Archives of
Rehabilitation

July 2022. Vol 23. Num 2

Review Article

Brain Neuroplasticity Effects on the Occurrence of Anterior Cruciate Ligament Injury and the Effect of this Injury on Brain Function and Structure: A Systematic Review

Hassan Daneshmandi[1], ***Mostafa Payandeh**[1], **Zaher Mohammad Ashour**[1]

1. Department of Corrective Exercises and Sports Injuries, School of Physical Education and Sport Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

Use your device to scan and read the article online

Citation Daneshmandi H, Payandeh M, Mohammad Ashour Z. [Brain Neuroplasticity Effects on the Occurrence of Anterior Cruciate Ligament Injury and the Effect of this Injury on Brain Function and Structure: A Systematic Review (Persian)]. Archives of Rehabilitation. 2022; 23(2):162-185. https://doi.org/10.32598/RJ.23.2.3377.1

https://doi.org/10.32598/RJ.23.2.3377.1

ABSTRACT

Objective The present study aimed to investigate the effect of brain neuroplasticity on the incidence of anterior cruciate ligament (ACL) injury and on brain function and structure before and after ligament reconstruction and after a period of rehabilitation exercises.

Materials & Methods In this review study, a search was conducted in PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar, ScienceDirect, MedLine, Pedro, CINAHL, SPORTDiscus, and Cochrane Databases as well as national databases on related studies published from 1970 to 2021 using keywords in Persian and English related to the research topic.

Results The initial search yielded 65 articles. Based on the inclusion and exclusion criteria, 24 articles were selected for review of which 5 articles prospectively examined the effect of brain neuroplasticity on the incidence of ACL injury. Their results showed that the brains of people with ACL injury was different from the uninjured people, especially in the motor-sensory part of the cerebral cortex and cerebellum, which caused errors during movement planning of these persons. Ten articles examined the effect of ACL injury before reconstruction on brain function and structure and reported that changes occur in the level of motor-sensory cortex of the brain at least two weeks after the injury; after one year, these structural and functional changes were widely increased in injured people compared to healthy people. These studies also showed that the ligament dysfunction and the damage to mechanical receptors cause the reorganization of the central nervous system. In injured people, the control activity of motor-visual areas and their need for visual feedback have increased. Seven articles examined these changes after ligament reconstruction and showed that the brain neuroplasticity or functional and structural changes resulting from the injury not only did not return to normal conditions, but also increased after a while despite the reconstruction. Two articles examined these changes after a period of rehabilitation exercises and showed that functional and

Conclusion The changes in the brain after ACL injury not only persist after ligament reconstruction, but also increase after reconstruction. The common rehabilitation exercises whose main focus is not on eliminating these functional and structural changes in the brain cannot overdrive this negative neuroplasticity after injury which is one of the important causes of secondary injury and subsequent complications. In developing exercises to prevent ACL injury and for rehabilitation, it is better to use the new principles of motor learning and exercises related to visual feedback along with conventional exercises to overdrive negative neuroplasticity created in the brain and create positive neuroplasticity to support ACL.

Keywords Brain neuroplasticity, Anterior cruciate ligament, Prevention, Rehabilitation, Motor learning, Return to Play, Visual feedback

Received: 16 Jun 2021
Accepted: 18 Oct 2021
Available Online: 01 Jul 2022

Corresponding Author:
Mostafa Payandeh, PhD Candidate.
Address: Department of Corrective Exercises and Sports Injuries, School of Physical Education and Sports Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
Tel: +98 (917) 3675299
E-Mail: paradise.gheshm2011@gmail.com

English Version

Introduction

Preventing the occurrence of anterior cruciate ligament (ACL) injury and rehabilitation of this ligament injury is still one of the main priorities of the sports medicine community [1]. Approximately, 35% of people with an anterior cruciate ligament injury are unable to return to their previous activity level [2-4]. Following the primary ACL injury, the occurrence of secondary injury or injury in the opposite knee in the first five years reaches more than 23%, especially in young athletes under 25 years [5, 6]. Emerging neuro-mechanical evidence suggests that altered post-injury biomechanics [7] may partially account for unresolved changes throughout the central nervous system (CNS) following an ACL injury that affects the involved and non-involved organs even after their reconstruction [8-10]. For example, in people with ACL reconstruction, brain activity related to the injured knee is seen differently in important areas related to vision, attention, and sensorimotor integration compared to uninjured people of the same age [11-13].

Regarding the significant effect of brain neuroplasticity on the occurrence of injuries in general, injuries that cause structural and functional changes in the brain, and the lack of past research directly addressing brain-related factors, the purpose of the present review was to investigate the following factors:

1. Investigating the effects of brain neuroplasticity on the occurrence of anterior cruciate ligament injury

2. The effects of this ligament injury on the brain function and structure.

Materials and Methods

This review article was an attempt to collect the studies conducted on the role of brain function on the incidence of ACL non-collision, as well as the impact of this ligament injury on the functional and structural changes of the brain from 1980 to 2021. These articles were searched through Web of Science (WOS), Google Scholar, ScienceDirect, Scopus, PubMed, Medline, PEDro, CINAHL, Sport Discus, and Cochrane database of systematic reviews. The keywords in this search included the following items and their synonyms:

Brain AND Neuroplasticity AND ACL injury, Brain OR cortical AND (neuroplasticity OR activation) AND ACL (rupture OR deficiency), Corticomotor AND (neuroplasticity OR excitability) AND ACL (injury OR reconstruction), Brain function AND anterior cruciate ligament injury, Brains, and Sprains.

To search the Persian articles, Scientific Information Database (SID), ISC, Magiran, IranDoc, IranMedex, and Medlib databases were searched using a variety of keywords, including brain function and anterior cruciate ligament rupture, anterior cruciate ligament rupture and brain neuroplasticity, anterior cruciate ligament reconstruction and brain neuroplasticity, dysfunctional damaged anterior cruciate ligament and brain neuroplasticity. In addition, the mentioned English keywords were also used to find English articles published in national scientific journals and a manual search was also used to find the related articles. The authors evaluated the title and abstract of each study separately. The first step in selecting relevant articles was to see if the abstract or the title of the article is consistent with the research topic or not. The next stage was the selection of articles according to the following inclusion and exclusion criteria:

Inclusion criteria

1. Studies published in English and Persian

2. The full text of the article is available

3. Studies that investigated the role of the brain in the occurrence of anterior cruciate ligament injury

4. Studies that evaluated the effect of the unreconstructed anterior cruciate ligament on brain neuroplasticity

5. Studies that investigated the effect of the reconstructed anterior cruciate ligament on brain neuroplasticity

6. Studies that investigated the effect of the reconstructed anterior cruciate ligament after a rehabilitation period on brain neuroplasticity

7. Quasi-experimental studies, randomized clinical trials, cohort studies, review studies, case series studies, cross-sectional studies, case studies, and case-control studies

Exclusion criteria

1. Studies whose score was lower than 18 (relatively good) based on the Modified Downs and Black checklist table.

2. Studies that examined the variables of the current research on people with multiple injuries (for example, anterior cruciate ligament injury with a meniscus injury, etc.) in the knee.

Results

After screening the articles based on the title, abstract, and duplicates, articles that did not meet the research criteria were excluded. Finally, 24 articles were selected and reviewed. Of a total of 24 articles, five papers investigated the effect of brain function on the incidence of ACL injury [14-18]. Among the five articles, two prospective articles by Dickfuss et al. [14, 15] conducted separately on 119 adolescent girls and boys showed that the functional connection of the brain of people who later suffered a cruciate ligament tear was different from people who did not suffer from this ligament injury in some parts, such as the sensorimotor area of the cerebral cortex and cerebellum. In their article, Swanik et al. [17] considered the errors occurring during movement planning by the brain to be the main cause of anterior cruciate ligament injury. The findings of Powers and Fisher [16] also emphasized that skill acquisition exercises, which have a better and long-term effect on the brain than strength exercises, were more effective in preventing anterior cruciate ligament injuries. Finally, regarding the research considering the role of the brain on the occurrence of injury highly important, Dickfus et al. [18] raised a very important question in their research: Is it possible to use the neuroplastic capacity of the CNS in young people for the so-called inoculation and prevention of anterior cruciate ligament injury?

To answer this question, they examined training programs that were designed based on the OPTIMAL PREP strategy (optimizing performance through intrinsic motivation and attention to learning in order to prevent sports injuries). They concluded that performing these exercises with focusing on this strategy created positive neuroplasticity in the brain, which created favorable biomechanical adaptations for injury prevention among both young men and women [1].

The effects of an anterior cruciate ligament injury on brain function and structure

Out of the 24 finalized articles, 19 articles investigated the impact of anterior cruciate ligament damage on brain function and structure. Of these, ten articles before reconstruction [19-28], six articles after reconstruction [2-7], two articles after reconstruction and rehabilitation exercises [34, 35], and one article both before and after reconstruction [36], investigated the effect of an anterior cruciate ligament injury on brain function and structure.

Kakavas et al. [22] and Neto et al. [25] reported that at least two weeks after the ACL injury, they observed changes in the level of the sensory cortex and the motor cortex of the brain, and after one year, these structural and functional changes widely increased in injured people compared to healthy people. Capreli et al. [23] concluded that a dysfunctional injured ligament causes reorganization in the CNS. Valeriani et al. [27] showed that due to the damage to mechanoreceptors, central somatosensory pathways change functionally in injured people. In the same line, **Yang Wu** et al. [19] also showed that one of the most important reasons for continuous functional instability in the injured knee is the change in the processing in the CNS and brain neuroplasticity.

Another important research finding was the change in the activity of motor-visual areas in injured people compared to healthy people. Grooms et al. in a prospective study pointed out [6] that the control activity of visual-motor areas increases in injured people compared to healthy people. Sowanik et al. [26] also concluded that visually impaired people had a weaker performance compared to healthy people. In another research, Grooms et al. [21] also reported that there are changes in the brain of people with ACL rupture so that the injured person will need visual feedback to control the knee more than before. Finally, Heroux and Tremblay [28] showed that in response to unilateral knee disorder resulting from anterior cruciate ligament rupture, long-term adaptation occurs in the cerebral cortex system, which moves motor strategies from a semi-automatic state to a more voluntary state.

The effects of anterior cruciate ligament reconstruction on brain function and structure

out of the six studies related to this part, two studies by Zarzycki et al. [33] and Pietrosimone et al. [32] reported neuroplasticity of the brain related to the vastus medialis muscle. Two other studies by Chris et al. [29] and Gromes et al. [30] also reported changes related to vision after anterior cruciate ligament reconstruction compared to healthy subjects.

Baumeister et al. [37] indicated that after the reconstruction of the anterior cruciate ligament, sensory afferent information changed due to a decrease in peripheral proprioception, and this information did not match the expected information in long-term memory in the brain, which causes changes in the cerebral cortex related to memory processes.

Lepley et al. [31] also observed asymmetry in structural features as well as corticospinal excitability and white matter in the hemisphere associated with the reconstructed limb compared to the hemisphere associated with the healthy leg.

Valeriani et al. [36] who examined seven people before and after anterior cruciate ligament reconstruction concluded that after arthroscopy and knee reconstruction, neither knee proprioception nor central somatosensory conduction improved until two years later.

The effect of anterior cruciate ligament reconstruction and a rehabilitation exercise period on brain function and structure

The only research in this area was the prospective cohort study by Zaraycki et al. [34] showing that after 12 weeks of rehabilitation exercises, the change in corticospinal stimulation of the study subjects was not only standing but also increasing compared to healthy people.

Discussion

In anterior cruciate ligament injury, there are at least two important factors that guide us to investigate the role of the brain in the prevention, occurrence, and rehabilitation of this type of ligament injury. The first factor is the failure of the brain to accurately recognize any coordination errors, and the second factor is the high rate of anterior cruciate ligament rupture before any muscular intervention for support. Studies have shown that 40 to 70 ms are enough to tear the anterior cruciate ligament [38], while the initiation of the reflex response, as well as the accurate recognition of any coordination error and the subsequent creation of muscle tension to create stiffness, can take up to 500 ms [39-41].

Therefore, in order to increase the athlete's speed and movement power, it is necessary to develop cognitive planning by the brain through movement control via feedforward or predictive role. Otherwise, not only relying too much on muscle power is insufficient to create dynamic stability, but also an overreliance on reflex strategies may not be sufficient to support the anterior cruciate ligament [33]. Two prospective studies by Dickfuss et al. showed that the functional connectivity of the brain of people who later suffered anterior cruciate ligament rupture was different from people who did not suffer the injury in areas, including the motor cortex and cerebellum [14, 15]. Unlike the research related to brain function in the occurrence of anterior cruciate ligament injury, the research related to the effect of an anterior cruciate ligament injury on the function and structure of the brain has received the attention of researchers more widely. In this line, Kakavas et al. [22] and Neto et al. [25] reported that at least two weeks after an anterior cruciate ligament injury, changes were observed at the level of the sensory cortex and the motor cortex of the brain. After one year, not only these structural changes maintained but also highly increased.

To answer the question related to the effects of these functional and structural changes on the brain after the rupture of the anterior cruciate ligament, it should be noted that we are currently at the beginning of the road to reach the answer and more extensive studies are still needed. However, one of the effects that neuroplasticity causes are the change in visual function that has been proven relatively. For example, Grooms et al. [21] showed that the control activity of visual-motor areas increased in injured people compared to healthy people.

The ongoing debate is whether all the functional and structural changes that occur in the brain after the anterior cruciate ligament rupture will also remain in the same form after the anterior cruciate ligament reconstruction or not. It should be said that all six articles were found almost unanimous in concluding that these changes were also seen in people who had their cruciate ligament reconstructed, even months after the reconstruction. In this regard, Valeriani et al. [36] showed that the loss of knee mechanoreceptors is associated with changes in the CNS that are not compensated by other nervous structures.

In the third part of the discussion, according to the research results, we will answer the question whether rehabilitation exercises can eliminate all these negative changes in brain function and structure after rupture and reconstruction. Unfortunately, only one study was found in this area by Zaraycki et al. [34], which was conducted as a prospective cohort in 2020. They used a 12-week training protocol. Zaraycki et al. evaluated the brain changes before the rehabilitation period, i.e. two weeks after the operation, and also after a 12-week rehabilitation period. They showed that two weeks after surgery and before the start of rehabilitation exercises, the group that had reconstructed their anterior cruciate ligament had a change in corticospinal stimulation compared to healthy athletes. Also, after 12 weeks of rehabilitation exercises, the changes in the corticospinal stimulation in these people increased compared to healthy people.

Like the approaches to prevent injuries to this ligament, another very important point and question that should be mentioned at the end of the discussion is whether the currently accepted rehabilitation approaches are responsible

for the proper return of athletes to activities. The high rate of re-injury as well as the inability to restore functional capacity suggests that the current standards of care for the anterior cruciate ligament, including reconstruction and rehabilitation, cannot be adequately extended to defects that existed before or after the injury [42-45].

In a review article to optimize rehabilitation exercises and reduce the incidence of secondary injury of the anterior cruciate ligament in 2019, Gokeler et al. [35] proposed integrated clinical exercises using new principles of motor learning in order to support brain neuroplasticity. They proposed the following key concepts to strengthen the rehabilitation program and prepare the patient to return to sports activities after an ACL injury:

1: Performing exercises using external attention and focus, 2: performing exercises using the principles of implicit learning, 3: performing exercises using the principles of differential learning, and 4: performing exercises using the principles of self-controlled learning and contextual interference. The new principles of motor learning presented in this publication may optimize the future of rehabilitation programs and reduce the risk of secondary ACL injury, as well as the early progression of osteoarthritis in these individuals by targeting neuroplastic changes in the brain.

Possibly, the suggestion proposed by Grooms et al. with the highest number of studies in this area can be suggested at the end of this part of the discussion. They point out that the proposed rehabilitation exercise framework is best suited to bring together evidence from neuroscience, biomechanics, motor control, and psychology to support the integration of neurocognitive and visual-motor approaches with traditional neuromuscular interventions during anterior cruciate ligament injury rehabilitation [30].

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

This study was a systematic review and no experiments on animal or human samples were conducted.

