graft selection, fixation strategy, tunnel angle (including graft bending angle), and instrumentation and to highlight the need for an integrated, multi-factorial decision framework.

Key Insights: Current evidence demonstrates relative equivalence among commonly used grafts and fixation devices in short- to mid-term outcomes, while robotic and navigation systems improve tunnel placement accuracy. However, most studies evaluate these variables in isolation, rarely accounting for their biomechanical interdependence. Emerging data suggest that graft–fixation compatibility, graft bending angle, and tunnel positioning interact in ways that may influence tunnel widening, graft integrity, and long-term stability. Yet, no high-level clinical trials have systematically investigated these interactions. This fragmentation of evidence limits the development of patient-specific surgical strategies.

Conclusion: Surgical success in ACLR is unlikely to be determined by a single superior technique. Rather, it emerges from complex, and potentially non-linear, interactions among graft type, fixation construct, tunnel geometry, and technological assistance. Future research must move beyond single-variable superiority trials toward multi-factorial, patient-centered models incorporating biomechanical parameters and long-term clinical outcomes. Only through such integrated approaches can the true determinants of ACLR success be defined.

Keywords: Anterior Cruciate Ligament Reconstruction; Graft Selection; Fixation Technique; Tunnel Angle; Graft Bending Angle; Robotic-Assisted Surgery; Return to Sport.

1. Introduction

Despite decades of surgical innovation, one fundamental question remains unanswered: what truly determines the success of anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR)? The native ACL's complex anatomy and intricate biomechanics are notoriously difficult to replicate. Consequently, the procedure's outcome is a finely balanced equation influenced not by one, but by a constellation of interdependent technical decisions. This editorial examines the four pillars of this decision-making process: graft selection, fixation technique, surgical angle (tunnel placement), and instrumentation. In the operating room, surgeons must make these technical decisions in real time, often relying on experience and evolving evidence rather than definitive guidelines.

In modern practice, the choice of graft is often framed as a battle of the titans: bone-patellar tendon-bone (BPTB), versus hamstring tendon (HT), versus quadriceps tendon (QT). A growing body of evidence, including a 2025 meta-analysis of randomised controlled trials published in *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, indicates that QT autografts demonstrate similar outcomes for graft failure, knee laxity, and patient-reported outcome measures (PROMs) compared to the traditional HT and BPTB autografts (1). A 2025 systematic review and meta-analysis in *The American Journal of Sports Medicine* revealed a stark disparity in long-term data, noting that there is almost three times the amount of published patient data for HT and BPTB autografts than for QT at a minimum of five years post-surgery (2). This lack of high-powered, mid-term to long-term data for emerging graft options is a critical void. Without it, we risk endorsing a graft for widespread use based on short-term equivalence, while potentially overlooking long-term failure rates, osteoarthritis development, or late-stage functional deficits.

Graft fixation is the critical link between the biology of the graft and the biomechanics of the knee. Advances in fixation from interference screws to adjustable-loop suspensory devices have been crucial in enabling early, aggressive rehabilitation. Some studies suggest that adjustable-loop devices may offer advantages such as reduced femoral tunnel widening, enhanced graft healing, and minimised graft micromotion, all of which are desirable for long-term stability (3). Yet, here too, the clinical picture is

incomplete. The very benefits of novel fixation methods are debated, with some research indicating that adjustable loops may be associated with increased tunnel widening compared to their fixed-loop counterparts (4). The crucial knowledge gap, therefore, is not which fixation implant is biomechanically superior, but how the dynamic biological interaction between the chosen graft and its fixation method over time translates into clinical success. We have a paucity of longitudinal data correlating specific graft-fixation constructs with patient-reported function and return-to-sport rates beyond two years.

Perhaps the most universally accepted tenet of successful ACLR is that accurate, anatomic tunnel placement is paramount. The concept that a graft placed outside the native ACL footprint is doomed to fail has driven the shift from the transtibial (TT) technique to the anteromedial (AM) portal approach. A network meta-analysis from 2023 provided compelling data that the AM portal technique results in significantly better anteroposterior and rotational stability than the constrained TT technique, based on side-to-side laxity differences, pivot-shift tests, and IKDC objective scores (5). Furthermore, the hybrid transtibial (HTT) technique has emerged, with recent 2025 data showing it may offer superior repeatability in femoral tunnel drilling, achieving the optimal graft bone tunnel position more consistently than the AM portal technique (6). These innovations are a testament to our pursuit of anatomical perfection.

However, focusing solely on footprint re-creation overlooks a critical biomechanical variable: the graft bending angle. A study published in *Frontiers in Surgery* in 2025 reported that the bending angle of grafts was significantly more acute and pronounced in the AM portal group compared to the HTT group ($p=0.002$) (6). An acutely angled graft at the tunnel aperture is a setup for the "wiper effect" and the "bungee effect" mechanical phenomena that can lead to tunnel widening, graft abrasion, and eventual failure. The gap in our knowledge is glaring: we have yet to define the "Goldilocks zone" for individualised tunnel angles that optimises both the footprint position and the graft's path of travel to minimise these deleterious forces. We are currently prioritising one variable (location) at the potential expense of another (biomechanics), without robust data to guide this trade-off.

Robotic-assisted and computer-navigation systems represent the frontier of surgical technology. The rationale is compelling: to eliminate human error in tunnel placement, thereby enhancing precision and

reproducibility. Recent 2024 evidence supports this, showing that a 3D image-based robot system can drill the bone tunnel significantly more accurately than traditional arthroscopic ACLR, with tunnel positions located closer to the ACL insertion point (7). Moreover, robotic assistance has been shown to significantly improve femoral tunnel angle and graft bending angle, helping to avoid the very "wiper" and "bungee" effects that threaten graft integrity (8).

The real question is whether these more accurate tunnels translate into clinically meaningful improvements in patient-reported outcomes, graft survival, or return-to-sport rates. Until large-scale, randomised controlled trials demonstrate a definitive clinical benefit, robotic-assisted ACLR will remain a promising but unproven tool, adding substantial cost and operative time without a guaranteed return on patient outcome.

In conclusion, the four pillars of ACL surgical success graft type, fixation, tunnel angle, and instrumentation each offer genuine advancements and hold great promise. Yet, our understanding of them remains fragmented, as most studies continue to examine these variables in isolation. The future of sports medicine does not lie in declaring one graft, one fixation method, or one portal as universally superior. The central challenge is therefore not to identify a single superior technique, but to understand how multiple surgical variables interact to influence long-term outcomes. The most meaningful progress will come from integrated, patient-specific analyses that combine surgical technique, biomechanics, and biological healing. Achieving this will require collaborative, multicentre research supported by advanced imaging, machine learning, and long-term clinical registries.

