

The Effect of an Eight-Week Hopping Exercise Program on Functional and Kinematic Indices in Female Athletes with a History of ACL Reconstruction

Malhami Nozhin, [Daneshjoo Abdurasul](#)², Riahi Malayeri Shahin³

- 1- MSc Sports Injuries and Corrective Exercises - Paramedics, Department of Physical Education and Sports Sciences, Tehran East Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
- 2- Associate Professor of Sport Biomechanics - Injures, Department of Physical Education and Sports Sciences, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
- 3- Associate Professor of Exercise Physiology, Department of Physical Education and Sport Sciences, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Received: 2025.09.05 Accepted: 2025.11.02

Purpose: Anterior cruciate ligament (ACL) injury is one of the most common sports injuries among female athletes, often accompanied by functional and kinematic deficits post-surgery. This study aimed to investigate the effect of an eight-week hopping exercise program on functional (static balance, dynamic balance, knee proprioception) and kinematic (knee valgus angle) indices in female athletes with a history of ACL reconstruction using hamstring autograft.

Methods: The present study was a semi-experimental study with a pre-test-post-test design. The statistical population of the present study consisted of 26 female athlete (18-30 years old) with a history of ACL surgery, and from them, 20 were selected as the statistical sample and were randomly divided into two experimental groups ($n=10$) and control ($n=10$). The experimental group underwent a progressive hopping program (three 30-minute sessions per week) in eight weeks, while the control group continued standard rehabilitation. Assessments included static balance (Overall Stability Index via Biodex), dynamic balance (Y-Balance Test), knee proprioception (45° flexion error via Angle Meter 360), and knee kinematics (Frontal Plane Projection Angle [FPPA] via Kinovea during single-leg landing). Normality was assessed using the Shapiro-Wilk test, and homogeneity of variance was evaluated with Levene's test ($p>0.05$). A 2×2 mixed ANOVA (group $\times$ time) and Bonferroni post-hoc tests for pairwise comparisons were conducted using SPSS version 27 ($p < 0.05$).

Results: In the pre-test, no significant differences were observed between groups in the dependent variables ($p > 0.05$). The experimental group showed significant improvements: a 35.61% reduction in OSI ($\eta^2 = 0.71$), a 44.67% reduction in proprioceptive error ($\eta^2=0.86$), a 48.62% reduction in FPPA ($\eta^2 = 0.73$), and increases of 15.92% in anterior balance, 11.26% in posteromedial balance, 15.18% in posterolateral balance, and 14.08% in overall balance ($\eta^2=0.65-0.83$). Bonferroni tests confirmed significant differences between groups in the post-test ($p<0.001$ for all variables) and significant pre-test to post-test improvements in the experimental group ($p<0.001$). The control group showed no significant changes ($p>0.05$).

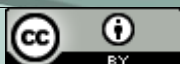
Conclusion: Hopping exercises effectively improve functional and kinematic deficits in female athletes post-ACL reconstruction and can be integrated into female-specific rehabilitation programs. It is recommended that rehabilitation specialists incorporate this protocol into return-to-sport programs for women with a history of ACL surgery.

Keywords: Anterior Cruciate Ligament (ACL), Hopping Exercises, Balance, Knee Proprioception, Knee Valgus Angle

Corresponding Author: Abdurasul Daneshjoo

Email: phdanesh@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4410-084X



Copyright © 2026 Mashhad University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

► Please cite this article as: Malhami N, [Daneshjoo A](#), Riahi Malayeri Sh. The Effect of an Eight-Week Hopping Exercise Program on Functional and Kinematic Indices in Female Athletes with a History of ACL Reconstruction. JPSR 2026; 15(2):176-190. DOI: 10.22038/jpsr.2026.91003.2737.