Funding

This study did not receive funding from any organizations in for-profit or non-profit sectors.

Authors' contributions

Conceptualization, methodology, validation, data analysis, investigation, resources, editing & review, visualization, project administration, supervision, and funding acquisition: All authors; initial draft preparation: Mostafa Payandeh.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest

مقاله مروری

بررسی تأثیر نوروپلاستیسیتی مغز در بروز آسیب رباط متقاطع قدامی و تأثیر آسیب این رباط بر عملکرد و ساختار مغز (مقاله مروری نظام‌مند)

حسن دانشمندی[۱]، *مصطفی پاینده[۱]، زاهر محمد عاشور[۱]

۱. گروه آسیب شناسی ورزشی و حرکات اصلاحی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

Use your device to scan and read the article online

Citation Daneshmandi H, Payandeh M, Mohammad Ashour Z. [Brain Neuroplasticity Effects on the Occurrence of Anterior Cruciate Ligament Injury and the Effect of this Injury on Brain Function and Structure: A Systematic Review (Persian)]. Archives of Rehabilitation. 2022; 23(2):162-185. https://doi.org/10.32598/RJ.23.2.3377.1

https://doi.org/10.32598/RJ.23.2.3377.1

CC BY NC

چکیده

اهداف هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر نوروپلاستیسیتی مغز بر بروز آسیب رباط متقاطع قدامی و همچنین تأثیر آسیب این رباط بر عملکرد و ساختار مغز قبل از بازسازی رباط، بعد از بازسازی رباط و بعد از یک دوره توان‌بخشی بود.

روش بررسی در این تحقیق سعی شد مطالعات انجام‌شده درزمینه موضوع تحقیق از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۱ جمع‌آوری شود. در همین راستا وب‌سایت‌های پابمد، اسکوپوس، وب‌آوساینس، گوگل‌اسکالر، ساینس‌دایرکت، مد لاین، پدرو، سینال، اسپورت دیسکاس و کاکرین دیتابیس و همچنین پایگاه‌های اطلاعات علمی داخلی مورد استفاده قرار گرفت، و از کلیدواژه‌های فارسی و انگلیسی مرتبط با موضوع تحقیق برای جست‌وجوی مقالات استفاده شد.

یافته‌ها با توجه به روش جست‌وجو ۶۵ مقاله یافت شد که در انتها با توجه به معیارهای ورود و خروج، ۲۴ مقاله به‌صورت نهایی مورد بررسی قرار گرفت. از ۲۴ تحقیق، ۵ تحقیق، تأثیر عملکرد مغز را بر بروز آسیب رباط متقاطع قدامی بررسی کرده بودند. نتایج این تحقیقات آینده‌نگر این بود که مغز افرادی که بعداً دچار پارگی این رباط شدند به نسبت افرادی که دچار آسیب نشدند، به‌خصوص در قسمت حسی‌حرکتی قشر مغز و مخچه متفاوت بود که باعث بروز خطا در هنگام برنامه‌ریزی حرکتی در مغز این افراد می‌شد. ۱۰ مقاله دیگر هم که برعکس تأثیر یک رباط متقاطع قدامی آسیب‌دیده قبل از بازسازی را بر عملکرد و ساختار مغز بررسی کرده بودند، به این نتیجه رسیدند که حداقل دو هفته بعد از آسیب، تغییراتی در سطح قشر حسی و قشر حرکتی مغز ایجاد می‌شود که بعد از یک سال، این تغییرات ساختاری و عملکردی به‌صورت گسترده‌ای در افراد آسیب‌دیده به نسبت افراد سالم افزایش یافت. همچنین این تحقیقات ثابت کردند که ناکارآمدی رباط و همچنین آسیب‌دیدگی گیرنده‌های مکانیکی باعث سازماندهی مجدد در سیستم عصبی مرکزی می‌شود. همچنین یکی از مهم‌ترین یافته‌ها در این قسمت این بود که در افراد آسیب‌دیده به نسبت افراد سالم، فعالیت کنترلی مناطق حرکتی‌بینایی و نیاز این افراد به بازخورد بینایی افزایش یافته است. ۷ مقاله‌ای دیگر که این تغییرات را بعد از بازسازی رباط بررسی کرده بودند به این نتیجه رسیدند نه‌تنها نوروپلاستیسیتی مغز یا تغییرات عملکردی و ساختاری حاصل از آسیب به حالت عادی برنگشت، بلکه علی‌رغم بازسازی، بعد از مدتی این تغییرات منفی افزایش نیز پیدا کرد. نتیجه دو مقاله دیگر که این تغییرات را بعد از یک دوره تمرینات توان‌بخشی رایج بررسی کرده بودند به این نتیجه رسیدند که تغییرات عملکردی و ساختاری و تحریکات کورتیکواسپینال این افراد به نسبت افراد سالم نه‌تنها پابرجا، بلکه در حال افزایش بود.

نتیجه‌گیری تحقیقات گذشته نشان داد تغییرات ایجادشده در مغز بعد از آسیب، نه‌تنها بعد از بازسازی رباط متقاطع قدامی باقی می‌ماند، بلکه حتی بعد از آن نیز افزایش می‌یابد و در انتها نتایج تحقیق حاضر نشان داد تمرینات توان‌بخشی رایج که تمرکز اصلی آن‌ها بر روی برطرف کردنِ تغییرات عملکردی و ساختاری ایجادشده در مغز نیست، نمی‌تواند این نوروپلاستیسیتی منفی ایجادشده بعد از آسیب که یکی از عوامل مهم آسیب ثانویه و عوارض بعدی است را بر طرف کند. نتیجه‌گیری نهایی مقاله این است که در تدوین تمرینات پیشگیری از آسیب رباط متقاطع قدامی و همچنین تمرینات توان‌بخشی بهتر است در کنار تمرینات رایج، از اصول جدید یادگیری حرکتی و تمرینات مرتبط با بازخورد بینایی در راستای برطرف کردن نوروپلاستیسیتی منفی ایجادشده در مغز و ایجاد نوروپلاستیسیتی مثبت برای حمایت از این رباط استفاده شود.

کلیدواژه‌ها نوروپلاستیسیتی مغز، رباط متقاطع قدامی، پیشگیری، توان‌بخشی، یادگیری حرکتی، بازگشت به فعالیت، بازخورد بینایی

تاریخ دریافت: ۲۶ خرداد ۱۴۰۰
تاریخ پذیرش: ۲۶ مهر ۱۴۰۰
تاریخ انتشار: ۱۰ تیر ۱۴۰۱

* نویسنده مسئول:
مصطفی پاینده
نشانی: رشت، دانشکده تربیت‌بدنی و علوم ورزشی، گروه آسیب‌شناسی ورزشی و حرکات اصلاحی.
تلفن: ۳۶۷۵۲۹۹ (۹۱۷) ۹۸+
رایانامه: paradise.gheshm2011@gmail.com

مقدمه

پیشگیری از آسیب رباط متقاطع قدامی[1] و همچنین توان‌بخشی بعد از بروز آسیب این رباط همچنان یکی از اولویت‌های اصلی جامعه پزشکی ورزشی محسوب می‌شود [۱]. با توجه به تأثیر مهم تنظیمات و هماهنگی‌هایی که مغز در جهت عدم بروز آسیب برعهده دارد [۲] و همچنین بروز آسیب که باعث تغییرات ساختاری و عملکردی در مغز می‌شود [۳]، به‌جز تحقیقاتی که اخیراً در حال انجام است، تحقیقات گذشته کمتر به شکل مستقیم بر روی فاکتورهای مرتبط با مغز هم در بحث پیشگیری و هم در بحث تمرینات توان‌بخشی پرداخته‌اند.

بررسی تأثیر مغز و تغییرات ساختاری و عملکردی (نوروپلاستیسیتی)[2] آن بر بروز آسیب به‌دلیل نیاز به ابزارهای پیشرفته به شکل بسیار محدود انجام شده است. از تحقیقاتی که اخیراً در این زمینه انجام شده می‌توان به یافته‌های دیکفوس و همکارانش اشاره کرد، که در یک تحقیق کنترل موردی آینده‌نگر بیان کردند افرادی که بعداً دچار آسیب رباط متقاطع قدامی نشدند به‌طور قابل توجهی ارتباط عملکردی قوی‌تری در منطقه‌ای از ناحیه حسی‌حرکتی قشر مغز و منطقه‌ای از ناحیه مخچه در مقایسه با افرادی که دچار آسیب این رباط شده‌اند داشتند [۲].

شواهد اخیر نشان می‌دهد حتی اگر کاهش عملکرد زانوی آسیب‌دیده اصلاح و از بروز آسیب ثانویه نیز پیشگیری شود، بازگشت موفقیت‌آمیز به سطح فعالیت قبل از آسیب، پس از بازسازی رباط متقاطع قدامی کمتر از آن است که در گذشته تصور می‌شد، تقریباً ۳۵ درصد از افراد مبتلا به آسیب رباط متقاطع قدامی قادر به بازگشت به سطح فعالیت قبلی خود نیستند [۴-۶]. تحقیقات نشان می‌دهد که به دنبال آسیب اولیه، بروز آسیب ثانویه و یا بروز آسیب در زانوی مقابل در ۵ سال اولیه، به‌خصوص در ورزشکاران جوان زیر ۲۵ سال به بیشتر از ۲۳ درصد می‌رسد [۷، ۸]. میزان بالای آسیب‌دیدگی مجدد و همچنین ناتوانی در بازگرداندن ظرفیت عملکردی نشان می‌دهد که استانداردهای فعلی مراقبت از رباط متقاطع قدامی، ازجمله بازسازی این رباط و توان‌بخشی آن به‌اندازه کافی به نقص‌هایی که قبل از بروز آسیب وجود داشته و یا بعد از آن گسترش پیدا کرده نپرداخته است و مهم‌تر از آن با توجه به نکات اشاره‌شده اهمیت تحقیقاتی که به کارآمدتر کردن تمرینات پیشگیری از آسیب کمک کنند را نیز دو چندان می‌کند [۹-۱۲].

استراتژی‌های توان‌بخشی فعلی در درجه اول بر روی بازگرداندن عملکرد عصبی‌عضلانی ازطریق تمرینات تقویت عضلانی و کنترل عصبی‌عضلانی متمرکز است [۱۳]. اگرچه عوامل متعددی می‌توانند در آسیب‌دیدگی اولیه و ثانویه رباط متقاطع قدامی نقش داشته باشند، اما عملکرد عصبی‌عضلانی به‌راحتی قابل‌اصلاح است. در حالی که سایر نقص‌های احتمالی مانند آناتومی استخوانی و عوامل هورمونی به‌راحتی قابل‌تغییر نیستند. به همین ترتیب اهداف توان‌بخشی متمرکز بر عملکرد عصبی‌عضلانی به‌طور سنتی شامل بازگرداندن تقارن حرکتی دوطرفه، معرفی الگوهای حرکتی ایمن‌تر، و پرهیز از موقعیت‌هایی است که تصور می‌شود رباط متقاطع قدامی بیش‌ازحد تحت فشار قرار می‌گیرد، مانند والگوس دینامیک زانو، هایپراکستنشن زانو، چرخش داخلی تیبیا و فرود سفت با حداقل خم شدن زانو و ران [۱۱، ۱۴-۱۶]. این اهداف معمولاً با تمرینات ویژه دیگر، ازجمله تمرینات دامنه حرکتی، تمرینات قدرتی، تمرینات حس عمقی، تمرینات ثبات مفصلی، تمرینات استقامتی و تمرینات مرتبط با حرکات عملکردی ترکیب می‌شود [۱۷]. به هر حال شواهد نشان می‌دهد که ورزشکاران جوان اغلب در انتقال دستاوردهای تمرینی خود و تلاش برای ایمن کردن محیط رشته ورزشی خود ناموفق هستند [۱۸، ۱۹]. تمرینات توان‌بخشی می‌توانند الگوی حرکتی اندام تحتانی قسمت آسیب‌دیده را در آزمایشگاه بهبود دهند [۲۰-۲۳]، اما این اصلاح الگوی حرکت به‌راحتی به رشته ورزشی انتقال داده نمی‌شود [۲۴]. چندین عامل ممکن است در کاهش انتقال مهارت‌های حرکتی تمرینات توان‌بخشی نقش داشته باشد که یکی از عوامل مهم، سادگی نسبی توان‌بخشی بالینی در مقابل تقاضاهای شدید یک محیط ورزشی رقابتی است. ازجمله چالش‌های عصب‌شناختی[3] مرتبط با بازیکن مقابل، توپ‌های متحرک، اهداف مدنظر و غیره. [۲۵، ۲۶].

شواهد نورومکانیکال در حال ظهور نشان می‌دهد که بیومکانیک تغییریافته پس از آسیب [۲۷] می‌تواند تا حدی باعث تغییرات برطرف‌نشده در سراسر سیستم عصبی مرکزی شود که به دنبال آسیب رباط متقاطع قدامی و همچنین حتی بعد از بازسازی آن اندام درگیر و غیردرگیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۸-۳۰]. برای مثال در افراد دارای بازسازی رباط متقاطع قدامی فعالیت مغزی مرتبط با زانوی آسیب‌دیده به شکل متفاوتی در مناطق مهم مرتبط با بینایی، توجه و انسجام حسی‌حرکتی[4] به نسبت افراد همسن آسیب‌ندیده دیده می‌شود [۳۱-۳۳] ممکن است جنبه‌های گوناگون عملکرد سیستم عصبی مرکزی ازطریق توان‌بخشی به شکل کامل بازیابی نشود. بنابراین برای مثال هرچند با استفاده از استراتژی‌های توان‌بخشی تقارن کینماتیک دوطرفه ایجاد شود، اما ممکن است اختلالات حیاتی عملکرد سیستم عصبی مرکزی نادیده گرفته شود، که خود می‌تواند زمینه‌ساز حرکات جبرانی نامحسوس در طولانی‌مدت باشد [۳۴].

1. Anterior cruciate ligament (ACL)
2. Neuroplasticity
3. Neurocognitive challenges
4. Ensorimotor integration

به‌تازگی، لپلی و همکارانش به سرنخ‌هایی پی بردند که پس از آسیب رباط متقاطع قدامی، حتی بعد از بازسازی، دستگاه قشر مغز ممکن است ارتباط بین دستورات حرکتی در مغز و زانوی آسیب‌دیده را کاهش دهد. آن‌ها در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که در نیم‌کره مرتبط با اندام بازسازی‌شده در مقایسه با نیم‌کره مرتبط با پای سالم عدم تقارن در ویژگی‌های ساختاری دستگاه کورتیکواسپینال، اختلال در ماده سفید و کاهش در تحریک‌پذیری کورتیکواسپاینال که می‌تواند در ریکاوری عملکرد حرکتی پس از عمل جراحی تأثیرگذار باشد مشاهده شد. بنابراین آها با تاکید به این نکته، اشاره کردند که این تغییراتی که در مغز ایجاد می‌شود نشان‌دهنده این است که آسیب رباط متقاطع قدامی فقط یک آسیب اسکلتی‌عضلانی نیست، و در تدوین تمرینات توان‌بخشی برای رسیدن به نتیجه مطلوب‌تر، تغییرات ایجادشده در مغز را نباید نادیده گرفت [۳۵].

فولتس و همکارانش [۳۶] در تحقیق خود اشاره کردند که ممکن است نوروپلاستیسیتی مغز چه قبل از آسیب رباط متقاطع قدامی و چه بعد از آن حلقه گمشده‌ای باشد که عدم موفقیت نسبی ما را در پیشگیری و تمرینات توان‌بخشی مربوط به آسیب این رباط روشن‌تر کند.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده و تأثیر مهم نوروپلاستیسیتی مغز در بروز آسیب و همچنین بروز آسیب که باعث تغییرات ساختاری و عملکردی در مغز می‌شود و با توجه به اینکه متأسفانه تحقیقات گذشته کمتر به شکل مستقیم بر روی فاکتورهای مرتبط با مغز پرداخته‌اند، هدف از تحقیق مروری حاضر بررسی دو مسئله بسیار مهم در این ارتباط است: تأثیر نوروپلاستیسیتی مغز در بروز آسیب رباط متقاطع قدامی و تأثیر آسیب این رباط بر عملکرد و ساختار مغز.