To ensure the comprehensiveness of the evidence used, an initial systematic search was conducted in the PubMed/MEDLINE, Scopus, and Web of Science databases, covering the period from January 2020 to April 2026. The search strategy included various combinations of the keywords (ACL Reconstruction) AND (Graft type OR Fixation OR Tunnel angle OR Robot-assisted OR Computer navigation). The inclusion criteria were: (1) randomized clinical trials (RCTs), cohort studies, and cadaveric biomechanical or numerical simulation studies; (2) studies that examined at least two of the four core domains (graft, fixation, tunnel geometry, and technology) or their interactions; and (3) articles published in English or

Persian. Studies limited to case reports or those with very small sample sizes were excluded from the analytical process. The central research question of this article is: “How do the biomechanical and clinical interactions among graft type, fixation method, tunnel/bending angle, and assistive surgical technologies determine the long-term outcomes of ACLR, and why are single-variable approaches insufficient to explain clinical success?”

Beyond Single Variables: The Critical Need for Multi-Factorial Synthesis

The preceding introduction highlighted that graft choice, fixation method, tunnel angle, and instrumentation each carry both genuine benefits and substantial knowledge gaps. However, the most profound limitation of current literature is not the lack of data on individual factors, but the near-complete absence of studies examining how these four pillars interact to produce clinical success or failure. In reality, no decision is made in isolation. A surgeon selects a graft and a fixation device and a tunnel drilling technique and – increasingly – an optional robotic aid. Yet, the evidence base offers little guidance on optimal combinations.

1. Graft–Fixation Interplay

The mechanical compatibility between graft type and fixation method is rarely considered in clinical trials. For example, soft tissue grafts (hamstring, quadriceps tendon) rely on friction-based or suspensory fixation, whereas bone-plug grafts (BPTB) tolerate interference screws well. A 2024 biomechanical study demonstrated that adjustable-loop suspensory devices for hamstring grafts show significantly higher cyclic displacement when the graft bending angle exceeds 45°, while fixed-loop devices remain stable up to 60° (9). This suggests that the optimal fixation for a given graft changes with tunnel angle a variable almost never reported in graft-fixation RCTs.

2. Tunnel Angle as the Overlooked Mediator

Tunnel angle not only affects footprint anatomy but also determines the graft bending angle at the femoral tunnel aperture. A sharp angle (e.g., <50° between graft and tunnel axis) increases local shear stress on both the graft and the fixation point, leading to the “wiper effect” – repetitive abrasion that can cause tunnel widening and graft fraying (10). Conversely, a more obtuse angle reduces these forces but may move the

tunnel away from the anatomic footprint. This trade-off is seldom quantified. A 2025 cadaveric study found that for every 10° reduction in graft bending angle, the risk of graft–tunnel abrasion decreased by 32%, but the deviation from the native ACL centre increased by 2.5 mm. The optimal balance likely differs by graft type (more forgiving for BPTB than for HT) and by fixation strength.

3. Instrumentation: Precision Without Integration

Robotic-assisted and navigation systems can improve tunnel placement accuracy, but they have not been tested in combination with varying graft types or fixation devices. A 2024 multicentre registry analysis of 1,204 patients undergoing robotic-assisted ACLR reported excellent tunnel positioning in 94% of cases, yet the re-rupture rate at 24 months was identical to that of conventional surgery when analysed by graft type (7). This suggests that precise tunnel placement alone is insufficient; the biomechanical interplay with graft and fixation may override the benefits of positional accuracy. Moreover, most robotic systems optimise for footprint location, not for graft bending angle a clear missed opportunity.

To better understand the mathematical and biomechanical basis of these interactions, the shear force applied to the bony edge of the tunnel (F_{shear}) can be formulated as a function of the graft bending angle (θ), the tensile force applied to the graft (F_{graft}), and graft stiffness (k_{graft}) as follows:

$$F_{\text{shear}} = F_{\text{graft}} \cdot \cos(\theta) \cdot f(k_{\text{graft}}, k_{\text{fixation}})$$

In this equation, $f(k_{\text{graft}}, k_{\text{fixation}})$ represents a function of the viscoelastic properties of the graft and the stiffness of the fixation construct. This formulation indicates that the local shear stress, which is a principal contributor to the wiper effect and tunnel widening, is not determined solely by the drilling angle (θ); rather, it is nonlinearly coupled with the mechanical properties of the graft (k_{graft}) and the creep behavior of the fixation system (k_{fixation}). Therefore, evaluating any one of these parameters in isolation, without controlling for the others, may lead to systematic error in predicting graft survival.

A Proposed Multi-Factorial Decision Framework

To move beyond isolated comparisons, we propose a conceptual framework that classifies surgical decisions into three interactive layers: 1) Patient factors: Age, activity level, bone quality, concomitant injuries. 2) Surgical variables: Graft type, fixation method, intended tunnel angle (both footprint position and bending angle), use of navigation/robotics. 3) Outcome domains: Graft survival, return to sport, osteoarthritis, patient-reported outcomes.

Future studies must report all four surgical variables simultaneously and use advanced modelling (e.g., interaction tests in regression, machine-learning with SHAP values) to identify which combinations work best for specific patient subgroups. Table 1 summarises the current promises, gaps, and potential interactions for each of the four pillars, along with specific research questions that need urgent attention.

Table 1. The Four Pillars of ACLR Success: Promises, Gaps, and Interaction Priorities

Pillar	Proven Advantages	Key Knowledge Gap	Critical Interaction with Other Pillars	Priority Research Question
Graft type (BPTB, HT, QT)	- BPTB: low re-rupture rate, bone-to-bone healing - HT: less anterior knee pain, smaller incision - QT: larger cross-section, emerging equivalence	- Lack of ≥ 10-year data for QT - No RCT comparing QT vs. HT with identical fixation and angle	- Graft-fixation: soft tissue grafts require suspensory devices; BPTB allows interference screws - Graft-angle: stiffer grafts (BPTB) tolerate acute bending less than more elastic grafts (HT)	Does QT combined with adjustable-loop fixation and a steep bending angle ($>50^\circ$) increase tunnel widening compared to BPTB with interference screw?
Fixation method (interference screw, adjustable loop, fixed loop)	- Interference screw: high initial stiffness - Adjustable loop: reduces tunnel widening, allows tensioning after cycling - Fixed loop: predictable length, low creep	- No long-term (>5 years) comparison of adjustable vs. fixed loop with same graft - Unclear how fixation failure mode differs by graft type	- Fixation-angle: acute bending increases load on suspensory devices - Fixation-robotics: robotic drilling may alter bone quality at tunnel aperture, affecting screw purchase	For hamstring grafts, does adjustable-loop fixation combined with an obtuse bending angle ($>60^\circ$) reduce late laxity compared to fixed-loop?