تاثیر یک دوره تمرینات هاپینگ بر شاخص عملکردی و کینماتیکی دختران ورزشکار با سابقه جراحی ACL

نوژین ملمی^۱، عبدالرسول دانشجو^۲، شاهین ریاحی ملایری^۳

هدف: آسیب لیگامان صلیبی قدامی (Anterior Cruciate Ligament; ACL) یکی از شایع ترین آسیب های ورزشی در زنان ورزشکار است که اغلب با نقص های عملکردی و کینماتیکی پس از جراحی همراه است. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر هشت هفته تمرینات هاپینگ بر شاخص های عملکردی (تعادل ایستا، پویا و حس عمقی زانو) و کینماتیکی (زاویه والگوس زانو) در دختران ورزشکار با سابقه جراحی ACL با اتوگرافت همسترینگ انجام شد.

روش بررسی: تحقیق حاضر از نوع نیمه تجربی و به صورت پیش آزمون-پس آزمون بود. جامعه آماری تحقیق حاضر را ۲۶ دختر ورزشکار (۱۸-۳۰ سال) با سابقه جراحی ACL تشکیل دادند و از میان آن ها، ۲۰ نفر به عنوان نمونه آماری انتخاب شدند و به طور تصادفی به دو گروه تجربی (تعداد=۱۰) و کنترل (تعداد=۱۰) تقسیم شدند. گروه تجربی برنامه پیش رونده هاپینگ (سه جلسه در هفته، ۳۰ دقیقه) را دریافت کرد، در حالی که گروه کنترل فعالیت روزمره خود را ادامه داد. ارزیابی ها شامل تعادل ایستا با بایودکس (Overall Stability Index; OSI)، تعادل پویا با آزمون Y، حس عمقی زانو با Angle Meter 360 (خطای ۴۵ درجه) و کینماتیک زانو با Kinovea (Frontal Plane Projection Angle; FPPA) در فرود تک پا) بود. تحلیل واریانس ترکیبی ۲×۲ (گروه × زمان) و آزمون تعقیبی بونفرونی برای مقایسه های ساده در SPSS نسخه ۲۷ استفاده شد ($p < 0.05$).

یافته ها: در پیش آزمون، تفاوت معنی داری بین گروه ها در متغیرهای وابسته مشاهده نشد ($p > 0.05$). گروه تجربی بهبود معنی دار نشان داد: کاهش ۳۵/۶۱٪ در پایداری کلی ($\eta^2 = 0.71$)، ۴۴/۶۷٪ در خطای حس عمقی ($\eta^2 = 0.86$)، ۴۸/۶۲٪ در FPPA ($\eta^2 = 0.73$) و افزایش ۱۵/۹۲٪ در تعادل قدامی، ۱۱/۲۶٪ خلفی-داخلی، ۱۵/۱۸٪ خلفی - خارجی و ۱۴/۰۸٪ کلی ($\eta^2 = 0.65-0.83$). آزمون بونفرونی تفاوت معنی دار بین گروه ها در پس آزمون ($p < 0.001$) برای تمام متغیرها) و بهبود معنی دار پیش آزمون-پس آزمون در گروه تجربی ($p < 0.001$) را تأیید کرد. گروه کنترل هیچ تغییر معناداری نداشت ($p > 0.05$).

نتیجه گیری: تمرینات هاپینگ به طور موثر نقص های عملکردی و کینماتیکی را در زنان ورزشکار پس از ACL بهبود می بخشد و می تواند بخشی از برنامه های توانبخشی ویژه زنان باشد. متخصصان توانبخشی از این پروتکل در برنامه های بازگشت به ورزش زنان با سابقه جراحی ACL استفاده کنند.

کلمات کلیدی: لیگامان صلیبی قدامی (ACL)، تمرینات هاپینگ، تعادل، حس عمقی زانو، زاویه والگوس زانو.

نویسنده مسئول: عبدالرسول دانشجو، phdanesh@gmail.com ORCID: 0000-0003-4410-084X

آدرس: تهران، قیام دشت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق.