روش بررسی

در این مقاله مروری سعی شد مطالعات انجام‌شده درزمینه نقش عملکرد مغز در بروز آسیب غیربرخوردی رباط متقاطع قدامی و همچنین تأثیر آسیب این رباط بر تغییرات عملکردی و ساختاری مغز از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۱ جمع‌آوری شود. این مقالات از طریق جست‌جوی در وب‌سایت‌های، وب‌آوساینس، گوگل‌اسکالر، ساینس‌دایرکت، اسکوپوس، پابمد، مدلاین، پدرو، سینال، اسپورت دیسکاس و کاکرین دیتا بیس[5] انجام شد. واژگان کلیدی مورداستفاده در این جست‌وجو شامل موارد زیر و مترادف آن‌ها بود:

Brain AND Neuroplasticity AND ACL injury, Brain OR cortical AND (neuroplasticity OR activation) AND ACL (rupture OR deficiency), Corticomotor AND (neuroplasticity OR excitability) AND ACL (injury OR reconstruction), Brain function AND anterior cruciate ligament injury, Brains AND Sprains.

همچنین برای جست‌وجوی مقالات فارسی از پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی[6]، پایگاه استنادی علوم جهان اسلام[7]، پایگاه مجلات کشور[8]، پایگاه پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران[9]، بانک مقالات سلامت[10]، بانک جامع مقالات پزشکی[11] با کلیدواژه‌های، عملکرد مغز و پارگی رباط متقاطع قدامی، پارگی رباط متقاطع قدامی و نوروپلاستیسیتی مغز، بازسازی رباط متقاطع قدامی و نوروپلاستیسیتی مغز، رباط متقاطع قدامی آسیب‌دیده ناکارآمد و نورپلاستیسیتی مغز استفاده شد. همچنین از کلیدواژه‌های انگلیسی ذکرشده نیز برای پیدا کردن مقالات انگلیسی چاپ‌شده در پایگاه‌های مجلات علمی داخلی و همچنین از جست‌وجوی دستی نیز برای یافتن مقالات استفاده شد.

عنوان و چکیده هر مطالعه جداگانه توسط نویسنده ارزیابی شد. اولین مرحله در انتخاب مقالات مربوطه براساس این موضوع بود که آیا چکیده یا عنوان مقاله با موضوع تحقیق همخوانی دارد یا خیر. مرحله بعدی انتخاب مقالات مطابق با معیارهای ورود و خروج بود.

معیارهای ورود به تحقیق: مطالعاتی که به زبان انگلیسی و فارسی منتشر شده بودند؛ متن کامل مقاله در دسترس باشد؛ مطالعاتی که نقش مغز را در بروز آسیب رباط متقاطع قدامی بررسی کرده بودند؛ مطالعاتی که تأثیر رباط متقاطع قدامی بازسازی‌نشده را بر نوروپلاستیسیتی مغز ارزیابی کرده بودند؛ مطالعاتی که تأثیر رباط متقاطع قدامی بازسازی‌شده را بر نوروپلاستیستی مغز بررسی کرده بودند؛ مطالعاتی که تأثیر رباط متقاطع قدامی بازسازی‌شده بعد از یک دوره توان‌بخشی را بر نوروپلاستیستی مغز بررسی کرده بودند و مطالعات شبه‌تجربی، کارآزمایی بالینی تصادفی، مطالعات کوهورت، مطالعات مروری، مطالعات سری موردی[12]، مطالعات مقطعی، مطالعات موردی و مطالعات موردشاهدی[13].

معیارهای خروج از تحقیق: مطالعاتی که بر اساس جدول چک‌لیست اصلاح‌شده بلک و داونز (جدول شماره ۱) نمره آن‌ها از ۱۸ (نسبتاً خوب) کمتر بود و مطالعاتی که متغیرهای تحقیق حاضر را بر روی افراد دارای آسیب چندگانه (برای مثال آسیب رباط متقاطع قدامی همراه با آسیب منیسک وغیره) در زانو بررسی کرده بودند.

5. Cochrane database of systematic reviews

6. SID
7. ISC
8. MAGIRAN
9. IRANDOC
10. IRAN MEDEX
11. MEDLIB
12. Case-series studies
13. Case-control studies

یافته‌ها

پس از غربالگری براساس عنوان، چکیده مقاله و موارد تکراری، مقالاتی که با معیارها تحقیق همخوانی نداشتند، حذف شدند. درنهایت ۲۴ مقاله انتخاب و بررسی و کنکاش آن‌ها براساس ۲ زیرموضوع اصلی انجام شد.

۱. مقالاتی که عملکرد مغز را بر بروز آسیب رباط متقاطع قدامی بررسی کرده بودند.

۲. مقالاتی که تأثیر آسیب این رباط را بر عملکرد و ساختار مغز کنکاش کرده بودند. این نوع مقالات ۳ گروه را شامل می‌شدند: الف) گروه دارای رباط متقاطع قدامی بازسازی‌نشده؛ ب) گروه دارای رباط متقاطع قدامی بازسازی‌شده؛ ج) گروه دارای رباط متقاطع قدامی بازسازی‌شده بعد از یک دوره توان‌بخشی.

مراحل انتخاب مقالات در تصویر شماره ۱ آمده است.

عملکرد مغز و بروز آسیب رباط متقاطع قدامی

از مجموع ۲۴ مقاله، با توجه به جدول شماره ۲، ۵ مقاله تأثیر عملکرد مغز را، بر بروز آسیب رباط متقاطع قدامی بررسی کرده بودند [۲، ۳، ۳۴، ۴۶، ۵۲]. از این تعداد مقالات، براساس ۲ مقاله آینده‌نگر از دیکفوس و همکاران [۲، ۳] که جمعاً ۱۱۹ نفر نوجوان دختر و پسر را به‌صورت جداگانه بررسی کرده بود، این نتیجه حاصل شد که ارتباط عملکردی مغز افرادی که بعداً دچار پارگی رباط متقاطع قدامی شدند با افرادی که دچار آسیب این رباط نشدند در قسمت‌هایی، ازجمله ناحیه حسی‌حرکتی قشر مغز و مخچه متفاوت بود. سوانیک و همکاران [۵۲] نیز در مقاله خود خطاهای رخداده در هنگام برنامه‌ریزی حرکتی توسط مغز را عامل اصلی بروز آسیب رباط متقاطع قدامی می‌دانند. آن‌ها در تحقیق خود اشاره کردند خطاهای ذهنی کوچک در قضاوت و هماهنگی به هنگام برنامه‌ریزی حرکتی، انقباضات عضلانی از پیش برنامه‌ریزی‌شده را جهت ایجاد استیفنس برای میسر کردن محدودیت دینامیک ناکافی و ناکارآمد می‌کند. در انتها تاکید می‌کنند، بسیار مهم است که ویژگی‌های مختلف عصب روان‌شناختی در برنامه‌های پیشگیری از آسیب و توان‌بخشی مدنظر قرار داده شود.

یافته‌های پاورس و فیشر [۴۶] نیز تأکید بر این نکته داشت که تمرینات اکتساب مهارت که به نسبت تمرینات قدرتی تأثیر بهتر و درازمدت‌تری را بر روی مغز می‌گذارد در پیشگیری از آسیب رباط متقاطع قدامی مثمرثمرتر بوده است و در انتها با توجه به تحقیقاتی که اهمیت نقش مغز در بروز آسیب را بسیار مهم تلقی می‌کنند، دیکفوس و همکاران [۳۴] این سؤال بسیار مهم را برای موضوع تحقیق خود طرح کردند که آیا می‌توان از ظرفیت نوروپلاستیسیتی سیستم عصبی مرکزی در جوانان، برای به‌اصطلاح مایه‌کوبی و پیشگیری از آسیب رباط متقاطع قدامی استفاده کرد؟ برای پاسخ به این سؤال آن‌ها برنامه‌های تمرینی‌ای را بررسی کردند که براساس استراتژی بهینه‌سازی عملکرد از طریق انگیزه ذاتی و توجه برای یادگیری[14] در راستای پیشگیری از آسیب‌های ورزشی[15] طراحی شده بودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که انجام این تمرینات با تمرکز بر روی این استراتژی، نوروپلاستیسیتی مثبتی را در مغز ایجاد کرده که باعث ایجاد سازگاری بیومکانیکی مطلوبی جهت پیشگیری از آسیب، هم در مردان و هم در زنان جوان شده است [۳۴].

تأثیر آسیب رباط متقاطع قدامی بر عملکرد و ساختار مغز

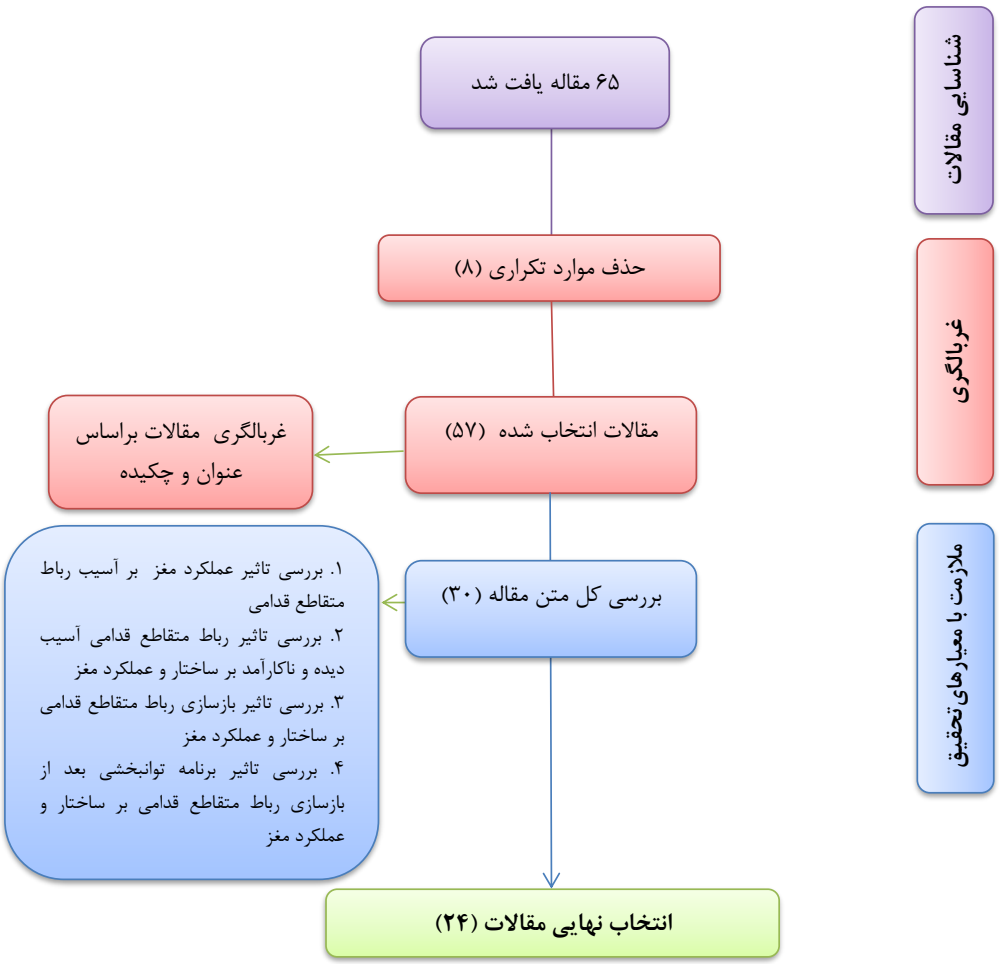
از ۲۴ مقاله نهایی‌شده، با توجه به جدول شماره ۳، ۱۹ مقاله، تأثیر آسیب رباط متقاطع قدامی بر عملکرد و ساختار مغز را بررسی کرده بودند. از این تعداد، ۱۰ مقاله قبل از بازسازی [۵۵-۲۴، ۴۴، ۷۴-۹۴، ۲۵، ۳۵]، ۶ مقاله بعد از بازسازی [۱۴، ۳۴، ۱۳، ۳۳، ۵۳، ۹۳]، ۲ مقاله بعد از بازسازی و تمرینات توان‌بخشی [۴۰، ۵۶]، ۱ مقاله هم قبل و هم بعد از بازسازی [۵۰]، تأثیر آسیب رباط متقاطع قدامی بر عملکرد و ساختار مغز را بررسی کرده بودند.

تأثیر رباط متقاطع قدامی بازسازی نشده بر عملکرد و ساختار مغز

کاکاوس و همکاران [۵۴] و همچنین نتو و همکاران [۵۵] گزارش کردند که حداقل ۲ هفته بعد از آسیب رباط متقاطع قدامی تغییراتی را در سطح قشر حسی و قشر حرکتی مغز مشاهده کردند که بعد از یک سال این تغییرات ساختاری و عملکردی به‌صورت گسترده‌ای در افراد آسیب‌دیده به نسبت افراد سالم افزایش یافته بود. کاپریلی و همکاران [۴۷] در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که یک رباط آسیب‌دیده ناکارآمد باعث سازماندهی مجدد در سیستم عصبی مرکزی می‌شود و نتیجه تحقیق والریانی و همکارانش [۵۲] نیز این بود که به دلیل آسیب‌دیدگی گیرنده‌های مکانیکی، مسیرهای سوماتوسنسوری مرکزی از نظر عملکردی در افراد آسیب‌دیده دچار تغییر می‌شود و در همین راستا نتایج تحقیق یانگ وو و همکارانش [۵۳] نیز نشان داد که یکی از مهم‌ترین دلایل بی‌ثباتی مداوم عملکردی در زانوی آسیب‌دیده، تغییر فرایند پردازش در سیستم عصبی مرکزی و نوروپلاستیستی مغز است.

یکی دیگر از مهم‌ترین یافته‌های تحقیقات در این قسمت تغییر فعالیت مناطق حرکتی‌بصری در افراد آسیب‌دیده به نسبت افراد سالم بود. گرومس و همکارانش در یک مطالعه آینده‌نگر اشاره کردند [۸] که در افراد آسیب‌دیده به نسبت افراد سالم فعالیت کنترلی مناطق حرکتی‌بینایی افزایش می‌یابد. آن‌ها به این نتیجه

14. Optimizing Performance Through Intrinsic Motivation and Attention for Learning (OPTIMAL)
15. Prevention Rehabilitation Exercise Play (PREP)



توانبخشی

تصویر ۱. مراحل انتخاب مقالات

مهم نیز رسیدند که این الگو در زانوی سالم که بعداً دچار آسیب شد نیز مشاهده شد. همچنین سوآنیک و همکارانش [۴۸] نیز به این نتیجه رسیدند که افراد آسیب‌دیده از نظر بصری به نسبت افراد سالم عملکرد ضعیف‌تری داشتند. گرومس و همکارانش [۴۴] نیز در تحقیق دیگر خود این یافته را گزارش کردند که در مغز افراد دارای پارگی رباط متقاطع قدامی، تغییراتی ایجاد می‌شود که فرد آسیب‌دیده به بازخورد دیداری برای کنترل زانو بیشتر از قبل نیاز خواهد داشت.

نتیجه تحقیق هیروکس و ترمبلی [۴۹] این بود که در پاسخ به اختلال یک‌طرفه زانو که حاصل از پارگی رباط متقاطع قدامی است، در طولانی‌مدت سازگاری در سیستم قشر مغز ایجاد می‌شود که استراتژی‌های حرکتی، از حالت نیمه‌خودکار به حالت ارادی‌تر سوق داده می‌شود. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که این افراد به هنگام انجام فعالیت‌های روزمره به نسبت افراد سالم به شکل ارادی‌تر حرکات زانوی خود را انجام می‌دهند.