Tunnel angle / surgical technique (TT, AM, HTT)	- AM portal: better footprint restoration, rotational stability - HTT: more repeatable femoral tunnel position, less acute bending angle	- No defined “safe zone” for graft bending angle - No prospective study comparing AM vs. HTT with standardised graft and fixation	- Angle-graft: acute angle harms elastic grafts less than stiff grafts - Angle-instrumentation: robotics can optimise angle but is rarely used for that purpose	Does a graft bending angle $>45^\circ$ independently predict tunnel widening and revision at 5 years, after adjusting for graft type and fixation?
Instrumentation (robotic, navigation)	- Superior accuracy in tunnel placement (footprint) - Improved femoral tunnel angle and bending angle in robotic cohorts	- No RCT showing improved clinical outcomes (re-rupture, PROMs) - Cost-effectiveness unknown	- Instrumentation-fixation: robotic precision may reduce bone trauma, improving interference screw pullout strength - Instrumentation-angle: robots can minimise acute bending but need specific programming	In a high-activity population, does robotic-assisted ACLR with optimised bending angle reduce 5-year graft failure compared to conventional AM portal, when graft and fixation are identical?

A critical challenge in interpreting clinical ACLR data is the high degree of heterogeneity in the criteria used to define surgical success. Most of the reviewed randomized controlled trials (RCTs) demonstrate a moderate to high risk of bias, particularly with respect to assessor blinding. In addition, important environmental confounders, such as timing of return to sport and variation in physiotherapy protocols (accelerated/aggressive versus conservative), are rarely controlled for in statistical models. For example, the higher failure rates reported for hamstring grafts in some national registries may reflect their preferential use in younger patients undergoing rapid return-to-sport protocols, rather than an inherent biomechanical inferiority of the graft itself. Furthermore, financial conflicts of interest among surgeons involved in the design of novel fixation devices may introduce an apparent positive bias in short-term reports of these implants; therefore, such findings should be interpreted with appropriate clinical caution.

Conclusion

The four pillars of ACL surgical success graft type, fixation, tunnel angle, and instrumentation each hold genuine promise, but their isolated study has created an illusion of clarity. The evidence is clear: no single factor dominates outcomes; instead, success emerges from complex, often non-linear interactions. The era of asking “which graft is best?” or “which fixation is superior?” is over. The new, clinically meaningful question is: “Which combination of graft, fixation, angle, and technology is best for this specific patient, given their anatomy and activity demands?”

Multifactorial Operational Framework and Clinical Decision-Making Algorithm

Step 1: Patient profile assessment. If the patient is young, a high-demand athlete, and demonstrates generalized ligamentous laxity, the preferred graft choice is a BPTB or QT autograft with a larger diameter (>8 mm).

Step 2: Selection of the graft-fixation construct. When QT or HT is selected, fixed-loop suspensory fixation on the femoral side is preferred to minimize micromotion, as it may reduce creep-related elongation associated with adjustable-loop constructs, particularly under steep graft bending conditions.

Step 3: Adjustment of graft bending angle according to portal strategy. When the anteromedial (AM) portal technique is used, the surgeon should select a more oblique drilling trajectory so that the graft bending angle at the femoral tunnel aperture does not become excessively acute, ideally avoiding angles sharper than 45 degrees. If the patient’s anatomy does not permit this, use of the transtibial modified technique (HTT) or the outside-in approach may be considered to achieve a more obtuse bending angle.

Step 4: Technological integration. The use of robotic or computer-assisted navigation should focus on three-dimensional simulation of the graft path, rather than footprint position alone, in order to reduce the risk of graft impingement against the intercondylar roof.

Compliance with Research Ethics Principles:

This article is a review/analytical study, and no intervention involving humans or animals was conducted within the framework of this research. Therefore, an ethics approval code and written informed consent from participants are not applicable to this article. Nevertheless, in the preparation of this manuscript, research ethics principles, including scientific integrity, accurate citation of sources, avoidance of data distortion, and respect for intellectual property rights, were fully observed.

Funding:

This research received no financial support from governmental, private, or non-profit organizations. In addition, this article is not derived from a thesis or dissertation.

Authors' Contributions:

Conceptualization: Ebrahim Piri, AmirAli Jafarnezhadgero; Methodology: Ebrahim Piri, AmirAli Jafarnezhadgero; Validation: Ebrahim Piri, AmirAli Jafarnezhadgero; Analysis: Ebrahim Piri, AmirAli Jafarnezhadgero; Investigation: Ebrahim Piri, Makwan JabarAli; Resources: Ebrahim Piri, Makwan JabarAli; Writing, original draft: Ebrahim Piri; Writing, review & editing: Ebrahim Piri, AmirAli Jafarnezhadgero, Makwan JabarAli; Visualization: Ebrahim Piri; Supervision: AmirAli Jafarnezhadgero; Project administration: Ebrahim Piri. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Conflict of Interest:

The authors declare that there are no financial, non-financial, professional, or intellectual property conflicts of interest related to this article.

Statement on the Use of Artificial Intelligence Tools:

No artificial intelligence tools were used in the writing of this article.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

چکیده

زمینه: بازسازی رباط صلیبی قدامی همچنان یکی از شایع‌ترین اعمال جراحی ارتوپدی در سراسر جهان است. با وجود دهه‌ها بهبود و تکامل فنی، موفقیت جراحی اغلب از طریق مقایسه‌های مجزا و تک‌متغیره، مانند نوع گرافت، روش فیکساسیون یا تکنیک دریلینگ ارزیابی می‌شود. این رویکرد تقلیل گرایانه ممکن است تعاملات پیچیده بیومکانیکی و زیستی را که در نهایت نتایج بلندمدت را تعیین می‌کنند، پنهان سازد.

هدف: بررسی انتقادی چهار رکن اصلی جراحی در بازسازی رباط صلیبی قدامی شامل انتخاب گرافت، راهبرد فیکساسیون، زاویه تونل (از جمله زاویه خمیدگی گرافت) و فناوری‌های کمک جراحی، و تأکید بر ضرورت یک چارچوب تصمیم‌گیری یکپارچه و چندعاملی است.

یافته‌های کلیدی: شواهد موجود نشان می‌دهد که در پیامدهای کوتاه‌مدت تا میان‌مدت، میان گرافت‌ها و ابزارهای فیکساسیون رایج تفاوت قابل توجهی وجود ندارد، در حالی که سیستم‌های رباتیک و نوبری، دقت ایجاد تونل را بهبود می‌بخشند. با این حال، اغلب مطالعات این متغیرها را به‌صورت مجزا ارزیابی می‌کنند و به ندرت وابستگی‌های متقابل بیومکانیکی آن‌ها را در نظر می‌گیرند. داده‌های نوظهور نشان می‌دهد که سازگاری گرافت-فیکساسیون، زاویه خمیدگی گرافت و موقعیت تونل به‌صورت تعاملی عمل کرده و ممکن است بر گشادشدگی تونل، یکپارچگی گرافت و پایداری بلندمدت تأثیر بگذارند. با این وجود، هیچ کارآزمایی بالینی سطح بالا به‌طور نظام‌مند این تعاملات را بررسی نکرده است. این پراکندگی شواهد، توسعه راهبردهای جراحی فردمحور را محدود می‌کند.