۱- کارشناس ارشد رشته آسیب شناسی و حرکات اصلاحی - امدادگری، گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار بیومکانیک آسیب شناسی ورزشی، گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- دانشیار فیزیولوژی ورزشی، گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مقدمه

در زنان ورزشکار دو تا هشت برابر بیشتر از مردان است، که این تفاوت به عوامل مختلفی مانند تفاوت های آناتومیکی (مانند زاویه Q بزرگ تر، عرض لگن بیشتر و تراکم استخوانی کمتر)، هورمونی (تأثیر استروژن بر شلی لیگامان) و عصبی-عضلانی (الگوهای حرکتی متفاوت مانند والگوس زانو) نسبت داده می شود (۱-۳). مطالعات اپیدمیولوژیک نشان می دهد که نرخ بروز آسیب ACL در ورزشکاران زن

آسیب لیگامان صلیبی قدامی (Anterior Cruciate Ligament; ACL) یکی از شایع ترین آسیب های ورزشی در میان ورزشکاران، به ویژه زنان، است. این آسیب اغلب در ورزش هایی مانند فوتبال، بسکتبال و والیبال رخ می دهد که شامل تغییرات ناگهانی جهت، پرش و فرود آمدن است. بر اساس آمارهای اخیر، شیوع آسیب ACL

مقایسه با گرافت پاتلا و الوگرافت (۱۵، ۱۴). با وجود این مزایا، مطالعات طولی ۲۰ ساله نشان دهنده تأثیر منفی سن و شیب تییبای خلفی بر نتایج بلندمدت است، که در زنان جوان با گرافت همسترینگ بیشتر مشهود است (۱۶).

پس از جراحی ACL، ورزشکاران اغلب با نقص‌های عملکردی (Functional Deficits) و کینماتیکی مواجه هستند. این نقص‌ها شامل کاهش قدرت عضلانی، عدم تقارن در پرش‌ها و فرودها، و تغییرات در زوایای زانو مانند کاهش فلکشن زانو و افزایش والگوس است (۱۷). در زنان، این نقص‌ها پایدارتر هستند و تا ۲۴ ماه پس از جراحی ادامه می‌یابند، که منجر به کاهش عملکرد در تست‌های پرش مانند می‌شود (۱۸). مطالعات کینماتیکی نشان می‌دهد که پس از بازسازی با گرافت همسترینگ، چرخش خارجی تییبای افزایش می‌یابد و زاویه فلکشن زانو کاهش می‌یابد، که این تغییرات می‌تواند خطر آسیب مجدد را افزایش دهد (۱۹). علاوه بر این، عدم تعادل عصبی عضلانی، مانند تأخیر در فعال‌سازی همسترینگ، در زنان پس از جراحی شایع است و بر پایداری زانو تأثیر می‌گذارد (۲۰). تحقیقات بر روی ورزشکاران زن نشان می‌دهد که نقص‌های عملکردی در تست‌های پرش تا ۹-۷ ماه پس از جراحی ادامه دارد و تقارن اندام تنها به ۹۷-۸۳ درصد می‌رسد (۲۱). این نقص‌ها نه تنها عملکرد ورزشی را کاهش می‌دهد، بلکه خطر آسیب مجدد را تا ۴۲ درصد در زنان جوان افزایش می‌دهد (۲۲).

توانبخشی پس از جراحی ACL نقش کلیدی در بازیابی عملکرد دارد. برنامه‌های توانبخشی شامل تمرینات زنجیره بسته (Closed Kinetic Chain; CKC) و باز (Open Kinetic Chain; OKC)، تمرینات عصبی-عضلانی و پلائیومتریک است (۲۳). تمرینات زنجیره بسته، که در آن‌ها پای آسیب‌دیده با سطح تماس دارد (مانند اسکوات یا هاپینگ)، مزایای ویژه‌ای در توانبخشی ACL دارند زیرا نیروهای فشاری توزیع شده بر مفصل زانو اعمال می‌کنند، که منجر به کاهش استرس بر لیگامان بازسازی شده و بهبود هماهنگی عضلانی می‌شود (۲۴). مطالعات نشان می‌دهد که تمرینات زنجیره بسته در مراحل اولیه توانبخشی، نسبت به زنجیره باز، به دلیل کاهش نیروهای برشی قدامی بر درشت نی، ایمن تر هستند و می‌توانند قدرت عضلانی چهارسر را بدون خطر آسیب مجدد افزایش دهند (۲۵). علاوه بر این، این تمرینات با شبیه‌سازی حرکات عملکردی روزانه و ورزشی،