تأثیر بازسازی رباط متقاطع قدامی بر عملکرد و ساختار مغز

از ۶ تحقیق مربوط به این قسمت ۲ تحقیق زارزسکی و همکاران [۴۱] و پیتروسیمون و همکاران [۴۳] نوروپلاستیسیتی مغز را در قسمت مرتبط با عضله پهن داخلی گزارش کردند. زارزسکی و همکاران نشان دادند تحریک‌پذیری در قسمت کورتیکواسپینال مرتبط با عضله پهن داخلی در هر دو پا، ۲ هفته بعد از بازسازی رباط متقاطع قدامی به نسبت ورزشکاران سالم دچار تغییر می‌شود. پیتروسیمون و همکاران نیز به این نتیجه رسیدند که آستانه تحریک فعالیت عضلات، به‌خصوص عضله پهن داخلی به دلیل کاهش فعالیت قشر حسی‌حرکتی در پای بازسازی‌شده افزایش یافته است.

۲ تحقیق کریس و همکاران [۳۹] و گرومس و همکاران [۳۳] نیز تغییرات مرتبط با بینایی را بعد از بازسازی رباط متقاطع قدامی نسبت به افراد سالم گزارش کردند. کریس و همکاران در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند در افراد دارای رباط بازسازی‌شده، بعد از ۴۳ ماه به نسبت افراد سالم افزایش فعالیت در مناطقی از مغز مشاهده شد که مسئول شناخت، جهت‌گیری و توجه

دیداری‌فضایی برای کنترل حرکت ران و زانو بودند.

گرومس و همکارانش نیز افرادی که به‌طور میانگین ۳۸ ماه از عمل بازسازی رباط متقاطع قدامی آن‌ها گذشته بود را مطالعه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فعال‌سازی مغز این افراد در هنگام حرکات فلکشن و اکستنش به نسبت افراد سالم دچار تغییر شده است. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از این بود که فعال‌سازی مغز این افراد در هنگام حرکت زانو، از استراتژی حسی‌حرکتی به سمت استراتژی حرکتی‌بینایی سوق پیدا کرده است [۳۳].

نتیجه تحقیق باومایستر و همکاران [۴۵] نیز این بود که بعد از عمل بازسازی رباط متقاطع قدامی اطلاعات آوران حسی به دلیل کاهش حس عمقی محیطی تغییر یافته و این اطلاعات، با اطلاعات موردانتظار در حافظه طولانی‌مدت در مغز مطابقت نداشته و این باعث تغییرات قشر مغز در رابطه با فرایندهای حافظه می‌شود.

لپلی و همکاران [۳۵] نیز در نیم‌کره مرتبط با اندام بازسازی‌شده در مقایسه با نیم‌کره مرتبط با پای سالم در ویژگی‌های ساختاری و همچنین تحریک‌پذیری، کورتیکواسپاینال و ماده سفید عدم تقارن مشاهده کردند.

والریانی و همکارانش [۵۰] که ۷ نفر را قبل و بعد از بازسازی رباط متقاطع قدامی بررسی کرده بودند به این نتیجه رسیدند که قبل از عمل جراحی حس وضعیت مفصلی و بعضی از فاکتورهای قشر مغز در سمت آسیب‌دیده تمام افراد کاهش پیدا کرده است. بعد از آرتروسکوپی و بازسازی زانو تا ۲ سال بعد، نه حس عمقی زانو و نه هدایت گری سوماتوسنسوری مرکزی بهبود پیدا کرد. نتیجه‌گیری نهایی این تحقیق این بود که از دست رفتن گیرنده‌های مکانیکی زانو با تغییراتی در سیستم عصبی مرکزی همراه است که با سایر ساختارهای عصبی جبران نمی‌شود.

تأثیر بازسازی رباط متقاطع قدامی و یک دوره تمرینات توان‌بخشی بر عملکرد و ساختار مغز

تنها تحقیقی که در این زمینه یافت شد، تحقیق کوهورت آینده‌نگر زارزسکی و همکاران در سال ۲۰۲۰ بود [۴۰]. آن‌ها از یک پروتکل تمرینی ۱۲ هفته‌ای [۵۷] استفاده کردند. زارزسکی و همکاران تغییرات مغزی را قبل از دوره توان‌بخشی یعنی ۲ هفته بعد از عمل و همچنین بعد از یک دوره توان‌بخشی ۱۲ هفته‌ای ارزیابی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد ۲ هفته بعد از عمل و قبل از شروع تمرینات توان‌بخشی در مقایسه با ورزشکاران سالم، گروهی که رباط متقاطع قدامی خود را بازسازی کرده بودند دچار تغییر در تحریک کورتیکواسپینال شده بودند. همچنین داده‌های آن‌ها نشان داد بعد از ۱۲ هفته تمرینات توان‌بخشی نیز تغییر در تحریکات کورتیکواسپینال این افراد به نسبت افراد سالم، نه‌تنها پا برجا، بلکه در حال افزایش بود. همچنین یافته‌های این تحقیق نشان داد تغییر در تحریک کورتیکواسپینال مرتبط با پای سالم افراد دارای رباط متقاطع قدامی بازسازی‌شده باعث افزایش آستانه حرکت در زمان استراحت در این پا به نسبت افراد سالم شده است [۴۰].

البته کوکلر و همکاران [۵۶] در سال ۲۰۱۹ در یک مقاله مروری برای بهینه‌تر شدن تمرینات توان‌بخشی و کاهش بروز آسیب ثانویه رباط متقاطع قدامی، تمرینات بالینی یکپارچه با استفاده از اصول جدید یادگیری حرکتی در راستای حمایت از نوروپلاستیستی مغز را پیشنهاد دادند که ممکن است بتواند در راستای بهبود آسیب کمک‌کننده باشد و خطر آسیب ثانویه رباط متقاطع قدامی را کاهش دهد. نویسندگان این مقاله استفاده از مفاهیم کلیدی زیر را برای تقویت برنامه توان‌بخشی و آماده‌سازی بیمار برای بازگشت مجدد به ورزش پس از آسیب رباط متقاطع قدامی ارائه دادند : ۱. انجام تمرینات با استفاده از توجه و تمرکز خارجی[16]؛ ۲. انجام تمرینات با استفاده از اصول یادگیری ضمنی[17]؛ ۳. انجام تمرینات با استفاده از اصول یادگیری افتراقی[18]؛ ۴. انجام تمرینات با استفاده از اصول یادگیری خودکنترل‌شده و تداخل زمینه‌ای[19]. اصول جدید یادگیری حرکتی ارائه‌شده در این نسخه ممکن است آینده برنامه‌های توان‌بخشی را بهینه و خطر آسیب ثانویه رباط متقاطع قدامی را کاهش دهد و همچنین با هدف قرار دادن تغییرات نوروپلاستیستی مغز باعث کاهش پیشرفت اولیه آرتروز در این افراد شود.

در این بررسی، کیفیت مقالات نیز با جدول چک‌لیست اصلاح‌شده بلک و داونز امتیازدهی شد [۳۷] که در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. درواقع این چک‌لیست برای ارزیابی روش‌شناسی مقالات تصادفی و غیرتصادفی تنظیم شده است. در این چک‌لیست ۲۷ سؤال وجود دارد. بخش اول گزارش دهی[20] شامل ۱۰ سؤال، بخش دوم اعتبار بیرونی[21] شامل ۳ سؤال، بخش سوم اعتبار داخلی[22] (که خود به ۲ قسمت سوگیری[23] و مداخله‌گر[24] تقسیم می‌شود) شامل ۱۴ سؤال است. برای مثال در قسمت گزارش‌دهی پرسیده شده است که آیا فرضیه‌ها، اهداف تحقیق و یا مداخلات مدنظر به‌روشنی توضیح داده شده است؟ براساس این چک‌لیست مقالات در ۴ سطح قرار می‌گیرند. اگرنمره مقاله‌ای بین ۲۴ تا ۲۸ بود در سطح عالی، ۱۹ تا ۲۳ در سطح خوب، ۱۴ تا ۱۸ در سطح نسبتاً خوب و کمتر مساوی ۱۳ در سطح ضعیف قرار می‌گرفت [۳۸].

16. External focus of attention
17. Implicit learning
18. Diferential learning
19. Self-controlled learning and contextual interference
20. Reporting
21. External validity
22. Internal validity
23. Bias
24. Selectionbias

جدول ۱. امتیازدهی مقالات براساس جدول چک‌لیست اصلاح‌شده بلک و داونز

مقاله	گزارش‌دهی (از ۱۰ امتیاز)	اعتبار بیرونی (از ۳ امتیاز)	اعتبار داخلی		مجموع (۲۷ امتیاز)
			سوگیری (از ۷ امتیاز)	مداخله‌گر (از ۷ امتیاز)	
کریس و همکاران (۲۰۲۰) [۳۹]	۸	۳	۶	۵	۲۲
زارزسکی و همکاران (۲۰۲۰) [۴۰]	۹	۳	۶	۶	۲۴
لپلی و همکاران (۲۰۲۰) [۳۵]	۹	۲	۶	۶	۲۳
دیکفوس و همکاران (۲۰۲۰) [۳۴]	۸	۲	۶	۷	۲۳
دیکفوس و همکاران (۲۰۱۹) [۲]	۹	۲	۶	۶	۲۳
زارزسکی و همکاران (۲۰۱۸) [۴۱]	۷	۳	۷	۶	۲۳
گرومس و همکاران (۲۰۱۷) [۳۳]	۸	۳	۶	۶	۲۳
شین میائو و همکاران(۲۰۱۷) [۴۲]	۷	۲	۶	۶	۲۱
پیتروسیمون و همکاران (۲۰۱۵) [۴۳]	۸	۲	۶	۶	۲۲
گرومس و همکاران (۲۰۱۵) [۴۴]	۸	۲	۵	۵	۲۰
باومایستر و همکاران (۲۰۱۱) [۴۵]	۷	۲	۵	۵	۱۹
پاورس و فیشر (۲۰۱۰) [۴۶]	۷	۲	۵	۵	۱۹
کاپریلی و همکاران (۲۰۰۹) [۴۷]	۸	۲	۵	۵	۲۰
سوآنیک و همکاران (۲۰۰۷) [۴۸]	۹	۲	۶	۶	۲۳
هیروکس و ترمبلی (۲۰۰۶) [۴۹]	۷	۲	۵	۵	۱۹
والریانی و همکاران (۱۹۹۹) [۵۰]	۷	۲	۵	۵	۱۹
والریانی و همکاران (۱۹۹۶) [۵۱]	۸	۲	۴	۵	۱۹

توانبخشی

بحث

در آسیب رباط متقاطع قدامی حداقل ۲ عامل مهم وجود دارد تا ما را به‌سمت بررسی نقش مغز در پیشگیری، بروز و توان‌بخشی آسیب این رباط سوق دهد. ابتدا ناکام ماندن مغز در راستای شناخت دقیق هرگونه خطای هماهنگی رخ داده و دوم سرعت بالای پاره شدن رباط متقاطع قدامی قبل از هرگونه مداخله عضلانی برای حمایت است. مطالعات نشان داده‌اند، ۴۰ تا ۷۰ میلی‌ثانیه برای پاره شدن رباط متقاطع قدامی کافی است [۵۸]. این در حالی است که شروع پاسخ رفلکسی و همچنین شناخت دقیق هرگونه خطای هماهنگی رخ داده و در ادامه ایجاد تنش عضلانی جهت ایجاد استیفنس می‌تواند تا ۵۰۰ میلی‌ثانیه طول بکشد [۶۱-۵۹]. بنابراین برای بالا رفتن سرعت و نیروی حرکت مرتبط با ورزشکار نیاز به توسعه برنامه‌ریزی شناختی توسط مغز ازطریق کنترل حرکت به وسیله نقش فیدفروواردی یا پیش‌بینانه است. در غیر این صورت نه‌تنها اتکای بیش‌ازحد به قدرت عضلات برای ایجاد ثبات پویا ناکافی است، بلکه حتی اتکای بیش‌ازحد به استراتژی‌های رفلکسی نیز ممکن است برای حمایت از رباط متقاطع قدامی کافی نباشد [۶۲]. با توجه به این موضوع و اهمیت نقش مغز در پیشگیری از آسیب، مطالعات بسیار اندکی در این زمینه صورت گرفته است. با توجه به جدول شماره ۱، ۲ مطالعه آینده‌نگر دیکفوس و همکاران نشان داد ارتباط عملکردی مغز افرادی که بعداً دچار پارگی رباط متقاطع قدامی شدند با افرادی که دچار آسیب نشدند در قسمت‌هایی، ازجمله ناحیه حسی‌حرکتی قشر مغز و مخچه متفاوت بود [۲، ۳]. سوانیک و همکاران نیز به این نتیجه رسیدند خطاهای ذهنی کوچک در قضاوت و هماهنگی به هنگام برنامه‌ریزی حرکتی، انقباضات عضلانی از پیش برنامه‌ریزی‌شده را جهت ایجاد استیفنس برای میسر ساختن محدودیت دینامیک ناکافی و ناکارآمد می‌کند. آن‌ها تأکید می‌کنند، بسیار مهم است که ویژگی‌های مختلف عصب‌روان‌شناختی در برنامه‌های پیشگیری از آسیب و توان‌بخشی مدنظر قرار داده شود [۵۲]. بر همین اساس تنها ۲ تحقیق یافت شد که با توجه به اهمیت نقش مغز در بروز آسیب از اصول مرتبط با یادگیری حرکتی، در راستای تأثیرگذاری مستقیم‌تر بر مغز