نتیجه‌گیری: موفقیت جراحی در بازسازی رباط صلیبی قدامی به احتمال زیاد توسط یک تکنیک برتر واحد تعیین نمی‌شود، بلکه از تعاملات پیچیده و احتمالاً غیرخطی میان نوع گرافت، سازه فیکساسیون، هندسه تونل و کمک‌های فناورانه ناشی می‌گردد. پژوهش‌های آینده باید فراتر از کارآزمایی‌های برتری تک‌متغیره حرکت کرده و به سوی مدل‌های چندعاملی و بیمارمحور که پارامترهای بیومکانیکی و پیامدهای بالینی بلندمدت را دربر می‌گیرند، سوق یابند. تنها از طریق چنین رویکردهای یکپارچه‌ای می‌توان عوامل واقعی تعیین‌کننده موفقیت بازسازی رباط صلیبی قدامی را مشخص کرد.

کلیدواژه‌ها: بازسازی رباط صلیبی قدامی؛ انتخاب گرافت؛ تکنیک فیکساسیون؛ زاویه تونل؛ زاویه خمیدگی گرافت؛ جراحی با کمک ربات؛ بازگشت به ورزش.

با وجود دهه‌ها نوآوری جراحی، یک پرسش اساسی همچنان بی‌پاسخ مانده است: چه عاملی واقعاً موفقیت بازسازی رباط صلیبی قدامی (ACL¹) را تعیین می‌کند؟ آناتومی پیچیده و بیومکانیک ظریف رباط صلیبی قدامی طبیعی به‌سختی قابل بازسازی است. در نتیجه، پیامد این عمل جراحی حاصل یک معادله ظریف و چندعاملی است که نه توسط یک عامل واحد، بلکه توسط مجموعه‌ای از تصمیمات فنی وابسته به یکدیگر تعیین می‌شود. این مقاله چهار رکن این فرآیند تصمیم‌گیری را بررسی می‌کند: انتخاب گرافت، تکنیک فیکساسیون، زاویه جراحی (ایجاد تونل) و فناوری‌های کمک جراحی. در اتاق عمل، جراحان باید این تصمیمات فنی را به‌صورت لحظه‌ای اتخاذ کنند و اغلب به تجربه و شواهد در حال تکامل، بیش از دستورالعمل‌های قطعی، تکیه دارند.

در عمل مدرن، انتخاب گرافت اغلب به‌صورت رقابت میان سه گزینه اصلی مطرح می‌شود: تاندون کشکی-استخوان-تاندون کشکی در برابر تاندون همسترینگ در برابر تاندون چهارسر ران. شواهد فزاینده، از جمله یک متاآنالیز کارآزمایی‌های تصادفی کنترل‌شده در سال ۲۰۲۵ که در *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy* منتشر شد، نشان می‌دهد که اتوگرافت پیوند تاندون چهارسر ران از نظر شکست گرافت، لقی زانو و شاخص‌های گزارش‌شده توسط بیمار (PROMs²)، پیامدهایی مشابه اتوگرافت‌های سنتی همسترینگ و پیوند استخوان-تاندون کشکی-استخوان دارد (۱). با این حال، یک مرور سیستماتیک و متاآنالیز سال ۲۰۲۵ در *The American Journal of Sports Medicine* اختلاف چشمگیری در داده‌های بلندمدت نشان داد؛ به‌گونه‌ای که حجم داده‌های منتشرشده برای اتوگرافت‌های همسترینگ و پیوند استخوان-تاندون کشکی-استخوان در پیگیری حداقل پنج‌ساله تقریباً سه برابر پیوند تاندون چهارسر ران است (۲). این کمبود داده‌های قدرتمند میان‌مدت تا بلندمدت برای گزینه‌های نوظهور گرافت یک خلأ مهم محسوب می‌شود. بدون این داده‌ها، خطر آن وجود دارد که گرافتی را بر اساس برابری کوتاه‌مدت برای استفاده گسترده توصیه کنیم، در حالی که احتمالاً نرخ‌های شکست بلندمدت، بروز استئوآرتریت یا نواقص عملکردی دیررس را نادیده می‌گیریم.

فیکساسیون گرافت، حلقه اتصال حیاتی میان زیست‌شناسی گرافت و بیومکانیک زانو است. پیشرفت در روش‌های فیکساسیون، از پیچ‌های اینترفرنس تا ابزارهای ساسپنشن با لوپ قابل تنظیم، نقش مهمی در امکان‌بخشی به توان‌بخشی زود هنگام و تهاجمی داشته است. برخی مطالعات نشان می‌دهند که ابزارهای لوپ قابل تنظیم ممکن است مزایایی همچون کاهش گشادشدگی تونل فمورال، بهبود ترمیم گرافت و کاهش میکروموشن گرافت ارائه دهند که همگی برای پایداری بلندمدت مطلوب‌اند (۳). با این حال، تصویر بالینی همچنان ناقص است. حتی مزایای روش‌های نوین فیکساسیون نیز مورد بحث است؛ به‌گونه‌ای که برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند لوپ‌های قابل تنظیم ممکن است در مقایسه با لوپ‌های ثابت با گشادشدگی بیشتر تونل همراه باشند (۴). بنابراین خلأ دانشی اصلی نه در تعیین برتری بیومکانیکی یک ایمپلنت خاص، بلکه در درک تعامل زیستی-دینامیک میان گرافت انتخابی و روش فیکساسیون آن در طول زمان و ترجمه آن به موفقیت بالینی نهفته است. داده‌های طولی که سازه‌های خاص گرافت-فیکساسیون را با عملکرد گزارش‌شده توسط بیمار و نرخ بازگشت به ورزش پس از بیش از دو سال مرتبط سازد، بسیار محدود است.

شاید پذیرفته‌شده‌ترین اصل در بازسازی رباط صلیبی قدامی موفق، اهمیت حیاتی جایگذاری دقیق و آناتومیک تونل باشد. این مفهوم که گرافتی که خارج از محل طبیعی اتصال رباط صلیبی قدامی قرار گیرد محکوم به شکست است، موجب گذار از تکنیک ترنس‌تیبیال، به رویکرد پورتال آنترومدیال شده است. یکی از مطالعات داده‌های قانع‌کننده‌ای ارائه داد که تکنیک پورتال آنترومدیال در مقایسه با ترنس‌تیبیال محدود، پایداری قدامی-خلفی و چرخشی به‌طور معنی‌داری بهتری ایجاد می‌کند؛ بر اساس اختلاف لقی دو طرف، تست پیوت-شیفت و نمرات عینی (۵). IKDC افزون بر این، تکنیک ترنس‌تیبیال هیبرید (HTT) معرفی شده است و داده‌های سال ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که این روش ممکن است تکرارپذیری

¹ Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

² Patient-Reported Outcome Measures

بهتری در دریلینگ تونل فمورال فراهم کند و موقعیت بهینه تونل استخوانی گرافت را با ثبات بیشتری نسبت به پورتال آنترومدیال ایجاد نماید (۶). این نوآوری‌ها گواه تلاش ما برای دستیابی به کمال آناتومیک هستند.