حرفه‌ای بین ۰/۲۱ تا ۳/۶۷ درصد در سال است، در حالی که در جمعیت عمومی تنها ۰/۰۳ درصد است (۴). همچنین، در ورزش‌های تیمی مانند فوتبال، نرخ آسیب ACL در زنان تا ۱/۰۸ درصد در هر فصل گزارش شده است (۵). این آمارها بر اساس تحقیقات سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ گردآوری شده و نشان دهنده افزایش ۲۶ درصدی آسیب‌های جدی زانو در نوجوانان دختر طی سال‌های اخیر است (۶). عواملی مانند عدم تعادل عضلانی بین کوادرسیپس و همسترینگ، و الگوهای فرود نامناسب، خطر آسیب را افزایش می‌دهد (۷).

جراحی بازسازی ACL، به عنوان درمان استاندارد برای ورزشکاران، اغلب با استفاده از گرافت‌ها انجام می‌شود. گرافت‌ها به دو نوع اصلی تقسیم می‌شوند: اتوگرافت (Autograft) (گرافت گرفته شده از بدن خود بیمار) و الوگرافت (Allograft) (گرافت گرفته شده از اهداکننده). اتوگرافت‌ها شامل تاندون پاتلا (Bone-Patellar Tendon-Bone; BPTB)، تاندون همسترینگ و تاندون چهارسر (Quadriceps) هستند. اتوگرافت همسترینگ به دلیل مزایایی مانند درد کمتر پس از جراحی، حفظ تاندون پاتلا و کاهش خطر آرتروز پاتلوفمورال در ورزشکاران جوان‌تر ترجیح داده می‌شود (۹). با این حال، این روش با چالش‌هایی مانند ضعف پایدار همسترینگ همراه است، که می‌تواند تا ۱۸ ماه پس از جراحی ادامه یابد و بر عملکرد ورزشی تأثیر بگذارد (۱۰). الوگرافت‌ها، مانند تاندون آشیل یا تاندون تییبال قدامی اهداکننده، به دلیل عدم نیاز به برداشت بافت از بیمار، زمان جراحی کوتاه‌تر و درد کمتری دارند، اما خطر بالاتر رد پیوند و عفونت را به همراه دارند و معمولاً در ورزشکاران حرفه‌ای کمتر استفاده می‌شوند (۱۱). مطالعات نشان می‌دهد که نرخ شکست گرافت همسترینگ در زنان جوان حدود ۷/۷ درصد است، که بالاتر از گرافت پاتلا (۱/۱ درصد) است، و این تفاوت ممکن است به دلیل قطر کوچک‌تر گرافت در زنان باشد (۱۲). همچنین، الوگرافت‌ها در ورزشکاران جوان‌تر نرخ شکست بالاتری (تا ۱۲ درصد) نشان می‌دهند، که باعث شده اتوگرافت‌ها به‌ویژه همسترینگ در این گروه ترجیح داده شوند (۱۳). تحقیقات اخیر بر روی زنان ورزشکار فوتبال نشان می‌دهد که بازسازی با گرافت همسترینگ منجر به بازگشت ۹۵ درصد بیماران به سطح حرفه‌ای پس از ۱۲ ماه می‌شود، اما با خطر عفونت کمتر در

دهد (۳۸). با این حال ما در این مطالعه فرض کردیم که یک دوره تمرینات هاپینگ به مدت هشت هفته در دختران ورزشکار با سابقه جراحی بازسازی ACL با استفاده از اتوگرافت همسترینگ، منجر به بهبود معنی دار شاخص های عملکردی و کینماتیکی می شود، در مقایسه با گروه کنترل که برنامه توانبخشی استاندارد را دنبال می کنند.