جدول ۲. مقالات مرتبط با تأثیر عملکرد مغز بر آسیب رباط متقاطع قدامی

نویسنده	عنوان مقاله	حجم نمونه	دامنه سنی	نتایج اصلی
دیکفوس و همکاران (۲۰۲۰) [۳۴]	آیا می‌توان از ظرفیت نوروپلاستیستی سیستم عصبی مرکزی در جوانان برای به‌اصطلاح مایه‌کوبی و پیشگیری از آسیب رباط متقاطع قدامی استفاده کرد؟ مقاله مروری	–	–	نتایج تحقیق بیانگر این موضوع بود که انجام تمرینات با استراتژی بهینه‌سازی عملکرد از طریق انگیزه ذاتی و توجه برای یادگیری در راستای پیشگیری از آسیب‌های ورزشی که برپایه و اساس تئوری یادگیری حرکتی تنظیم می‌شوند، هم در مردان و هم در زنان جوان باعث افزایش نوروپلاستیسیتی در مغز می‌شود و افراد را قادر می‌سازد که مکانیک‌های حرکتی خود را به شکل قابل‌قبولی ارتقا و پیشرفت دهند. نویسندگان مقاله بیان کردند که سازگاری‌های مغزی مثبتی که ما در پاسخ به استراتژی‌های بهینه‌سازی عملکرد از طریق انگیزه ذاتی و توجه برای یادگیری در راستای پیشگیری از آسیب‌های ورزشی پیش‌بینی می‌کنیم به گونه‌ای طراحی شده‌اند که برای انواع مختلف جمعیت در طول سال‌های رشد تکوینی و همچنین برای کسانی که دارای اختلالات حرکتی و یا بدون آن هستند قابل‌استفاده است.
دیکفوس و همکاران (۲۰۱۹) [۲]	آیا عملکرد ارتباطی مغز به آسیب‌های اسکلتی‌عضلانی کمک می‌کند؟ یک تحلیل آینده‌نگر درمورد خطر آسیب رباط متقاطع قدامی	۵۷ دختر	۱۶	این تحقیق که یک تحقیق کنترل موردی آینده‌نگر بود نشان داد افرادی که بعداً دچار آسیب رباط متقاطع قدامی نشدند به‌طور قابل‌توجهی ارتباط عملکردی قوی‌تری در منطقه‌ای از ناحیه حسی‌حرکتی قشر مغز و منطقه‌ای از ناحیه مخچه در مقایسه با افرادی که دچار آسیب این رباط شده‌اند داشتند.
دیکفوس و همکاران (۲۰۱۹) [۳]	تغییرات در عملکرد ارتباطی مغز در قسمت مرتبط با حسی‌حرکتی زانو و نقش آن در کمک به بروز آسیب رباط متقاطع قدامی در فوتبالیست‌های دبیرستانی (یک مطالعه آینده‌نگر)	۶۲ پسر	۱۶-۳۳	نتایج این تحقیق اختلال بالقوه حسی‌حرکتی را در افرادی که بعداً دچار پارگی رباط متقاطع قدامی شدند نشان داد.
سوانیک (۲۰۱۵) [۵۲]	مغز و اسپرین: نقش مغز در آسیب غیربرخوردی رباط متقاطع قدامی: مقاله مروری کوتاه	–	–	نتایج این تحقیق نشان داد خطاهای ذهنی کوچک در قضاوت و هماهنگی به هنگام برنامه‌ریزی حرکتی (نابهنگام) در طی ورزش به شروع سریع و زودرس نیروهای بزرگ مفصلی منجر می‌شود. اگر این بارها به طور کامل پیش‌بینی نشود، انقباضات عضلانی از پیش برنامه‌ریزی‌شده ممکن است جهت ایجاد استیفنس برای میسر ساختن محدودیت دینامیک صرف‌نظر از جنسیت، ناکافی یا ناکارآمد باشد. این توالی رویدادها می‌تواند رفتار جبران کردن بار وارده توسط عضلات را محدود کند. بنابراین کپسول لیگامنی در معرض شکست و پارگی قرار می‌گیرد. این بسیار مهم است که ویژگی‌های مختلف عصب‌روان‌شناختی در ظهور آسیب، در راستای کارایی بهتر استراتژی‌های پیشگیری و توان‌بخشی بررسی شود.
پاورس و فیشر (۲۰۱۰) [۴۶]	مکانیسم‌های اساسی ایجادشده در تمرینات پیشگیری از آسیب رباط متقاطع قدامی: بررسی رفتار مغز (یک مطالعه آزمایشی) در این مطالعه آزمایشی برای ۲ نفر ۲۰ جلسه (به مدت ۱۰ هفته) تمرینات قدرتی تجویز شد و برای ۲ نفر دیگر همین مدت‌زمان تمرینات مرتبط با اکتساب مهارت که در آن به افراد مکانیک‌های یک فرود مناسب آموزش داده شد، تجویز شد.	۴ زن	گزارش نشده	نتایج بدین‌گونه بود: ۱. استراتژی‌های ایجادشده در راستای حمایت از رباط متقاطع قدامی در هنگام فرود در گروه تمرینات اکتساب مهارت بهتر از گروه تمرینات قدرتی بود. ۲. این تأثیر اشاره‌شده در گروه اکتساب مهارت بعد از ۶ ماه برخلاف گروه دیگر هنوز حفظ شده بود که نشان‌دهنده یادگیری حرکتی رخ داده است. ۳. افزایش استفاده از بازکننده‌های ران بلافاصله و ۶ ماه بعد از دوره تمرینی در گروه اکتساب مهارت همراه بود با کاهش تحریک عضله سرینی بزرگ در قشر حرکتی مغز. نتیجه‌گیری نهایی: تمرینات اکتساب مهارت توانسته نوروپلاستیستی یا تغییرات نیمه‌دائمی را در مغز (مانند تقویت طولانی مدت اثر سیناپسی) ایجاد کند که در طی آن تحریک‌پذیری کورتیکو موتور و قشر حرکتی در حین انجام وظایف وضعیتی کاهش یافته است. این احتمال وجود دارد که این کاهش تحریک‌پذیری نشان‌دهنده تخصیص یک مسیر مجدد کنترل به‌سمت مناطق حرکتی زیر قشر مغز باشد که در انتها باعث ایجاد تغییرات طولانی‌مدت در رفتار حرکتی فرد می‌شود که به عنوان حمایت پیشگیرانه از آسیب رباط متقاطع قدامی تلقی می‌شود.

توانبخشی

استفاده کرده بودند. دیکفوس و همکارانش [۳۴] به دنبال استفاده از ظرفیت نوروپلاستیستی سیستم عصبی مرکزی، در تحقیق خود این سؤال را مطرح کردند که آیا می‌توان با تمریناتی خاص، نوروپلاستیستی را در مغز ایجاد کرد که باعث بهبود عملکرد مغز و در انتها باعث کاهش پیشگیری از آسیب شود؟ نتایج تحقیق بیانگر این موضوع بود که این نوع تمرینات که بر پایه و اساس تئوری یادگیری حرکتی تنظیم می‌شوند هم در مردان و هم در زنان جوان باعث افزایش نوروپلاستیسیتی در مغز شده، که افراد را قادر ساخته است مکانیک‌های حرکتی خود را به شکل قابل‌قبولی ارتقا و پیشرفت دهند و در انتها بیان می‌شود سازگاری‌های مغزی مثبتی که ما در پاسخ به استراتژی‌های بهینه‌سازی عملکرد از طریق انگیزه ذاتی و توجه برای یادگیری در راستای پیشگیری از آسیب‌های ورزشی پیش‌بینی می‌کنیم به گونه‌ای طراحی شده‌اند که برای انواع مختلف جمعیت در طول سال‌های رشد تکوینی و همچنین برای کسانی که دارای اختلالات حرکتی و یا بدون آن هستند قابل‌استفاده است. در تحقیق دیگر در این زمینه پاورس و فیشر [۴۶] در یک مطالعه آزمایشی برای یک گروه، ۲۰ جلسه (به مدت ۱۰ هفته) تمرینات قدرتی و برای گروه دیگر همین مدت‌زمان تمرینات مرتبط با اکتساب مهارت که در آن به افراد، مکانیک‌های یک فرود مناسب آموزش داده می‌شد را تجویز کردند. نتایج این تحقیق نشان داد تمرینات اکتساب مهارت می‌تواند نوروپلاستیستی یا تغییرات نیمه دائمی را در مغز (مانند تقویت طولانی‌مدت اثر سیناپسی) ایجاد کند که در طی آن تحریک‌پذیری کورتیکوموتور و قشر حرکتی در حین انجام

جدول ۳. مقالات مرتبط با تأثیر آسیب رباط متقاطع قدامی بر عملکرد و ساختار مغز

نویسنده	عنوان مقاله	حجم نمونه	میانگین سنی	زمان ارزیابی	نتایج اصلی
کاکاوس و همکاران (۲۰۲۰) [۵۴]	نوروپلاستیستی و آسیب رباط متقاطع قدامی مقاله مروری	–	–	–	تغییرات نوروفیزیولوژیکال بسیار گسترده‌ای (آبشاری) بعد از پارگی رباط متقاطع قدامی در سطح قشری و زیرقشری مغز اتفاق می‌افتد، به همین خاطر ضرورت دارد که تمرینات توان‌بخشی این بیماران شامل چالش‌های حسی باشد که وابستگی بیمار را به اطلاعات بصری کاهش می‌دهد و با پیروی از اصول یادگیری حرکتی باعث افزایش فرایند نوروپلاستیسیتی در مغز شده و در این حالت انتقال این یادگیری به فعالیت اصلی تسهیل یابد و در انتها باعث عملکرد بهینه در بیمار شود.
کریس و همکاران (۲۰۲۰) [۳۹]	بررسی فعالیت عصبی برای کنترل مفصل ران و زانو در مبتلایان به بازسازی رباط متقاطع قدامی: یک تحلیل مبتنی بر یک وظیفه حرکتی	۷ مرد و ۸ زن	۲۰ سال	۴۴/۳۳±۱۳۳/۱۴ ماه بعد از عمل جراحی	افراد دارای بازسازی رباط متقاطع قدامی به نسبت افراد سالم نیازمند افزایش فعالیت در مناطقی از مغز بودند که مسئول شناخت، جهت‌گیری و توجه دیداری‌فضایی برای کنترل حرکتی ران و زانو بود.
زارزسکی و همکاران (۲۰۲۰) [۴۰]	بررسی تحریک‌پذیری قشری نخاعی (کورتیکوسپینال) و بازتاب‌های نخاعی در طول دوره توان‌بخشی پس از بازسازی رباط متقاطع قدامی یک مطالعه کوهورت آینده‌نگر	۱۸ نفر دارای رباط بازسازی‌شده و ۱۸ نفر سالم	۲۱ سال	۲ هفته بعد از عمل جراحی و ۱۲ هفته بعد از تمرینات توان‌بخشی	نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد ۲ هفته بعد از عمل و قبل از شروع تمرینات توان‌بخشی در مقایسه با ورزشکاران سالم، گروهی که رباط متقاطع قدامی خود را بازسازی کرده بودند دچار تغییر در تحریک کورتیکواسپینال شده بودند. همچنین داده‌های آن‌ها نشان داد بعد از ۱۲ هفته تمرینات توان‌بخشی نیز تغییر در تحریکات کورتیکواسپینال این افراد به نسبت افراد سالم نه‌تنها پابرجا، بلکه در حال افزایش بود. همچنین یافته‌های این تحقیق نشان داد تغییر در تحریک کورتیکواسپینال مرتبط با پای سالم افراد دارای رباط متقاطع قدامی بازسازی‌شده باعث افزایش آستانه حرکت در زمان استراحت در این پا به نسبت افراد سالم شده است.
لپلی و همکاران (۲۰۲۰) [۳۵]	بررسی ساختار دستگاه قشری نخاعی (کورتیکوسپینال) و تحریک‌پذیری آن در افراد با بازسازی رباط متقاطع قدامی: یک مطالعه مقطعی	۱۰ نفر دارای رباط بازسازی‌شده (۷۰ ماه بعد از بازسازی)	۲۲ سال	۷۰±۲۳/۶ ماه بعد از عمل جراحی	در نیم‌کره مرتبط با اندام بازسازی‌شده در مقایسه با نیم‌کره مرتبط با پای سالم عدم تقارن در ویژگی‌های ساختاری دستگاه کورتیکواسپینال، اختلال در ماده سفید و کاهش در تحریک‌پذیری کورتیکواسپاینال که می‌تواند در ریکاوری عملکرد حرکتی پس از عمل جراحی تأثیرگذار باشد مشاهده شد.
نتو و همکاران (۲۰۱۹) [۵۵]	انعطاف‌پذیری عملکردی مغز مرتبط با آسیب رباط متقاطع قدامی مقاله مروری متا آنالایز	–	–	–	نتایج این تحقیق نشان داد، یک سال بعد از بروز آسیب رباط متقاطع قدامی (در هر دو گروه رباط بازسازی‌شده و گروه دارای آسیب) هم در قسمت قشر حسی (افزایش فعالیت در قسمت سوماتوسنسوری ثانویه) و هم در قسمت قشر حرکتی (کاهش تحریک‌پذیری در این قسمت) انعطاف‌پذیری عملکردی ایجاد شده است.
کوکلر و همکاران (۲۰۱۹) [۵۶]	استفاده از اصول یادگیری حرکتی در تمرینات توان‌بخشی در راستای حمایت از نوروپلاستیسیتی پس از آسیب رباط متقاطع قدامی: پیامدهای بهینه‌سازی عملکرد در جهت کاهش خطر بروز آسیب ثانویه رباط متقاطع قدامی مقاله مروری	–	–	–	هدف این مقاله ارائه تمرینات بالینی یکپارچه با استفاده از اصول جدید یادگیری حرکتی در راستای حمایت از نوروپلاستیستی است که بعد از پارگی رباط متقاطع قدامی در مغز ایجاد می‌شود و می‌تواند در راستای بهبود آسیب کمک‌کننده باشد و خطر آسیب ثانویه رباط متقاطع قدامی را کاهش دهد. نویسندگان این مقاله استفاده از مفاهیم کلیدی زیر را برای تقویت برنامه توانبخشی و آماده‌سازی بیمار برای بازگشت مجدد به ورزش پس از آسیب رباط متقاطع قدامی، ارائه می‌دهند: ۱. انجام تمرینات با استفاده از توجه و تمرکز خارجی؛ ۲. انجام تمرینات با استفاده از اصول یادگیری ضمنی؛ ۳. انجام تمرینات با استفاده از اصول یادگیری افتراقی؛ ۴. انجام تمرینات با استفاده از اصول یادگیری خودکنترل‌شده و تداخل زمینه‌ای. اصول جدید یادگیری حرکتی ارائه‌شده در این نسخه ممکن است آینده برنامه‌های توان‌بخشی را بهینه و خطر آسیب ثانویه رباط متقاطع قدامی را کاهش داده و همچنین با هدف قرار دادن تغییرات نوروپلاستیستی مغز باعث کاهش پیشرفت اولیه آرتروز در این افراد شود.

نویسنده	عنوان مقاله	حجم نمونه	میانگین سنی	زمان ارزیابی	نتایج اصلی
زارزسکی و همکاران (۲۰۱۸) [۴۱]	بررسی تفاوت تحریک‌پذیری کورتیکواسپاینال‌و اینتراکورتیکال در ورزشکاران دارای بازسازی رباط متقاطع قدامی و ورزشکاران سالم	۱۸ ورزشکار آسیب‌دیده ۱۸ ورزشکار سالم	۱۸ تا ۳۰ سال	۲ هفته بعد از عمل	نتایج این تحقیق نشان داد تحریک‌پذیری در قسمت کورتیکواسپاینال و اینتراکورتیکال مرتبط با عضله پهن داخلی در هر ۲ پا، ۲ هفته بعد از بازسازی رباط متقاطع قدامی به نسبت ورزشکاران سالم دچار تغییر شد.
یانگ وو (۲۰۱۸) [۵۳]	مکانیسم‌های نوروفیزیولوژیکال مرتبط با بی‌ثباتی عملکردی زانو به دنبال آسیب رباط متقاطع قدامی: مقاله مروری	–	–	–	بی‌ثباتی عملکردی مداوم به دنبال آسیب مفصل زانو می‌تواند به دلیل تغییر فرایند پردازش در سیستم عصبی مرکزی و نوروپلاستیسیتی مغز ایجاد شود.
گرومس و همکاران (۲۰۱۷) [۳۳]	نوروپلاستیسیتی مرتبط با بازسازی رباط متقاطع قدامی	۱۵ نفر دارای رباط متقاطع قدامی بازسازی شده و ۱۵ نفر سالم	۲۲ سال	۳۸/۱۳±۲۷/۱۶ ماه بعد از عمل جراحی	به دنبال بازسازی رباط متقاطع قدامی فعال‌سازی مغز در حرکات فلکشن و اکستنشن زانو به نسبت افراد سالم دچار تغییر شد. داده‌های این تحقیق نشان داد که درواقع تغییر فعال‌سازی مغز در افراد دارای بازسازی رباط متقاطع قدامی بعد از ۳۸ ماه در هنگام حرکت از استراتژی حسی‌حرکتی به سمت استفاده از یک استراتژی حرکتی‌بینایی سوق پیدا کرده است.
شین میائو و همکارانش (۲۰۱۷) [۴۲]	بررسی تغییر ویژگی‌های چگالی طیفی سیگنال‌های الکتریکی مغز (الکترونسفالوگرام EEG) در افراد دارای پارگی رباط متقاطع قدامی	۱۶ نفر دارای رباط آسیب‌دیده و ۱۶ نفر سالم	۲۶ سال	۸/۲۶±۷/۲۲ ماه بعد از آسیب	اختلاف معنی‌داری در چگالی طیفی سیگنال‌های الکتریکی مغز بین افراد دارای پارگی رباط متقاطع قدامی و افراد سالم وجود داشت. افراد دارای پارگی رباط متقاطع قدامی فعالیت‌های سیگنال‌های الکتریکی مغزی بالاتری را از خود نشان دادند و همچنین در این افراد عدم تقارن بالاتری نیز در این طیف به نسبت افراد سالم مشاهده شد. عدم تقارن هنگام انجام حرکات پیچیده تر افزایش یافت.
گرومس و همکاران (۲۰۱۵) [۸]	**نوروپلاستیسیتی به دنبال آسیب رباط متقاطع قدامی: چارچوبی برای رویکردهای تمرینات بصری‌حرکتی در توان‌بخشی مقاله مروری**	–	–	–	**علاوه بر تغییرات مکانیکی موردانتظار در ارتباط با آسیب رباط متقاطع قدامی مطالعات اخیر تغییرات وسیع سیستم عصبی مرکزی و نوروپلاستیسیتی مغز را نیز گزارش کرده‌اند. مطالعات نشان می‌دهد به دلیل این تغییرات نوروپلاستیک، فرد آسیب‌دیده به بازخورد دیداری برای کنترل زانو بیشتر از قبل نیاز خواهد داشت و تمرینات سنتی با توجه به شرایط پیچیده بازی که بازیکن باید چندین متغیر را مدیریت کند (به عنوان مثال توپ، بازیکنان، موقعیت میدان و استراتژی بازی) و به توجه بصری کامل به محیط نیاز دارد و از نظر تئوری منابع پردازشی شناختی کمتری را برای کنترل عصب عضلانی باقی می‌گذارد، خیلی نمی‌تواند نیازهای عدم بروز آسیب را برآورده کند.**
ون‌ومیسورتیپ همکاران (۲۰۱۵) [۴۳]	**تغییرات تحریک‌پذیری عصبی بعد از بازسازی رباط متقاطع قدامی**	**۲۸ فرد آسیب‌دیده و ۲۹ فرد سالم**	**۲۱ سال**	**۱۰/۴۸±۱۷/۳۶**	**نتایج این تحقیق نشان داد آستانه تحریک فعالیت عضلات به‌خصوص عضله پهن داخلی به دلیل کاهش فعالیت قشر حسی‌حرکتی در پای دارای رباط بازسازی شده افزایش یافته است.**