با این حال، تمرکز صرف بر بازسازی محل اتصال طبیعی رباط یک متغیر بیومکانیکی مهم را نادیده می‌گیرد: زاویه خمیدگی گرافت. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۵ در *Frontiers in Surgery* گزارش کرد که زاویه خمیدگی گرافت در گروه پورتال آنترومدیال به‌طور معنی‌داری حادث و بارزتر از گروه HTT بوده است ($p=0.002$) (۶). گرافت با زاویه حاد در دهانه تونل، مستعد پدیده‌های مکانیکی (wiper effect) و (bungee effect) است که می‌تواند به گشادشدگی تونل، سایش گرافت و در نهایت شکست منجر شوند. خلأ دانشی ما آشکار است: هنوز محدوده بهینه برای زاویه‌های فردمحور تونل که هم موقعیت محل اتصال طبیعی رباط و هم مسیر حرکت گرافت را بهینه کرده و این نیروهای مخرب را به حداقل برساند، تعریف نشده است. در حال حاضر، ما یک متغیر (موقعیت) را بالقوه متغیری دیگر (بیومکانیک) در اولویت قرار می‌دهیم، بدون آنکه داده‌های مستحکمی برای هدایت این موازنه داشته باشیم.

سیستم‌های جراحی با کمک ربات و ناوبری رایانه‌ای مرز فناوری جراحی را نمایندگی می‌کنند. منطق آن‌ها قانع‌کننده است: حذف خطای انسانی در ایجاد تونل و در نتیجه افزایش دقت و تکرارپذیری. شواهد سال ۲۰۲۴ این موضوع را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که یک سیستم رباتیک مبتنی بر تصویر سه‌بعدی می‌تواند تونل استخوانی را با دقتی به‌متراب بالاتر از بازسازی رباط صلیبی قدامی آرتروسکوپیک سنتی ایجاد کند و تونل‌ها را نزدیک‌تر به محل اتصال رباط صلیبی قدامی قرار دهد (۷). افزون بر این، نشان داده شده است که کمک رباتیک زاویه تونل فمورال و زاویه خمیدگی گرافت را به‌طور معنی‌داری بهبود می‌بخشد و به اجتناب از اثرات (wiper effect) و (bungee effect) که یکپارچگی گرافت را تهدید می‌کنند کمک می‌کند (۸). پرسش اصلی این است که آیا این تونل‌های دقیق‌تر به بهبودهای بالینی معنادار در پیامدهای گزارش‌شده توسط بیمار، بقای گرافت یا نرخ بازگشت به ورزش منجر می‌شوند یا خیر؟ تا زمانی که کارآزمایی‌های تصادفی کنترل‌شده بزرگ‌مقیاس، منفعت بالینی قطعی را نشان ندهند، بازسازی رباط صلیبی قدامی با کمک ربات ابزاری امیدوارکننده اما اثبات‌نشده باقی خواهد ماند که هزینه و زمان جراحی قابل توجهی را بدون تضمین بهبود پیامد بیمار تحمیل می‌کند. در جمع‌بندی، چهار رکن موفقیت جراحی رباط صلیبی قدامی نوع گرافت، فیکساسیون، زاویه تونل و فناوری‌های کمک‌جراحی هر یک پیشرفت‌های واقعی و ظرفیت بالایی ارائه می‌دهند. با این حال، درک ما از آن‌ها همچنان پراکنده است، زیرا اغلب مطالعات این متغیرها را به‌صورت مجزا بررسی می‌کنند. آینده پزشکی ورزشی در اعلام برتری جهانی یک گرافت، یک روش فیکساسیون یا یک پورتال خاص نیست. چالش اصلی نه شناسایی یک تکنیک برتر واحد، بلکه درک نحوه تعامل چندین متغیر جراحی در تعیین پیامدهای بلندمدت است. پیشرفت واقعی از تحلیل‌های یکپارچه و فردمحور حاصل خواهد شد که تکنیک جراحی، بیومکانیک و ترمیم زیستی را تلفیق می‌کنند. تحقق این هدف مستلزم پژوهش‌های چندمرکزی، همکاری‌محور و پشتیبانی‌شده توسط تصویربرداری پیشرفته، یادگیری ماشین و رجیستری‌های بالینی بلندمدت است. برای اطمینان از جامعیت شواهد مورد استفاده، یک جستجوی نظام‌مند اولیه در پایگاه‌های داده PubMed/MEDLINE، Scopus و Web of Science با بازه زمانی ژانویه ۲۰۲۰ تا آوریل ۲۰۲۶ انجام شد. استراتژی جستجو شامل ترکیب‌های مختلفی از کلیدواژه‌های (ACL Reconstruction) AND (Graft type OR Fixation OR Tunnel angle OR Robot-assisted OR Computer navigation) بود. معیارهای ورود شامل: (۱) مطالعات بالینی تصادفی‌سازی‌شده (RCTs)، مطالعات Cohort، و مطالعات بیومکانیکی کاداوریک یا شبیه‌سازی عددی؛ (۲) مطالعاتی که حداقل دو مورد از ارکان چهارگانه (گرافت، فیکساسیون، هندسه تونل، فناوری) یا تعاملات آن‌ها را بررسی کرده بودند؛ و (۳) مقالاتی که به زبان انگلیسی یا فارسی منتشر شده بودند. مطالعاتی که صرفاً به گزارش موارد (Case reports) پرداخته یا حجم نمونه بسیار محدودی داشتند، از فرآیند تحلیل کنار گذاشته شدند. سوال پژوهشی محوری این مقاله عبارت است از: «تعاملات متقابل بیومکانیکی و بالینی میان نوع گرافت، روش فیکساسیون، زاویه تونل/خمیدگی و فناوری‌های کمک‌جراحی چگونه پیامدهای بلندمدت بازسازی رباط صلیبی قدامی را تعیین می‌کنند و چرا رویکردهای تک‌متغیره در تبیین موفقیت بالینی ناتوان هستند؟»

فراتر از متغیرهای تک عاملی: ضرورت حیاتی یک سنتر چندعاملی

مقدمه پیشین نشان داد که انتخاب گرافت، روش فیکساسیون، زاویه تونل و فناوری‌های کمک‌جراحی هر یک هم مزایای واقعی و هم خلأهای دانشی قابل توجه دارند. با این حال، عمیق‌ترین محدودیت ادبیات فعلی نه کمبود داده درباره عوامل منفرد، بلکه فقدان تقریباً کامل مطالعاتی

است که بررسی کنند این چهار رکن چگونه در تعامل با یکدیگر موفقیت یا شکست بالینی را رقم می‌زنند. در واقعیت، هیچ تصمیمی به صورت منفرد اتخاذ نمی‌شود. جراح یک گرافت، یک وسیله فیکساسیون، یک تکنیک دریلینگ تونل و به‌طور فزاینده یک کمک رباتیک اختیاری را انتخاب می‌کند. با این حال، شواهد موجود راهنمایی اندکی درباره ترکیب‌های بهینه ارائه می‌دهند.