روش بررسی

مطالعه حاضر از نوع نیمه تجربی با طرح پیش آزمون- پس آزمون و دو گروه مداخله ای (تجربی و کنترل) بود که در کمیته اخلاق دانشگاه آزاد تهران شرق ثبت گردید. جامعه آماری این پژوهش شامل دختران ورزشکار (با تمرکز بر رشته های تیمی مانند فوتبال، والیبال و بسکتبال) سنین ۱۸ تا ۳۰ سال بود که حداقل سه سال سابقه فعالیت حرفه ای یا نیمه حرفه ای داشتند، تحت جراحی بازسازی ACL با اتوگرافت همسترینگ قرار گرفته بودند و ساکن شهر تهران بودند. این رشته ها به دلیل مکانیسم های مشابه در تغییرات جهت، پرش و فرود (که عوامل اصلی آسیب ACL هستند) انتخاب شدند، و شیوع آسیب ACL در هر سه رشته بالا است (مانند نرخ ۲۱/۰۸ در فوتبال و مشابه در بسکتبال / والیبال). برای کنترل چرخه قاعدگی، شرکت کنندگان در فاز فولیکولار (روزهای ۱-۱۰ چرخه) ارزیابی و تمرین کردند؛ در دوران قاعدگی، جلسات تمرینی با شدت کم (گرم کردن سبک) جایگزین شد تا تأثیر هورمون ها بر عملکرد کاهش یابد، و این موضوع در فرم رضایت نامه ذکر شد. تعداد ۲۰ شرکت کننده با استفاده از نرم افزار G*Power نسخه ۳،۱،۹،۴ (توان آماری ۰/۸۰، سطح آلفا ۰/۰۵ و اندازه اثر متوسط ۰/۲۸ انتخاب شدند (۳۹). شرکت کنندگان به صورت تصادفی با استفاده از نرم افزار تولید اعداد تصادفی (Random Number Generator; RNG) به دو گروه تجربی (۱۰ نفر) و کنترل (۱۰ نفر) تقسیم شدند (۴۰). این مطالعه با طرح موازی و کورسازی دوسویه (شرکت کنندگان و تحلیل گر آماری از تخصیص گروهی بی اطلاع بودند) انجام شد. قبل از شروع پیش آزمون، شرکت کنندگان فرم رضایت نامه کتبی مبتنی بر اعلامیه هلسینکی را تکمیل کردند و آمادگی خود را برای شرکت در پژوهش اعلام نمودند. شرکت در مطالعه هیچ هزینه ای برای شرکت کنندگان نداشت و امکان خروج در هر مرحله بدون محدودیت فراهم بود. معیارهای ورود به

تقارن اندام و پایداری مفصل را بهبود می بخشند، که در زنان با ریسک بالاتر والگوس زانو، نقش کلیدی دارد (۲۶). تمرینات هاپینگ (Hopping Exercises; HE) به عنوان بخشی از تمرینات زنجیره بسته، با تأکید بر انتقال وزن بدن و فعال سازی همزمان عضلات چندمفصلی، می تواند هماهنگی عصبی-عضلانی را تقویت کند و به بهبود شاخص های کینماتیکی مانند زاویه والگوس زانو کمک کند، زیرا این تمرینات فشارهای کنترل شده ای را بر زنجیره حرکتی اعمال می کنند که منجر به سازگاری های بیومکانیکی می شود. تمرینات هاپینگ به عنوان بخشی از پلايومتریک، بر بهبود قدرت انفجاری، کنترل عصبی-عضلانی و کینماتیک فرود تمرکز دارند (۲۷). مطالعات نشان می دهد که این تمرینات می توانند نقص های کینماتیکی مانند کاهش فلکشن زانو و افزایش والگوس را بهبود بخشند (۲۸، ۲۷). برای مثال، برنامه های پلايومتریک هشت هفته ای در زنان منجر به افزایش قدرت عضلانی و کاهش زاویه ابداکشن زانو در فرود می شود (۲۹). تحقیقات اخیر بر روی زنان پس از ACL نشان می دهد که ترکیب پلايومتریک با تمرینات تقویتی همسترینگ، عملکرد را بهبود می بخشد و خطر آسیب را کاهش می دهد (۳۱، ۳۰). یک مطالعه موردی بر روی بازیکن بدمینتون زن نشان داد که پلايومتریک پس از جراحی، قدرت انفجاری و پایداری را افزایش می دهد (۳۲). همچنین، برنامه های هشت هفته ای پلايومتریک، عملکرد را در تست های پرش بهبود می بخشد (۳۳، ۲۷).