نویسنده	عنوان مقاله	حجم نمونه	میانگین سنی	زمان ارزیابی	نتایج اصلی
گرومس و همکاران (۲۰۱۵) [۴۴]	بررسی فعالیت مغز در هنگام حرکت زانو قبل از ابتلا به آسیب دوم رباط متقاطع قدامی	یک فرد دارای رباط بازسازی‌شده یک فرد سالم	۲۶ سال	۴ ماه بعد از آسیب‌دیدگی عمل جراحی صورت گرفت و ارزیابی تحقیق بعد از عمل جراحی	در فرد آسیب‌دیده به نسبت فرد سالم، افزایش فعالیت در قسمت برنامه‌ریزی حرکتی، پردازش حسی و فعالیت کنترلی مناطق حرکتی‌بینایی مشاهده شد. الگوی فعال‌سازی مشابهی نیز برای زانوی مقابل که پس از آن آسیب دید وجود داشت. نتیجه‌گیری نهایی این تحقیق این بود که نوروپلاستیسیتی دوطرفه پس از آسیب رباط متقاطع قدامی می‌تواند به آسیب مجدد این رباط کمک کند یا جنبه‌هایی از عوامل نوروفیزیولوژیکال ممکن است از عوامل مستعدکننده آسیب اولیه باشد.
باومایستر و همکاران (۲۰۱۱) [۴۵]	بررسی الکتروکورتیکال تغییریافته مغز بعد از بازسازی رباط متقاطع قدامی در هنگام کنترل نیرو	۹ نفر دارای رباط بازسازی شده و ۹ نفر سالم	۲۵ سال	۱۲±۷/۴ ماه بعد از عمل جراحی	اطلاعات آوران حسی تغییریافته به دلیل کاهش حس عمقی محیطی پس از بازسازی رباط متقاطع قدامی با اطلاعات موردانتظار در حافظه طولانی‌مدت در مغز مطابقت نداشته و این باعث تغییرات قشر مغز در رابطه با فرایندهای حافظه می‌شود.
کاپریلی و همکاران (۲۰۰۹) [۴۷]	ناکارآیی رباط متقاطع قدامی، علت نوروپلاستیسیتی مغز	۱۷ فرد دارای پارگی رباط متقاطع قدامی و ۱۸ فرد سالم	۳۵-۲۲ سال	۶ ماه بعد از آسیب	نتایج این تحقیق نشان می‌دهد افراد دارای رباط متقاطع قدامی آسیب‌دیده ناکارآمد به نسبت افراد سالم در چندین ناحیه قشر حسی‌حرکتی دچار کاهش فعالیت و در ۳ ناحیه دیگر دچار افزایش فعالیت شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد رباط متقاطع قدامی ناکارآمد باعث سازمان‌دهی مجدد در سیستم عصبی مرکزی می‌شود.
سوآنیک و همکاران (۲۰۰۷) [۴۸]	رابطه بین عملکرد عصبی‌شناختی و آسیب‌های غیربرخوردی رباط متقاطع قدامی	۸۰ ورزشکار دارای آسیب رباط متقاطع قدامی و ۸۰ نفر سالم	۲۰ سال	افرادی که طی سه سال گذشته، قبل از تحقیق دچار آسیب شدند	ورزشکارانی که دچار آسیب غیربرخوردی رباط متقاطع قدامی شده بودند به نسبت افراد سالم به‌طور قابل‌توجهی دارای زمان واکنش و سرعت پردازش کندتری بودند و از نظر بصری و حافظه کلامی نیز عملکرد بدتری داشتند. مطالعات قبلی نشان می‌دهد این ویژگی‌های عصب‌شناختی می‌توانند نقش مهمی در هماهنگی عملکرد ورزشی و آسیب داشته باشد.
هیروکس و ترمبلی (۲۰۰۶) [۴۹]	بررسی تحریک‌پذیری قشر حرکتی مرتبط با اختلال عملکرد یک‌طرفه زانو؛ ثانویه به آسیب رباط متقاطع قدامی	۱۰ نفر آسیب‌دیده ۸ نفر سالم	۲۵ سال	۲۲ ماه بعد از آسیب	در پاسخ به اختلال یک‌طرفه زانو در طولانی‌مدت سازگاری در سیستم قشر مغز ایجاد شد که استراتژی‌های حرکتی، از حالت نیمه‌خودکار به حالت ارادی‌تر سوق داده شد. نتایج نشان داد این افراد به هنگام انجام فعالیت‌های روزمره به نسبت افراد سالم به شکل ارادی‌تر حرکات زانوی خود را انجام می‌دهند. برای مثال نتایج نشان داد جهت جلوگیری از آسیب بیشتر، عضلات همسترینگ و دوقلو برای افزایش چرخش خارجی درشت‌نی و ران و والگوس زانو به شکل ارادی دارای فعالیت بیشتری بودند.

نویسنده	عنوان مقاله	حجم نمونه	میانگین سنی	زمان ارزیابی	نتایج اصلی
والریانی و همکاران (۱۹۹۹) [۵۰]	ناهنجاری‌های بالینی و نوروفیزیولوژیک قبل و بعد از بازسازی رباط صلیبی قدامی زانو	مطالعه ۷ نفر دارای پارگی رباط متقاطع قدامی قبل و بعد از بازسازی	گزارش نشده	قبل از بازسازی گزارش نشده است. ۲ سال بعد از عمل جراحی	نتایج این تحقیق نشان داد قبل از عمل جراحی حس وضعیت مفصلی و بعضی از فاکتورهای قشر مغز در سمت آسیب‌دیده تمام افراد کاهش پیدا کرده است. بعد از آرتروسکوپی و بازسازی زانو تا ۲ سال بعد حس عمقی زانو و هدایتگری سوماتوسنسوری مرکزی بهبود پیدا نکرد. نتیجه‌گیری نهایی این تحقیق این بود که از دست رفتن گیرنده‌های مکانیکی زانو با تغییراتی در سیستم عصبی مرکزی همراه است که توسط سایر ساختارهای عصبی جبران نمی‌شود.
والریانی و همکاران (۱۹۹۶) [۵۱]	تغییرات ایجادشده در سیستم عصبی مرکزی در افراد دارای پارگی رباط متقاطع قدامی	۹ نفر دارای رباط آسیب‌دیده و ۹ نفر سالم	۲۸ سال	یک تا ۸ سال بعد از آسیب	مسیرهای سوماتوسنسوری مرکزی در افراد آسیب‌دیده که گیرنده‌های مکانیکی محیطی آن‌ها دچار آسیب شده بودند از نظر عملکردی دچار تغییر شده بود.

توانبخشی

وظایف وضعیتی کاهش می‌یابد. این احتمال وجود دارد که این کاهش تحریک‌پذیری نشان‌دهنده تخصیص یک مسیر مجدد کنترل به‌سمت مناطق حرکتی زیر قشر مغز باشد که در انتها باعث ایجاد تغییرات طولانی‌مدت در رفتار حرکتی فرد می‌شود که به عنوان حمایت پیشگیرانه از آسیب رباط متقاطع قدامی تلقی می‌شود [۴۶]. هرچند در سال‌های اخیر به لطف پیشرفت تکنولوژی تحقیقات بسیار ارزشمندی مانند تحقیقاتی که اشاره شد در راستای بررسی عملکرد مغز در بروز آسیب و استفاده از این داده‌ها در جهت تدوین تمرینات جدیدتر و کارآمدتر پیشگیری از آسیب رباط متقاطع قدامی صورت گرفته است، ولی هنوز به مطالعات بیشتر با تعداد نمونه‌های بزرگ‌تر نیاز است تا درک ما از این موضوع روشن‌تر شود. برخلاف تحقیقات مرتبط با عملکرد مغز در بروز آسیب رباط متقاطع قدامی تحقیقات مربوط به تأثیر آسیب رباط متقاطع قدامی بر عملکرد و ساختار مغز به شکل گسترده‌تری مورد توجه محققین قرار گرفته است.

با توجه به جدول شماره ۲، ۱۹ مقاله تأثیر آسیب رباط متقاطع قدامی بر عملکرد و ساختار مغز را بررسی کرده بودند. درک بهتر این تغییرات بعد از بروز آسیب در کمک به کاهش عوارض و همچنین تدوین برنامه‌های توان‌بخشی کارآمدتر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. نتایج این ۱۹ مقاله در ۳ مرحله بعد از پارگی، بعد از بازسازی و بعد از یک دوره توان‌بخشی بررسی شدند. بررسی محققان تحقیق حاضر نشان داد نتایج تحقیقاتی که تغییرات مغز را بعد از پارگی رباط متقاطع قدامی بررسی کرده بودند به‌طور شگفت‌انگیزی دارای ارتباط عمیقی در راستای نوروپلاستیستی مغز با همدیگر هستند. در توضیح این ارتباط در ابتدا تحقیق والریانی و همکاران [۵۲] نشان داد در افرادی که دارای آسیب رباط متقاطع قدامی هستند به دلیل آسیب‌دیدگی گیرنده‌های مکانیکی، مسیرهای سوماتوسنسوری مرکزی از نظر عملکردی دچار تغییر می‌شوند. به این نکته نیز باید اشاره کرد که والریانی و همکارانش افرادی را بررسی کردند که ۱ تا ۸ سال از آسیب آن‌ها می‌گذشت. در ادامه کاکاوس و همکاران [۵۴] و نتو و همکاران [۵۵] گزارش کردند که حداقل ۲ هفته بعد از آسیب رباط متقاطع قدامی تغییراتی در سطح قشر حسی و قشر حرکتی مغز مشاهده شد که بعد از یک سال نیز این تغییرات ساختاری و عملکردی نه‌تنها باقی مانده بود بلکه به صورت گسترده‌ای افزایش یافته بود. در ادامه همین روند نتایج تحقیق یانگ وو و همکارانش [۵۳] نشان داد یکی از مهم‌ترین دلایل بی‌ثباتی مداوم عملکردی در زانوی آسیب‌دیده، تغییر فرایند پردازش در سیستم عصبی مرکزی و نوروپلاستیستی مغز است.

نتایج تحقیق کاپریلی و همکاران [۴۷] تغییرات گسترده‌تری را نشان داد. آن‌ها ثابت کردند که یک رباط آسیب‌دیده ناکارآمد بعد از ۶ ماه باعث سازمان‌دهی مجدد در سیستم عصبی مرکزی می‌شود. در پاسخ به این سؤال که این تغییرات عملکردی و ساختاری مغز، بعد از پارگی رباط متقاطع قدامی چه تأثیر مشهودی خواهد گذاشت، باید گفت در حال حاضر برای رسیدن به این پاسخ در ابتدای مسیر هستیم و هنوز به مطالعات گسترده‌تری نیاز است. ولی یکی از تأثیراتی که این نوروپلاستیستی حاصل از آسیب ایجاد می‌کند و مطالعات آن را تا حدودی ثابت کرده‌اند تغییر در عملکرد بصری است.

سوآنیک و همکاران [۴۸] در تحقیق خود با موضوع رابطه بین عملکرد عصبی‌شناختی و آسیب‌های غیربرخوردی رباط متقاطع قدامی به این نتیجه رسیدند که افراد آسیب‌دیده از نظر بصری به نسبت افراد سالم عملکرد ضعیف‌تری داشتند. البته مطالعه آن‌ها که بر روی افرادی که در طی ۳ سال گذشته دچار آسیب غیربرخوردی رباط متقاطع قدامی شده بودند نشان داد این افراد علاوه بر کاهش عملکرد بصری به‌طور قابل‌توجهی دارای زمان واکنش و سرعت پردازش کندتری بودند و از نظر حافظه کلامی نیز عملکرد بدتری داشتند.

تحقیق گرومس و همکاران [۴۴] نیز نشان داد در افراد آسیب‌دیده به نسبت افراد سالم فعالیت کنترلی مناطق حرکتی‌بینایی افزایش یافته است. آن‌ها به این نتیجه مهم نیز

رسیدند که این الگو در زانوی سالم که بعداً دچار آسیب شد نیز مشاهده شد. نتیجه‌گیری نهایی این تحقیق این بود که نوروپلاستیسیتی دوطرفه پس از آسیب رباط متقاطع قدامی می‌تواند حتی بعد از عمل و دوره توان‌بخشی، به آسیب مجدد این رباط کمک کند یا جنبه‌هایی از عوامل نوروفیزیولوژیکال ممکن است از عوامل مستعدکننده آسیب اولیه باشد. آن‌ها در تحقیق بعدی خود [۳۳] نیز گزارش کردند در مغز افراد دارای پارگی رباط متقاطع قدامی تغییراتی ایجاد می‌شودکه فرد آسیب‌دیده به بازخورد دیداری برای کنترل زانو بیشتر از قبل نیاز خواهد داشت.

در انتهای بحثِ این قسمت باید اشاره کرد که هیروکس و ترومبلی[۴۹] در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که در پاسخ به اختلال یک‌طرفه زانو، ناشی از پارگی رباط متقاطع قدامی، در طولانی‌مدت، سازگاری در سیستم قشر مغز ایجاد شد که باعث می‌شود استراتژی‌های حرکتی، از حالت نیمه‌خودکار به حالت ارادی‌تر سوق داده شود. نتایج نشان داد این افراد به هنگام انجام فعالیت‌های روزمره به نسبت افراد سالم به شکل ارادی‌تر حرکات زانوی خود را انجام می‌دهند. آن‌ها تحقیق خود را ۲۲ ماه بعد از آسیب انجام دادند.

حال این بحث ایجاد می‌شود که تمام تغییرات عملکردی و ساختاری که در مغز بعد از پارگی رباط متقاطع قدامی ایجاد می‌شود و همچنین تغییراتی که در مطالب بالا توضیح داده شد، آیا بعد از بازسازی رباط متقاطع قدامی باز هم بدین شکل باقی خواهد ماند یا نه؟ و در فرد آسیب‌دیده که رباط متقاطع قدامی خود را بازسازی کرده است چه مقدار این تغییرات ساختاری و عملکردی منفی به واسطه ترمیم رباط برطرف خواهد شد؟ باید گفت هر ۶ مقاله‌ای که یافت شد تقریباً متفق‌القول به این نتیجه رسیدند که این تغییرات در افرادی که رباط متقاطع خود را بازسازی کرده‌اند نیز مشاهده می‌شود، حتی ماه‌ها بعد از بازسازی رباط. در همین راستا تحقیق والریانی و همکارانش [۵۰] نشان داد که بعد از آرتروسکوپی و بازسازی زانو تا ۲ سال بعد حس عمقی زانو و هدایتگری سوماتوسنسوری مرکزی بهبود پیدا نکرد.