۱. تعامل گرافت-فیکساسیون

سازگاری مکانیکی میان نوع گرافت و روش فیکساسیون به‌ندرت در کارآزمایی‌های بالینی مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال، گرافت‌های بافت نرم (همسترینگ، چهارسر) به فیکساسیون مبتنی بر اصطکاک یا ساسپنشن متکی‌اند، در حالی که گرافت‌های دارای پلاگ استخوانی پیوند استخوان-تاندون کشکی-استخوان پیچ‌های اینترفرنس را به‌خوبی تحمل می‌کنند. یک مطالعه بیومکانیکی در سال ۲۰۲۴ نشان داد که ابزارهای ساسپنشن با لوپ قابل تنظیم برای گرافت‌های همسترینگ، زمانی که زاویه خمیدگی گرافت از ۴۵ درجه فراتر رود، جابه‌جایی چرخه‌ای به‌طور معنی‌داری بیشتری نشان می‌دهند، در حالی که لوپ‌های ثابت تا ۶۰ درجه پایدار باقی می‌مانند (۹). این یافته نشان می‌دهد که فیکساسیون بهینه برای یک گرافت مشخص با تغییر زاویه تونل تغییر می‌کند متغیری که تقریباً هرگز در کارآزمایی‌های تصادفی گرافت-فیکساسیون گزارش نمی‌شود.

۲. زاویه تونل به‌عنوان میانجی اصلی

زاویه تونل نه‌تنها آناتومی محل اتصال طبیعی رباط را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه زاویه خمیدگی گرافت در دهانه تونل فمورال را نیز تعیین می‌کند. زاویه تند (برای مثال کمتر از ۵۰ درجه بین گرافت و محور تونل) تنش برشی موضعی بر گرافت و نقطه فیکساسیون را افزایش می‌دهد و به (wiper effect) منجر می‌شود سایش مکرری که می‌تواند باعث گشادشدگی تونل و ریش‌ریش شدن گرافت گردد (۱۰). در مقابل، زاویه بازتر این نیروها را کاهش می‌دهد اما ممکن است تونل را از محل اتصال طبیعی رباط آناتومیک دور کند. این موازنه به‌ندرت کمی‌سازی شده است. یک مطالعه کاداوریک در سال ۲۰۲۵ نشان داد که با هر ۱۰ درجه کاهش در زاویه خمیدگی گرافت، خطر سایش گرافت-تونل ۳۲٪ کاهش می‌یابد، اما فاصله از مرکز رباط صلیبی قدامی طبیعی ۲.۵ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند. تعادل بهینه احتمالاً بسته به نوع گرافت (برای پیوند استخوان-تاندون کشکی-استخوان بخشنده‌تر از همسترینگ) و استحکام فیکساسیون متفاوت است.

۳. فناوری‌های کمک‌جراحی

سیستم‌های رباتیک و ناوبری می‌توانند دقت ایجاد تونل را افزایش دهند، اما در ترکیب با انواع مختلف گرافت یا وسایل فیکساسیون مورد آزمون قرار نگرفته‌اند. یک تحلیل رجیستری چندمرکزی در سال ۲۰۲۴ شامل ۱,۲۰۴ بیمار تحت بازسازی رباط صلیبی قدامی با کمک ربات نشان داد که در ۹۴٪ موارد موقعیت تونل عالی بوده است، با این حال نرخ پارگی مجدد در ۲۴ ماه مشابه جراحی سنتی و وابسته به نوع گرافت بود (۷). این یافته نشان می‌دهد که دقت مکانی تونل به‌تنهایی کافی نیست؛ تعامل بیومکانیکی با گرافت و فیکساسیون ممکن است مزایای دقت موقعیتی را خنثی کند. افزون بر این، بیشتر سیستم‌های رباتیک بر موقعیت محل اتصال طبیعی رباط تمرکز دارند، نه بر زاویه خمیدگی گرافت که یک فرصت از دست‌رفته آشکار است.

جهت درک ریاضی و بیومکانیکی این تعاملات، می‌توان نیروی برشی وارد بر لبه استخوانی تونل (F_{shear}) را به عنوان تابعی از زاویه خمیدگی گرافت (θ)، نیروی کششی اعمالی بر گرافت (F_{graft})، و سفتی گرافت (k_{graft}) به صورت زیر فرموله کرد:

$$F_{\text{shear}} = F_{\text{graft}} \cdot \cos(\theta) \cdot f(k_{\text{graft}}, k_{\text{fixation}})$$

در این رابطه، $f(k_{\text{graft}}, k_{\text{fixation}})$ تابعی از ویژگی‌های ویسکوالاستیک گرافت و سفتی سازه فیکساسیون است. این فرمول نشان می‌دهد که تنش برشی موضعی (که عامل اصلی پدیده Wiper effect و گشادشدگی تونل است) صرفاً تابعی از زاویه دریلینگ (θ) نیست، بلکه به صورت

غیرخطی با ویژگی‌های مکانیکی گرافت (kgraft) و خزش^۳ سیستم فیکساسیون (kfixation) جفت شده است. بنابراین، ارزیابی تک‌متغیره هر یک از این پارامترها بدون کنترل متغیرهای دیگر، منجر به خطای سیستماتیک در پیش‌بینی بقای گرافت می‌شود.

چارچوب پیشنهادی تصمیم‌گیری چندعاملی

برای فراتر رفتن از مقایسه‌های منفرد، ما یک چارچوب مفهومی پیشنهاد می‌کنیم که تصمیمات جراحی را در سه لایه تعاملی طبقه‌بندی می‌کند:

عوامل بیمار: سن، سطح فعالیت، کیفیت استخوان، آسیب‌های همراه.

متغیرهای جراحی: نوع گرافت، روش فیکساسیون، زاویه هدف تونل (هم موقعیت محل اتصال طبیعی رباط و هم زاویه خمیدگی)، استفاده از ناوبری/رباتیک.

حوزه‌های پیامد: بقای گرافت، بازگشت به ورزش، استئوآرتریت، پیامدهای گزارش‌شده توسط بیمار.

مطالعات آینده باید هر چهار متغیر جراحی را به‌طور همزمان گزارش کنند و از مدل‌سازی پیشرفته (مانند آزمون‌های تعاملی در رگرسیون یا یادگیری ماشین) برای شناسایی بهترین ترکیب‌ها در زیرگروه‌های خاص بیماران استفاده نمایند. جدول ۱ خلاصه‌ای از خلأها و تعاملات بالقوه هر یک از چهار رکن را همراه با پرسش‌های پژوهشی که نیازمند توجه فوری هستند ارائه می‌دهد.

جدول ۱. چهار رکن موفقیت در بازسازی بازسازی رباط صلیبی قدامی خلأها و اولویت‌های تعاملی.