با وجود پیشرفت ها، خلاهای تحقیقاتی وجود دارد. بسیاری از مطالعات بر روی مردان یا جمعیت مختلط تمرکز دارند و کمتر به زنان ورزشکار با گرافت همسترینگ پرداخته اند (۳۴). همچنین، ارزیابی همزمان شاخص های عملکردی و کینماتیکی در برنامه های هاپینگ خاص، محدود است (۳۵). مطالعات اخیر نشان می دهد که نقص های پایدار در زنان نیاز به برنامه های تخصصی دارد، اما اثرات بلندمدت هاپینگ بر گرافت همسترینگ کمتر بررسی شده (۳۶، ۳۷). نوآوری این مطالعه در تمرکز بر دختران ورزشکار با سابقه جراحی ACL با اتوگرافت همسترینگ است. این تحقیق تأثیر یک دوره تمرینات هاپینگ را بر شاخص های عملکردی و کینماتیکی ارزیابی می کند، که می تواند به توسعه برنامه های توانبخشی به ویژه زنان کمک کند. این رویکرد، با توجه به شیوع بالاتر آسیب در زنان و چالش های گرافت همسترینگ، خلاهای موجود را پر می کند و می تواند نرخ بازگشت به ورزش را افزایش

بایودکس (Biodex Balance System SD). ساخت آمریکا) انجام شد. این دستگاه یکی از ابزارهای پیشرفته و معتبر برای اندازه‌گیری تعادل ایستا و پویا در تحقیقات بیومکانیک و توانبخشی است که به طور گسترده در مطالعات مرتبط با عملکرد حرکتی و بازسازی پس از آسیب‌های اسکلتی-عضلانی مانند جراحی بازسازی لیگامان صلیبی قدامی استفاده می‌شود. دستگاه بایودکس مجهز به یک پلتفرم متحرک است که می‌تواند در درجات مختلف پایداری (از ۱ تا ۱۲) تنظیم شود، به طوری که سطح ۱ ناپایدارترین و سطح ۱۲ پایدارترین حالت را نشان می‌دهد. در این مطالعه، سطح ۸ به عنوان سطح متوسط ناپایداری انتخاب شد تا تعادل ایستا در شرایطی چالش‌برانگیز اما قابل اجرا برای شرکت‌کنندگان ارزیابی شود. این سطح برای ورزشکاران با سابقه جراحی ACL مناسب است، زیرا توانایی حفظ تعادل در شرایط ناپایدار را بدون ایجاد خطر آسیب یا فشار بیش از حد بررسی می‌کند (۴۳). در طول آزمون، شرکت‌کنندگان روی پلتفرم بایودکس ایستادند و وظیفه داشتند با چشمان باز به مدت ۳۰ ثانیه تعادل خود را حفظ کنند. چشمان باز برای حذف اثر فقدان ورودی‌های بصری و تمرکز بر توانایی‌های عصبی-عضلانی و حس عمقی شرکت‌کنندگان انتخاب شد (۴۴). در این حالت، مرکز ثقل (Center of Pressure; COP) شرکت‌کننده توسط حسگرهای دستگاه ثبت شد و شاخص پایداری کلی (Overall Stability Index; OSI) محاسبه گردید (تصویر ۱). OSI معیاری کمی است که انحرافات مرکز ثقل در جهت‌های قدامی-خلفی و داخلی-خارجی را اندازه‌گیری می‌کند و نشان‌دهنده میزان پایداری تعادل ایستا است. مقادیر پایین‌تر OSI نشان‌دهنده تعادل بهتر و کنترل دقیق‌تر عصبی-عضلانی است، در حالی که مقادیر بالاتر به معنای ناپایداری بیشتر هستند (۱۷). برای انجام آزمون، شرکت‌کنندگان روی پلتفرم با پاهای باز به عرض شانه قرار گرفتند و دست‌ها در کنار بدن به صورت آزاد بودند. از آن‌ها خواسته شد که تا حد ممکن حرکت بدن را به حداقل برسانند و نگاه خود را به نقطه‌ای ثابت در فاصله دو متری در سطح چشم متمرکز کنند. هر آزمون شامل سه تکرار ۳۰ ثانیه‌ای با ۱ دقیقه استراحت بین هر تکرار بود تا خستگی به حداقل برسد. میانگین OSI از سه تکرار برای تحلیل نهایی استفاده شد. این روش استانداردسازی شده اطمینان می‌دهد که داده‌ها قابل اعتماد و قابل مقایسه هستند. پایایی دستگاه بایودکس برای اندازه‌گیری تعادل ایستا در مطالعات متعدد بررسی شده