دیگر نتیجه‌گیری نهایی این تحقیق این بود که از دست رفتن گیرنده‌های مکانیکی زانو با تغییراتی در سیستم عصبی مرکزی همراه است که با سایر ساختارهای عصبی جبران نمی‌شود. کریس و همکارانش [۳۹] نیز در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که افراد دارای رباط بازسازی‌شده، بعد از ۴۳ ماه به نسبت افراد سالم افزایش فعالیت در مناطقی از مغز مشاهده شد که مسئول شناخت، جهت‌گیری و توجه دیداری‌فضایی برای کنترل حرکت ران و زانو بودند. گرومس و همکارانش [۳۳] نیز افرادی که به‌طور میانگین ۳۸ ماه از عمل بازسازی رباط متقاطع قدامی آن‌ها گذشته بود را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که فعال‌سازی مغز این افراد در هنگام حرکات فلکشن و اکستنشن به نسبت افراد سالم دچار تغییر شده است. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از این بود که فعال‌سازی مغز این افراد در هنگام حرکت زانو از استراتژی حسی‌حرکتی به‌سمت استراتژی حرکتی‌بینایی سوق پیدا کرده است. نتیجه تحقیق باومایستر و همکاران [۴۵] نیز این بود که بعد از عمل بازسازی رباط متقاطع قدامی اطلاعات آوران حسی به دلیل کاهش حس عمقی‌محیطی، تغییر یافته و این اطلاعات، با اطلاعات موردانتظار در حافظه طولانی‌مدت در مغز مطابقت نداشته و این باعث تغییرات قشر مغز در رابطه با فرایندهای حافظه می‌شود. تحقیق آن‌ها ۱۲ ماه بعد از بازسازی رباط انجام شده بود. در انتهای بحث این قسمت به دو تحقیقی اشاره می‌شود که نوروپلاستیسیتی مرتبط با عضله پهن داخلی را در افراد بازسازی‌شده گزارش کردند.

زارزسکی و همکاران [۴۱] اشاره کردند تحریک‌پذیری در قسمت کورتیکواسپینال مرتبط با عضله پهن داخلی در هر ۲ پا، ۲ هفته بعد از بازسازی رباط متقاطع قدامی به نسبت ورزشکاران سالم دچار تغییر شد. پیتروسیمون و همکاران [۴۳] نیز به این نتیجه رسیدند که آستانه تحریک فعالیت عضلات به‌خصوص عضله پهن داخلی به دلیل کاهش فعالیت قشر حسی‌حرکتی در پای بازسازی‌شده افزایش یافته است.

محققان درگذشته به اهمیت پیشرفت بهتر در رویکردهای پیشگیری از آسیب رباط متقاطع قدامی اشاره کرده بودند، ولی نتیجه تحقیق حاضر با توجه به مطالبی که تا الآن اشاره شد به‌شدت بر اهمیت این موضوع اضافه می‌کند. حال در قسمت سوم بحث با توجه به نتایج تحقیق به این پرسش پاسخ خواهیم داد که آیا تمرینات توان‌بخشی می‌تواند تمام این تغییرات منفی در عملکرد و ساختار مغز را بعد از پارگی و بعد از بازسازی برطرف کند؟ متأسفانه در این زمینه تنها یک تحقیق و آن‌هم تحقیق زارزسکی و همکارانش [۴۰] که به‌صورت کوهورت آینده‌نگر در سال ۲۰۲۰ انجام شده بود یافت شد. آن‌ها از یک پروتکل تمرینی ۱۲ هفته‌ای استفاده کردند. زارزسکی و همکارانش تغییرات مغزی را قبل از دوره توان‌بخشی، یعنی ۲ هفته بعد از عمل و همچنین بعد از یک دوره توان‌بخشی ۱۲ هفته‌ای مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد ۲ هفته بعد از عمل و قبل از شروع تمرینات توان‌بخشی در مقایسه با ورزشکاران سالم، گروهی که رباط متقاطع قدامی خود را بازسازی کرده بودند دچار تغییر در تحریک کورتیکواسپینال شده بودند. همچنین داده‌های آن‌ها نشان داد بعد از ۱۲ هفته تمرینات توان‌بخشی نیز تغییر در تحریکات کورتیکواسپینال این افراد به نسبت افراد سالم نه‌تنها پا برجا، بلکه در حال افزایش بود. همچنین یافته‌های این تحقیق نشان داد تغییر در تحریک کورتیکواسپینال مرتبط با پای سالم افراد دارای رباط متقاطع قدامی بازسازی‌شده باعث افزایش آستانه حرکت در زمان استراحت در این پا به نسبت افراد سالم شده است.

هرچند هنوز نیاز به تحقیقات گسترده‌تری هست، ولی همان‌طور که اشاره شد نتایج این تحقیق اهمیت و ضرورت رویکردهای پیشگیری از آسیب را دوچندان می‌کند. ولی این سؤال پیش می‌آید که آیا رویکردهایی که ما در حال حاضر برای پیشگیری از آسیب رباط متقاطع قدامی در پیش گرفته‌ایم کافی است؟ و آیا در رویکردهای پیشگیری فعلی، جایگاهی برای تأثیر مستقیم بر روی نوروپلاستیستی‌های منفی مغز قبل از آسیب وجود دارد؟ همان‌طور که نتایج تحقیق حاضر گواه وجود نوروپلاستیستی منفی در مغز افرادی که بعداً دچار آسیب می‌شوند بود. یکی از تحقیقاتی که نگاه ما را در تدوین بهینه‌تر رویکرد پیشگیری از آسیب روشن‌تر می‌کند تحقیق پاورس و فیشر [۴۶] است. همان‌طور که در ابتدای بحث اشاره شد آن‌ها در تحقیق خود تأثیر ۲ نوع تمرین را بر روی پیشگیری از آسیب بررسی کردند: تمرینات قدرتی و تمرینات اکتساب مهارت که به‌طور مستقیم‌تری بر روی ایجاد نوروپلاستیسیتی مثبت مغز تأثیرگذار است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد تمرینات اکتساب مهارت که به نسبت تمرینات قدرتی تأثیر بهتر و دراز مدت‌تری را بر روی مغز گذاشت در پیشگیری از آسیب رباط متقاطع قدامی مثمرثمرتر بوده است. نتیجه‌گیری نهایی این مقاله این بود که تمرینات اکتساب مهارت توانسته نوروپلاستیستی یا تغییرات نیمه‌دائمی را در مغز (مانند تقویت طولانی‌مدت اثر سیناپسی) ایجاد کند که در طی آن تحریک‌پذیری کورتیکو موتور و قشر حرکتی در حین انجام وظایف وضعیتی کاهش یافته است. این احتمال وجود دارد که این کاهش تحریک‌پذیری نشان‌دهنده تخصیص یک مسیر مجدد کنترل به‌سمت مناطق حرکتی زیر قشر مغز باشد که در انتها باعث ایجاد تغییرات طولانی‌مدت در رفتار حرکتی فرد می‌شود که به عنوان حمایت پیشگیرانه از آسیب رباط متقاطع قدامی تلقی می‌شود.

مانند رویکردهای پیشگیری از آسیب این رباط، نکته و سؤال بسیار مهم دیگری که در انتهای بحث باید به آن اشاره کرد این است که آیا رویکردهای توان‌بخشی که در حال حاضر مورد پذیرش است پاسخ‌گوی بازگشت مناسب ورزشکاران به فعالیت‌ها هستند؟ همان‌طور که در مقدمه اشاره شد شواهد اخیر نشان می‌دهد حتی اگر کاهش عملکرد زانوی آسیب‌دیده به‌وسیله تمرینات توان‌بخشی اصلاح و از بروز آسیب ثانویه نیز پیشگیری شود، بازگشت موفقیت‌آمیز به سطح فعالیت قبل از آسیب پس از بازسازی رباط متقاطع قدامی کمتر از آن است که در گذشته تصور می‌شد. تقریباً ۳۵ درصد از افراد مبتلا به آسیب رباط متقاطع قدامی قادر به بازگشت به سطح فعالیت قبلی خود نیستند [۴-۶]. میزان بالای آسیب‌دیدگی مجدد و همچنین عدم توانایی در بازگرداندن ظرفیت عملکردی نشان می‌دهد استانداردهای فعلی مراقبت از رباط متقاطع قدامی، ازجمله بازسازی این رباط و توان‌بخشی آن به‌اندازه کافی به نقص‌هایی که قبل از بروز آسیب وجود داشته و یا بعد از آن گسترش پیدا کرده نپرداخته است [۹-۱۲]. برای مثال همان‌طور که هم در قسمت یافته‌ها و هم در قسمت اولیه بحث اشاره شد، به دلیل تغییرات نوروپلاستیک، فرد آسیب‌دیده به بازخورد دیداری برای کنترل زانو بیشتر از قبل نیاز خواهد داشت. در تمرینات سنتی با توجه به شرایط پیچیده بازی که بازیکن باید چندین متغیر (برای مثال توپ، بازیکنان، موقعیت میدان و استراتژی بازی) را که به توجه بصری کامل به محیط نیاز دارد مدیریت کند، و با توجه به اینکه از نظر تئوری تمرینات سنتی حاضر منابع پردازشی شناختی کمتری را برای کنترل عصب عضلانی باقی می‌گذارد، به نظر می‌رسد این تمرینات خیلی نتواند نیازهای عدم بروز آسیب را برآورده کند.

کوکلر و همکارانش [۵۶] در سال ۲۰۱۹ در یک مقاله مروری برای بهینه‌تر شدن تمرینات توان‌بخشی و کاهش بروز آسیب ثانویه رباط متقاطع قدامی، تمرینات بالینی یکپارچه با استفاده از اصول جدید یادگیری حرکتی در راستای حمایت از نوروپلاستیستی مغز را پیشنهاد دادند که ممکن است بتواند در راستای بهبود آسیب کمک‌کننده باشد و خطر آسیب ثانویه رباط متقاطع قدامی را کاهش دهد. نویسندگان این مقاله استفاده از مفاهیم کلیدی زیر را برای تقویت برنامه توان‌بخشی و آماده سازی بیمار برای بازگشت مجدد به ورزش پس از آسیب ثانویه رباط متقاطع قدامی، ارائه دادند:

انجام تمرینات با استفاده از توجه و تمرکز خارجی؛ انجام تمرینات با استفاده از اصول یادگیری ضمنی؛ انجام تمرینات با استفاده از اصول یادگیری افتراقی؛ انجام تمرینات با استفاده از اصول یادگیری خودکنترل‌شده و تداخل زمینه‌ای. اصول جدید یادگیری حرکتی ارائه‌شده در این نسخه ممکن است آینده برنامه‌های توان‌بخشی را بهینه و خطر آسیب ثانویه رباط متقاطع قدامی را کاهش داده و همچنین با هدف قرار دادن تغییرات نوروپلاستیستی مغز باعث کاهش پیشرفت اولیه آرتروز در این افراد شود.

شاید بتوان پیشنهاد گرومس و همکارانش که در حال حاضر بیشترین تحقیقات را در این زمینه انجام داده‌اند در انتهای این قسمت بحث پشنهاد داد. آن‌ها اشاره می‌کنند بهتر است چارچوب تمرینات توان‌بخشی پیشنهادی شامل در کنار هم قرار دادن شواهدی از علوم اعصاب، بیومکانیک، کنترل حرکتی و روان‌شناسی برای پشتیبانی از تلفیق رویکردهای عصبی‌شناختی و دیداری‌حرکتی به همراه مداخلات سنتی عصبی‌عضلانی در حین توان‌بخشی آسیب رباط متقاطع قدامی باشد [۳۳].

نتیجه‌گیری

قبل از پارگی رباط متقاطع قدامی در مغز افرادی که بعداً دچار پارگی این رباط شدند، نوروپلاستیستی یا تغییرات عملکردی و ساختاری مشاهده شد که احتمالاً نقش فیدفروواردی مغز را دچار اختلال و شرایط را برای بروز آسیب فراهم می‌کند. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد بعد از پارگی رباط متقاطع قدامی،

رباط ناکارآمد باعث ایجاد تغییرات گسترده‌ای در مغز می‌شود که یکی از مهم‌ترین تأثیرات این تغییرات در قسمت مرتبط با عملکرد بصری است. نتایج نشان داد تغییرات ایجادشده در مغز حتی بعد از بازسازی رباط متقاطع قدامی نه‌تنها باقی می‌ماند، بلکه افزایش نیز می‌یابد. در انتها نتایج تحقیق حاضر نشان داد اگر تمرکز اصلی تمرینات توان‌بخشی رایج بر روی برطرف نکردن این تغییرات عملکردی و ساختاری ایجادشده در مغز نباشد باز هم نمی‌تواند این نوروپلاستیستی منفی ایجادشده بعد از آسیب را که یکی از عوامل مهم آسیب ثانویه و عوارض بعدی است برطرف کند. نتیجه‌گیری نهایی مقاله این است که در تدوین تمرینات پیشگیری و همچنین تمرینات توان‌بخشی بعد از بازسازی این رباط، بهتر است در کنار تمرینات رایج، از اصول جدید یادگیری حرکتی و تمرینات مرتبط با بازخورد بینایی در راستای برطرف کردن نوروپلاستیستی منفی ایجادشده در مغز، و ایجاد نوروپلاستیسیتی مثبت برای حمایت از این رباط استفاده شود. البته نباید فراموش کردکه برای تثبیت نتایج هنوز نیاز به مطالعات گسترده‌تر با حجم نمونه بیشتری است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این مقاله، یک مقاله مروری نظام مند است و در آن از هیچ‌گونه نمونه انسانی و حیوانی استفاده نشده است.

حامی مالی

این تحقیق هیچ‌گونه کمک مالی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت‌نویسندگان

مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، اعتبار سنجی، تحلیل، تحقیق و بررسی، منابع: حسن دانشمندی، مصطفی پاینده، زاهر محمد عاشور؛ نگارش پیش‌نویس: مصطفی پاینده؛ ویراستاری و نهایی‌سازی نوشته، بصری‌سازی، نظارت، مدیریت پروژه، تأمین مالی: حسن دانشمندی، مصطفی پاینده، زاهر محمد عاشور.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

[1] Grooms DR, Onate JA. Neuroscience application to noncontact anterior cruciate ligament injury prevention. Sports Health. 2016; 8(2):149-52. [DOI:10.1177/1941738115619164] [PMID] [PMCID]

[2] Diekfuss JA, Grooms DR, Yuan W, Dudley J, Barber Foss KD, Thomas S, et al. Does brain functional connectivity contribute to musculoskeletal injury? A preliminary prospective analysis of a neural biomarker of ACL injury risk. Journal of Science and Medicine in Sport. 2019; 22(2):169-74. [DOI:10.1016/j.jsams.2018.07.004] [PMID] [PMCID]

[3] Diekfuss JA, Grooms DR, Nissen KS, Schneider DK, Foss KDB, Thomas S, et al. Alterations in knee sensorimotor brain functional connectivity contributes to ACL injury in male high-school football players: A prospective neuroimaging analysis. Brazilian Journal of Physical Therapy. 2020; 24(5):415-23. [DOI:10.1016/j.bjpt.2019.07.004] [PMID] [PMCID]

[4] McCormack RG, Hutchinson MR. Time to be honest regarding outcomes of ACL reconstructions: Should we be quoting 55-65% success rates for high-level athletes? British Journal of Sports Medicine. 2016; 50(19):1167-8. [DOI:10.1136/bjsports-2016-096324] [PMID]

[5] Shah VM, Andrews JR, Fleisig GS, McMichael CS, Lemak LJ. Return to play after anterior cruciate ligament reconstruction in national football league athletes. The American Journal of Sports Medicine. 2010; 38(11):2233-9. [DOI:10.1177/0363546510372798] [PMID]

[6] Waldén M, Hägglund M, Magnusson H, Ekstrand J. ACL injuries in men's professional football: A 15-year prospective study on time trends and return-to-play rates reveals only 65% of players still play at the top level 3 years after ACL rupture. British Journal of Sports Medicine. 2016; 50(12):744-50. [DOI:10.1136/bjsports-2015-095952] [PMID]

[7] Ahldén M, Samuelsson K, Sernert N, Forssblad M, Karlsson J, Kartus J. The Swedish national anterior cruciate ligament register: A report on baseline variables and outcomes of surgery for almost 18,000 patients. The American Journal of Sports Medicine. 2012; 40(10):2230-5. [DOI:10.1177/0363546512457348] [PMID]