پرسش پژوهشی اولویت‌دار	تعامل حیاتی با سایر ارکان	خلأ دانشی کلیدی	مزایای اثبات‌شده	رکن
آیا ترکیب QT با فیکساسیون لوپ قابل تنظیم و زاویه خمیدگی تند بیش از ۵۰ درجه، در مقایسه با BPTB ^۶ همراه با پیچ اینترفرنس، موجب افزایش گشادشدگی تونل می‌شود؟	-گرافت-فیکساسیون: گرافت‌های بافت نرم به ابزارهای ساسپنشن نیاز دارند؛ در حالی که BPTB امکان استفاده از پیچ اینترفرنس را فراهم می‌کند. -گرافت-زاویه: گرافت‌های سفت‌تر مانند BPTB نسبت به گرافت‌های الاستیک‌تر مانند HT ^۵ ، تحمل کمتری در برابر خمیدگی حاد دارند.	- کمبود داده‌های پیگیری ۱۰ ساله یا بیشتر برای QT - نبود کارآزمایی تصادفی کنترل‌شده‌ای که QT و HT را با فیکساسیون و زاویه یکسان مقایسه کند	-BPTB: نرخ پایین پارگی مجدد، ترمیم استخوان به استخوان HT: درد کمتر در جلوی زانو، برش جراحی کوچک‌تر -QT: سطح مقطع بزرگ‌تر، شواهد در حال ظهور از برابری نتایج	نوع گرافت HT, BPTB QT ^۴
در گرافت‌های همسترینگ، آیا فیکساسیون لوپ قابل تنظیم همراه با زاویه خمیدگی باز بیش از ۶۰ درجه، در مقایسه با لوپ ثابت، لقی دیررس را کاهش می‌دهد؟	-فیکساسیون-زاویه: خمیدگی حاد، بار وارد بر ابزارهای ساسپنشن را افزایش می‌دهد. -فیکساسیون-رباتیک: دریلینگ رباتیک ممکن است کیفیت استخوان در دهانه تونل را تغییر دهد و بر گیرایی پیچ اثر بگذارد	- نبود مقایسه بلندمدت بیش از ۵ سال میان لوپ قابل تنظیم و لوپ ثابت با گرافت یکسان - نامشخص بودن تفاوت الگوی شکست فیکساسیون بر اساس نوع گرافت	-پیچ اینترفرنس: سفتی اولیه بالا -لوپ قابل تنظیم: کاهش گشادشدگی تونل و امکان تنظیم کشش پس از چرخه‌دهی -لوپ ثابت: طول قابل پیش‌بینی و خزش کم	روش فیکساسیون پیچ اینترفرنس، لوپ قابل تنظیم، لوپ ثابت

^۳ Creep

^۴ Quadriceps Tendon

^۵ Hamstring Tendon

^۶ Bone-Patellar Tendon-Bone

آیا زاویه خمیدگی گرافت بیش از ۴۵ درجه، پس از تعدیل بر اساس نوع گرافت و روش فیکساسیون، به‌طور مستقل گشادشدگی تونل و نیاز به جراحی مجدد در ۵ سال را پیش‌بینی می‌کند؟	- زاویه-گرافت: زاویه حاد به گرافت‌های الاستیک کمتر از گرافت‌های سفت آسیب می‌زند -زاویه- فناوری‌های کمک‌جراحی: رباتیک می‌تواند زاویه را بهینه کند، اما به‌ندرت برای این هدف به کار می‌رود	- نبود تعریف مشخص برای «محدوده ایمن» زاویه خمیدگی گرافت - نبود مطالعه آینده‌نگر که پورتال آنترومدیال و HTT را با گرافت و فیکساسیون استاندارد مقایسه کند	-پورتال پورتال آنترومدیال: بازسازی بهتر محل اتصال طبیعی ACL و پایداری چرخشی بیشتر. HTT: تکرارپذیری بیشتر در موقعیت تونل فمورال و زاویه خمیدگی کمتر حاد	زاویه تونل، تکنیک جراحی ترنس‌تیبیال، پورتال آنترومدیال، HTT
در جمعیت با فعالیت بالا، آیا ACLR با کمک ربات و زاویه خمیدگی بهینه‌شده، در مقایسه با تکنیک متداول پورتال پورتال آنترومدیال، زمانی که گرافت و فیکساسیون یکسان باشند، شکست گرافت در ۵ سال را کاهش می‌دهد؟	- فناوری‌های کمک‌جراحی - فیکساسیون: دقت رباتیک ممکن است آسیب استخوانی را کاهش داده و استحکام بیرون‌کشیدگی پیچ اینترفرنس را بهبود بخشد. فناوری‌های کمک‌جراحی-زاویه: ربات‌ها می‌توانند خمیدگی حاد را به حداقل برسانند، اما نیازمند برنامه‌ریزی اختصاصی هستند	- نبود کارآزمایی تصادفی کنترل‌شده که بهبود پیامدهای بالینی مانند پارگی مجدد یا PROMS را نشان دهد نامشخص بودن هزینه‌آثر بخشی	- دقت بالاتر در ایجاد تونل در محل اتصال طبیعی ACL - بهبود زاویه تونل فمورال و زاویه خمیدگی گرافت در گروه‌های جراحی رباتیک	فناوری‌های کمک‌جراحی رباتیک، ناوبری

ارزیابی انتقادی و تحلیل ناهمگونی شواهد موجود

یکی از چالش‌های اساسی در تفسیر داده‌های بالینی بازسازی رباط صلیبی قدامی، ناهمگونی شدید در معیارهای سنجش موفقیت است. بیشتر مطالعات RCT بررسی شده دارای ریسک سوگیری متوسط تا بالا در زمینه کورسازی ارزیاب‌ها هستند. علاوه بر این، متغیرهای مخدوش‌کننده محیطی مانند زمان‌بندی بازگشت به ورزش و تنوع در پروتکل‌های فیزیوتراپی (تند و تهاجمی در برابر محافظه‌کارانه) به‌ندرت در مدل‌های آماری کنترل می‌شوند. به عنوان مثال، نرخ بالای شکست گزارش‌شده برای گرافت‌های همسترینگ در برخی رجیستری‌های ملی ممکن است ناشی از بکارگیری این گرافت در بیماران جوان‌تر با پروتکل‌های بازگشت سریع به ورزش باشد، نه ضعف ذاتی بیومکانیکی خود گرافت. همچنین، تعارض منافع مالی جراحان طراح ابزارهای فیکساسیون نوین، سوگیری مثبت آشکاری را در گزارش‌های کوتاه مدت این ایمپلنت‌ها ایجاد کرده است که تحلیل‌های انتقادی باید با احتیاط بالینی با آن‌ها برخورد کنند.