مطالعه بر اساس پروتکل‌های سختگیرانه برای اطمینان از همگنی نمونه و کاهش عوامل مداخله‌گر تعیین شدند و شامل مواردی مانند، دختران ورزشکار ۱۸ تا ۳۰ ساله با سابقه حداقل سه سال فعالیت نیمه حرفه‌ای یا حرفه‌ای در ورزش‌های تیمی (مانند فوتبال، والیبال و بسکتبال)، (تعداد ورزشکاران: ۸ فوتبال، ۷ بسکتبال، ۵ والیبال؛ توزیع تصادفی بین گروه‌ها) با سابقه جراحی بازسازی ACL با اتوگرافت همسترینگ بین ۶ تا ۱۲ ماه قبل (تأیید شده توسط پزشک متخصص ارتوپدی با بررسی تصاویر رادیوگرافی و گزارش جراحی) بودند، نمره درد کمتر از ۳ در مقیاس بصری درد (Visual Analogue Scale; VAS) در حالت استراحت و کمتر از ۴ در حین فعالیت‌های سبک (برای اطمینان از عدم وجود درد حاد که بر عملکرد تأثیر بگذارد) (۴۱)، عدم سابقه جراحی دیگر در اندام تحتانی یا کم (به جز جراحی ACL مربوطه)، عدم وجود آسیب‌های همزمان مانند پارگی منیسک درجه سه یا آسیب غضروفی درجه چهار (تأیید شده توسط Magnetic Resonance Imaging; MRI)، عدم استفاده از برنامه‌های توانبخشی پلائیومتریک یا هاپینگ در شش ماه اخیر و تکمیل حداقل ۸۰ درصد جلسات توانبخشی استاندارد پس از جراحی (۲۷) و تنظیم جلسات تمرینی خارج از دوره قاعدگی برای جلوگیری از تأثیر هورمون‌ها بر عملکرد عصبی-عضلانی (۴۲) بود. معیارهای خروج نیز شامل: عدم همکاری در جلسات تمرینی (حضور کمتر از ۸۵ درصد جلسات)، بروز درد شدید (نمره VAS بیش از ۶) یا آسیب جدید در حین مطالعه، مشکلات شخصی یا پزشکی غیرمرتبط (مانند بارداری، بیماری‌های قلبی-عروقی یا اختلالات نورولوژیک) (۳۰)، مصرف داروهای تأثیرگذار بر عملکرد عضلانی (مانند کورتیکواستروئیدها یا بتابلاکرها) (۱۷)، عدم رعایت پروتکل‌های گرم کردن یا سرد کردن (۲۷) بود. قبل از شروع پیش‌آزمون، شرکت‌کنندگان یک پروتکل گرم کردن استاندارد ۱۰ دقیقه‌ای شامل دویدن آهسته، کشش‌های پویا برای اندام تحتانی (در حالت زانو صاف و خم شده) و تمرینات سبک تعادلی را انجام دادند (۴۰). ارزیابی‌ها در پیش‌آزمون و پس‌آزمون (پس از هشت هفته مداخله) توسط یک فیزیوتراپیست با سابقه هفت سال تجربه و تحت نظارت پزشک متخصص ارتوپدی انجام شد.