[8] Grooms D, Appelbaum G, Onate J. Neuroplasticity following anterior cruciate ligament injury: A framework for visual-motor training approaches in rehabilitation. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy. 2015; 45(5):381-93. [DOI:10.2519/jospt.2015.5549] [PMID]

[9] Culvenor AG, Barton CJ. ACL injuries: The secret probably lies in optimising rehabilitation. British Journal of Sports Medicine. 2018; 52(22):1416. [DOI:10.1136/bjsports-2017-098872] [PMID]

[10] Grindem H, Arundale AJH, Ardern CL. Alarming underutilisation of rehabilitation in athletes with anterior cruciate ligament reconstruction: Four ways to change the game. British Journal of Sports Medicine. 2018; 52(18):1162-3. [DOI:10.1136/bjsports-2017-098746] [PMID]

[11] Hewett TE, Myer GD, Ford KR, Heidt RS, Colosimo AJ, McLean SG, et al. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: A prospective study. The American Journal of Sports Medicine. 2005; 33(4):492-501. [DOI:10.1177/0363546504269591] [PMID]

[12] Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, Rauh MJ, Myer GD, Huang B, et al. Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. The American Journal of Sports Medicine. 2010; 38(10):1968-78. [DOI:10.1177/0363546510376053] [PMID] [PMCID]

[13] Herrington L, Myer G, Horsley I. Task based rehabilitation protocol for elite athletes following anterior cruciate ligament reconstruction: A clinical commentary. Physical Therapy in Sport. 2013; 14(4):188-98. [DOI:10.1016/j.ptsp.2013.08.001] [PMID]

[14] Dai B, Mao M, Garrett WE, Yu B. Biomechanical characteristics of an anterior cruciate ligament injury in javelin throwing. Journal of Sport and Health Science. 2015; 4(4):333-40. [DOI:10.1016/j.jshs.2015.07.004]

[15] Schmitz RJ, Kulas AS, Perrin DH, Riemann BL, Shultz SJ. Sex diferences in lower extremity biomechanics during single leg landings. Clinical Biomechanics (Bristoal, Avon). 2007; 22(6):681-8. [DOI:10.1016/j.clinbiomech.2007.03.001] [PMID]

[16] Tsai C, Powers CM. Increased hip and knee flexion during landing decreases tibiofemoral compressive forces in women who have undergone anterior cruciate ligament reconstruction. The American Journal of Sports Medicine. 2012; 41(2):423-9. [DOI:10.1177/0363546512471184] [PMID]

[17] Dragicevic-Cvjetkovic D, Jandric S, Bijeljac S, Palija S, Manojlovic S, Talic G. The effects of rehabilitation protocol on functional recovery after anterior cruciate ligament reconstruction. Medical Archives. 2014; 68(5):350-2. [DOI:10.5455/medarh.2014.68.350-352] [PMID] [PMCID]

[18] Dustin RG, Adam WK, Michael AR, Jonathan DE, Staci T, Katie K, et al. Brain-behavior mechanisms for the transfer of neuromuscular training adaptions to simulated sport: Initial findings from the train the brain project. Journal of Sport Rehabilitation. 2018; 27(5):1-5. [DOI:10.1123/jsr.2017-0241] [PMID] [PMCID]

[19] Gokeler A, Seil R, Kerkhoffs G, Verhagen E. A novel approach to enhance ACL injury prevention programs. Journal of Experimental Orthopaedics. 2018; 5(1):22. [DOI:10.1186/s40634-018-0137-5] [PMID] [PMCID]

[20] Bell DR, Oates DC, Clark MA, Padua DA. Two- and 3-dimensional knee valgus are reduced after an exercise intervention in young adults with demonstrable valgus during squatting. Journal of Athletic Training. 2013; 48(4):442-9. [DOI:10.4085/1062-6050-48.3.16] [PMID] [PMCID]

[21] Myer GD, Ford KR, Brent JL, Hewett TE. The effects of plyometric vs. dynamic stabilization and balance training on power, balance, and landing force in female athletes. Journal of Strength and Conditioning Research. 2006; 20(2):345-53. [DOI:10.1519/00124278-200605000-00019] [PMID]

[22] Myer GD, Ford KR, Palumbo JP, Hewett TE. Neuromuscular training improves performance and lower-extremity biomechanics in female athletes. Journal of Strength and Conditioning Research. 2005; 19(1):51-60. [DOI:10.1519/00124278-200502000-00010] [PMID]

[23] Myer GD, Paterno MV, Ford KR, Hewett TE. Neuromuscular training techniques to target deficits before return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. Journal of Strength & Conditioning Research. 2008; 22(3). [DOI:10.1519/JSC.0b013e31816a86cd] [PMID]

[24] Christopher AD, Adam WK, Scott B, Gregory DM. High-risk lower-extremity biomechanics evaluated in simulated soccer-specific virtual environments. Journal of Sport Rehabilitation. 2020; 29(3):294-300. [DOI:10.1123/jsr.2018-0237] [PMID]

[25] Herman DC, Barth JT. Drop-jump landing varies with baseline neurocognition: Implications for anterior cruciate ligament injury risk and prevention. The American Journal of Sports Medicine. 2016; 44(9):2347-53. [DOI:10.1177/0363546516657338] [PMID] [PMCID]

[26] Monfort SM, Pradarelli JJ, Grooms DR, Hutchison KA, Onate JA, Chaudhari AMW. Visual-spatial memory deficits are related to increased knee valgus angle during a sport-specific sidestep cut. The American Journal of Sports Medicine. 2019; 47(6):1488-95. [DOI:10.1177/0363546519834544] [PMID]

[27] Norasteh AA, Payandeh M, Mohammad Ashour Z. Investigation of knee arthrokinematic changes before and after reconstruction of anterior cruciate ligament: A systematic review. Journal of Sport Biomechanics. 2020; 6(2):66-85. [DOI:10.32598/biomechanics.6.2.5]

[28] Konishi Y, Aihara Y, Sakai M, Ogawa G, Fukubayashi T. Gamma loop dysfunction in the quadriceps femoris of patients who underwent anterior cruciate ligament reconstruction remains bilaterally. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports. 2007; 17(4):393-9. [DOI:10.1111/j.1600-0838.2006.00573.x] [PMID]

[29] Luc-Harkey BA, Harkey MS, Pamukoff DN, Kim RH, Royal TK, Blackburn JT, et al. Greater intracortical inhibition associates with lower quadriceps voluntary activation in individuals with ACL reconstruction. Experimental Brain Research. 2017; 235(4):1129-37. [DOI:10.1007/s00221-017-4877-8] [PMID]

[30] Silfies SP, Vendemia JMC, Beattie PF, Stewart JC, Jordon M. Changes in brain structure and activation may augment abnormal movement patterns: An emerging challenge in musculoskeletal rehabilitation. Pain Medicine. 2017; 18(11):2051-4. [DOI:10.1093/pm/pnx190] [PMID]

[31] Baumeister J, Reinecke K, Schubert M, Weiß M. Altered electrocortical brain activity after ACL reconstruction during force control. Journal of Orthopaedic Research. 2011; 29(9):1383-9. [DOI:10.1002/jor.21380] [PMID]

[32] Baumeister J, Reinecke K, Weiss M. Changed cortical activity after anterior cruciate ligament reconstruction in a joint position paradigm: An EEG study. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports. 2008; 18(4):473-84. [DOI:10.1111/j.1600-0838.2007.00702.x] [PMID]

[33] Grooms DR, Page SJ, Nichols-Larsen DS, Chaudhari AMW, White SE, Onate JA. Neuroplasticity associated with anterior cruciate ligament reconstruction. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy. 2016; 47(3):180-9. [DOI:10.2519/jospt.2017.7003] [PMID]

[34] Diekfuss JA, Hogg JA, Grooms DR, Slutsky-Ganesh AB, Singh H, Bonnette S, et al. Can we capitalize on central nervous system plasticity in young athletes to inoculate against injury? Journal of Science in Sport and Exercise. 2020; 2(4):305-18. [DOI:10.1007/s42978-020-00080-3]

[35] Lepley AS, Ly MT, Grooms DR, Kinsella-Shaw JM, Lepley LK. Corticospinal tract structure and excitability in patients with anterior cruciate ligament reconstruction: A DTI and TMS study. NeuroImage: Clinical. 2020; 25:102157. [DOI:10.1016/j.nicl.2019.102157] [PMID] [PMCID]

[36] Faltus J, Criss CR, Grooms DR. Shifting focus: A clinician's guide to understanding neuroplasticity for anterior cruciate ligament rehabilitation. Current Sports Medicine Reports. 2020; 19(2):76-83. [DOI:10.1249/JSR.0000000000000688] [PMID]

[37] Downs SH, Black N. The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions. Journal of Epidemiology and Community Health. 1998; 52(6):377-84. [DOI:10.1136/jech.52.6.377] [PMID] [PMCID]

[38] O'Connor SR, Tully MA, Ryan B, Bradley JM, Baxter GD, McDonough SM. Failure of a numerical quality assessment scale to identify potential risk of bias in a systematic review: A comparison study. BMC Research Notes. 2015; 8:224. [DOI:10.1186/s13104-015-1181-1] [PMID] [PMCID]

[39] Criss CR, Onate JA, Grooms DR. Neural activity for hip-knee control in those with anterior cruciate ligament reconstruction: A task-based functional connectivity analysis. Neuroscience Letters. 2020; 730:134985. [DOI:10.1016/j.neulet.2020.134985] [PMID]

[40] Zarzycki R, Morton SM, Charalambous CC, Pietrosimone B, Williams GN, Snyder-Mackler L. Examination of corticospinal and spinal reflexive excitability during the course of postoperative rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy. 2020; 50(9):516-22. [DOI:10.2519/jospt.2020.9329] [PMID]

[41] Zarzycki R, Morton SM, Charalambous CC, Marmon A, Snyder-Mackler L. Corticospinal and intracortical excitability differ between athletes early after ACLR and matched controls. Journal of Orthopaedic Research. 2018; 36(11):2941-8. [DOI:10.1002/jor.24062] [PMID]

[42] Miao X, Huang H, Hu X, Li D, Yu Y, Ao Y. The characteristics of EEG power spectra changes after ACL rupture. Plos One. 2017; 12(2):e0170455. [DOI:10.1371/journal.pone.0170455] [PMID] [PMCID]

[43] Pietrosimone BG, Lepley AS, Ericksen HM, Clements A, Sohn DH, Gribble PA. Neural excitability alterations after anterior cruciate ligament reconstruction. Journal of Athletic Training. 2015; 50(6):665-74. [DOI:10.4085/1062-6050-50.1.11] [PMID] [PMCID]

[44] Grooms DR, Page S, Onate JA. Brain activation for knee movement measured days before second anterior cruciate ligament Injury: Neuroimaging in musculoskeletal medicine. Journal of Athletic Training. 2015; 50(10):1005-10. [PMCID]

[45] Baumeister J, Reinecke K, Schubert M, Weiss M. Altered electrocortical brain activity after ACL reconstruction during force control. Journal of Orthopaedic Research. 2011; 29(9):1383-9. [DOI:10.1002/jor.21380] [PMID]

[46] Powers CM, Fisher B. Mechanisms underlying ACL injury-prevention training: The brain-behavior relationship. Journal of Athletic Training. 2010; 45(5):513-5. [DOI:10.4085/1062-6050-45.5.513] [PMID] [PMCID]

[47] Kapreli E, Athanasopoulos S, Gliatis J, Papathanasiou M, Peeters R, Strimpakos N, et al. Anterior cruciate ligament deficiency causes brain plasticity: A functional MRI study. The American Journal of Sports Medicine. 2009; 37(12):2419-26. [DOI:10.1177/0363546509343201] [PMID]

[48] Swanik CB, Covassin T, Stearne DJ, Schatz P. The relationship between neurocognitive function and noncontact anterior cruciate ligament injuries. The American Journal of Sports Medicine. 2007; 35(6):943-8. [DOI:10.1177/0363546507299532] [PMID]

[49] Héroux ME, Tremblay F. Corticomotor excitability associated with unilateral knee dysfunction secondary to anterior cruciate ligament injury. Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. 2006; 14(9):823-33. [DOI:10.1007/s00167-006-0063-4] [PMID]

[50] Valeriani M, Restuccia D, Di Lazzaro V, Franceschi F, Fabbriciani C, Tonali P. Clinical and neurophysiological abnormalities before and after reconstruction of the anterior cruciate ligament of the knee. Acta Neurologica Scandinavica. 1999; 99(5):303-7. [DOI:10.1111/j.1600-0404.1999.tb00680.x] [PMID]

[51] Valeriani M, Restuccia D, Di Lazzaro V, Franceschi F, Fabbriciani C, Tonali P. Central nervous system modifications in patients with lesion of the anterior cruciate ligament of the knee. Brain. 1996; 119(Pt 5):1751-62. [DOI:10.1093/brain/119.5.1751] [PMID]

[52] Swanik CB. Brains and sprains: The brain's role in noncontact anterior cruciate ligament injuries. Journal of Athletic Training. 2015; 50(10):1100-2. [DOI:10.4085/1062-6050-50.10.08] [PMID] [PMCID]

[53] An YW. Neurophysiological mechanisms underlying functional knee instability following an anterior cruciate ligament injury. Exercise Science. 2018; 27(2):109-17. [DOI:10.15857/ksep.2018.27.2.109]

[54] Kakavas G, Malliaropoulos N, Pruna R, Traster D, Bikos G, Maffulli N. Neuroplasticity and anterior cruciate ligament injury. Indian Journal of Orthopaedics. 2020; 54(3):275-80. [DOI:10.1007/s43465-020-00045-2] [PMID] [PMCID]

[55] Neto T, Sayer T, Theisen D, Mierau A. Functional brain plasticity associated with ACL injury: A scoping review of current evidence. Neural Plasticity. 2019; 2019:3480512. [DOI:10.1155/2019/3480512] [PMID] [PMCID]

[56] Gokeler A, Neuhaus D, Benjaminse A, Grooms DR, Baumeister J. Principles of motor learning to support neuroplasticity after ACL injury: Implications for optimizing performance and reducing risk of second ACL injury. Sports Medicine (Auckland, NZ). 2019; 49(6):853-65. [DOI:10.1007/s40279-019-01058-0] [PMID] [PMCID]

[57] Adams D, Logerstedt D, Hunter-Giordano A, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Current concepts for anterior cruciate ligament reconstruction: A criterion-based rehabilitation progression. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy. 2012; 42(7):601-14. [DOI:10.2519/jospt.2012.3871] [PMID] [PMCID]

[58] Gokeler A, Benjaminse A, Della Villa F, Tosarelli F, Verhagen E, Baumeister J. Anterior cruciate ligament injury mechanisms through a neurocognition lens: Implications for injury screening. BMJ Open Sport & Exercise Medicine. 2021; 7(2):e001091. [DOI:10.1136/bmjsem-2021-001091] [PMID] [PMCID]

[59] Markolf KL, Graff-Radford A, Amstutz HC. In vivo knee stability. A quantitative assessment using an instrumented clinical testing apparatus. The Journal of Bone and Joint Surgery American Volume. 1978; 60(5):664-74. [DOI:10.2106/00004623-197860050-00014] [PMID]

[60] Shultz SJ, Perrin DH, Adams MJ, Arnold BL, Gansneder BM, Granata KP. Neuromuscular response characteristics in men and women after knee perturbation in a single-leg, weight-bearing stance. Journal of Athletic Training. 2001; 36(1):37-43. [PMID] [PMCID]

[61] Yasuda K, Erickson AR, Beynnon BD, Johnson RJ, Pope MH. Dynamic elongation behavior in the medial collateral and anterior cruciate ligaments during lateral impact loading. Journal of Orthopaedic Research. 1993; 11(2):190-8. [DOI:10.1002/jor.1100110206] [PMID]

[62] Noyes FR, Butler DL, Grood ES, Zernicke RF, Hefzy MS. Biomechanical analysis of human ligament grafts used in knee-ligament repairs and reconstructions. The Journal of Bone and Joint Surgery. 1984; 66(3):344-52. [DOI:10.2106/00004623-198466030-00005]

This Page Intentionally Left Blank