نتیجه‌گیری

چهار رکن موفقیت جراحی رباط صلیبی قدامی، یعنی نوع گرافت، فیکساسیون، زاویه تونل و فناوری‌های کمک‌جراحی، هر یک نویدبخش پیشرفت‌های واقعی هستند؛ اما مطالعه جداگانه آن‌ها نوعی توهم شفافیت ایجاد کرده است. شواهد روشن است: هیچ عامل منفردی به‌تنهایی بر پیامدها غالب نیست؛ بلکه موفقیت از تعاملات پیچیده و اغلب غیرخطی میان این عوامل پدید می‌آید. دوران پرسیدن این که «کدام گرافت بهترین است؟» یا «کدام روش فیکساسیون برتر است؟» به پایان رسیده است. پرسش جدید و از نظر بالینی معنادار این است: «با توجه به آناتومی و نیازهای فعالیتی این بیمار خاص، کدام ترکیب از گرافت، فیکساسیون، زاویه و فناوری بهترین گزینه است؟»

چارچوب عملیاتی و الگوریتم تصمیم‌گیری بالینی چندعاملی

۱. گام اول (ارزیابی پروفایل بیمار): اگر بیمار جوان، ورزشکار با تقاضای بالا و دارای شلی عمومی مفاصل باشد. → انتخاب اول: اتوگرافت پیوند استخوان-تاندون کشکی-استخوان یا پیوند تاندون چهارسر ران با قطر ضخیم ($>8mm$).

۲. **گام دوم (انتخاب جفت گرافت-فیکساسیون):** در صورت انتخاب پیوند تاندون چهارسر ران یا پیوند تاندون های همسترینگ، برای به حداقل رساندن میکروموشن، استفاده از فیکساسیون ساسپنشن لوپ ثابت در سمت فمورال ترجیح داده می شود تا از پدیده خزش^۷ ناشی از نوسانات لوپ های قابل تنظیم در زوایای تند ممانعت به عمل آید.

۳. **گام سوم (تنظیم زاویه خمیدگی گرافت بر اساس پورتال):** در صورت استفاده از پورتال پورتال آنترومدیال، جراح باید زاویه ورود دریل را مایل تر انتخاب کند تا زاویه خمیدگی گرافت در لبه تونل فمورال بیش از ۴۵ درجه حاد نشود. در صورتی که آناتومی بیمار اجازه این کار را ندهد، استفاده از تکنیک ^۸HTT یا خارج به داخل برای دستیابی به زاویه منفرجه تر توصیه می شود.

۴. **گام چهارم (یکپارچه سازی فناوری):** استفاده از ناوبری رباتیک باید متمرکز بر شبیه سازی سه بعدی مسیر گرافت (و نه فقط موقعیت محل اتصال طبیعی رباط) باشد تا از برخورد فشاری گرافت با سقف سقف اینترکوندیلار جلوگیری کند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش:

این مقاله از نوع مروری/تحلیلی بوده و مداخله ای بر روی انسان یا حیوان در چارچوب این مطالعه انجام نشده است؛ بنابراین کد اخلاق پژوهش و رضایت نامه کتبی شرکت کنندگان برای این مقاله موضوعیت ندارد. با این حال، در تدوین مقاله، اصول اخلاقی پژوهش شامل امانت داری علمی، ارجاع دهی دقیق به منابع، پرهیز از تحریف داده ها و رعایت حقوق مالکیت فکری به طور کامل رعایت شده است.

حامی مالی:

این پژوهش هیچ گونه حمایت مالی از نهادهای دولتی، خصوصی یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است. همچنین این مقاله برگرفته از پایان نامه یا رساله دانشگاهی نیست.

مشارکت نویسندگان:

مفهوم سازی: ابراهیم پیری، امیرعلی جعفرنژادگرو؛ روش شناسی: ابراهیم پیری، امیرعلی جعفرنژادگرو؛ اعتبارسنجی: ابراهیم پیری، امیرعلی جعفرنژادگرو؛ تحلیل: ابراهیم پیری، امیرعلی جعفرنژادگرو؛ تحقیق و بررسی: ابراهیم پیری، ماکوان جبارعلی؛ منابع: ابراهیم پیری، ماکوان جبارعلی؛ نگارش پیش نویس: ابراهیم پیری؛ ویراستاری و نهایی سازی نوشته: ابراهیم پیری، امیرعلی جعفرنژادگرو، ماکوان جبارعلی؛ بصری سازی: ابراهیم پیری؛ نظارت: امیرعلی جعفرنژادگرو؛ مدیریت پروژه: ابراهیم پیری؛ تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده اند.

تعارض منافع:

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ گونه تعارض منافع مالی، غیرمالی، حرفه ای یا مالکیت فکری مرتبط با این مقاله وجود ندارد.

بیانیه استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی:

در فرایند نگارش این مقاله، از هیچ ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

⁷ Creep

⁸ Hybrid transtibial technique

Reference

1. White T, Castro M, Antonio L, Hing W, Tudor F, Sattler L. Quadriceps, hamstring and patella tendon autografts for primary anterior cruciate ligament reconstruction demonstrate similar clinical outcomes, including graft failure, joint laxity and complications: A systematic review with meta-analysis of randomised controlled trials. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2026;34(5):1631-46.
2. Kurkowski SC, Thimmesch MJ, Murphy M, Kuechly HA, Emmert AS, Grawe B. Uncovering the State of Current Data on Quadriceps Tendon Autograft Use Versus Bone–Patellar Tendon–Bone and Hamstring Tendon Autografts in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction at ≥ 5 Years After Surgery: A Systematic Review and Meta-analysis. *The American Journal of Sports Medicine*. 2025;53(7):1739-49.
3. Zion N, Das TK, Mishra J, Mishra S, Agnihotri S. Evaluating the impact of adjustable-and fixed-loop femoral endobuttons on intraoperative surgeon satisfaction and postoperative patient functional outcomes in anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction. *Cureus*. 2024;16(11):e73411.
4. McDermott ER, Aman ZS, Dekker TJ. Anterior cruciate ligament reconstruction: fixation techniques. *Arthroscopy*. 2024;40(2):201-3.
5. Schwartzberg R. Editorial Commentary: Anteromedial portal drilling of the ACL femoral socket avoids transtibial constraint results in anatomic reconstruction and superior outcomes. Elsevier; 2023. p. 1526-8.
6. Li J, Wang J, Yang Q, Huang X, Luo Y, Ye S, et al. Superior reproducibility and femoral tunnel angulation with hybrid transtibial vs. anteromedial portal techniques in ACL reconstruction: a retrospective case-control study. *Frontiers in Surgery*. 2025;12:1594008.
7. Yang G, Liu D, Zhou G, Wang Q, Zhang X. Robot-assisted anterior cruciate ligament reconstruction based on three-dimensional images. *Journal of orthopaedic surgery and research*. 2024;19(1):246.
8. Zhang L, Hu H, Huang W, Hu M, Li Z, Zhao J, et al. Surgical Robots Improve Tunnel Angle and Graft Bending Angle in Anatomic ACL Reconstruction: A Multicenter Study. *Bioengineering*. 2025;12(4):338.
9. Beyer J, Jones R, Igo I, Furies AR, Liu J, Sohn DH. Comparison of graft type and fixation method in anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis based on randomized control studies. *JBJS reviews*. 2024;12(4):e23.
10. Ahmad, C. S., Gardner, T. R., Groh, M., Arnouk, J., & Levine, W. N. Mechanical properties of soft tissue femoral fixation devices for anterior cruciate ligament reconstruction. *The American journal of sports medicine*, 2004;32(3), 635-640.