ارزیابی تعادل ایستا

ارزیابی تعادل ایستا در این مطالعه با استفاده از دستگاه



تصویر ۱: ارزیابی تعادل ایستا

می‌شود. فرد نمی‌تواند قبل از بازگشت به موقعیت شروع، پای خود را روی زمین لمس کند. هر گونه از دست دادن تعادل منجر به یک تلاش ناموفق خواهد شد. با این حال، پس از بازگشت به موقعیت شروع، آنها مجاز هستند پای خود را در پشت پای ایستاده قرار دهند. هر شرکت کننده ۲ تا ۳ آزمایش را برای آشنایی کامل انجام داد. زمان استراحت بین سه تلاش ۳۰ ثانیه بود و زمان استراحت هنگام تغییر به جهت دیگر ۶۰ ثانیه بود (۲۷) (تصویر ۲). پایایی آزمون Y-Balance Test در مطالعات متعدد با ضرایب ICC بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۹ گزارش شده است (۴۶). اعتبار آن نیز با همبستگی معنادار با خطر آسیب اندام تحتانی ($r=0/77$) تأیید شده است (۴۶).

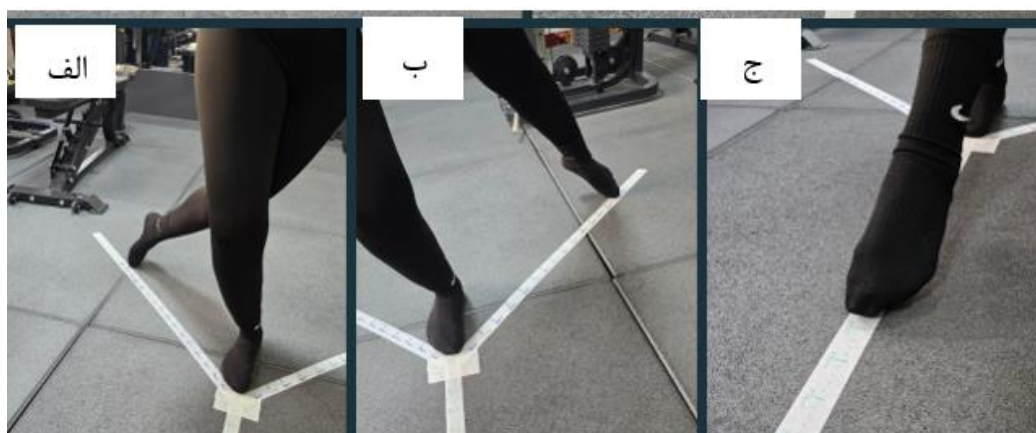
روش ارزیابی حس عمقی فلکشن زانو

حس عمقی زانو، که به توانایی درک موقعیت مفصل زانو بدون استفاده از حس بینایی اشاره دارد، با استفاده از نرم‌افزار Angle Meter 360 اندروید (۴۷) و در زاویه هدف ۴۵ درجه فلکشن زانو قابل ارزیابی است. در این روش، فرد در حالت نشسته قرار می‌گیرد و چشمان خود را می‌بندد تا از دریافت بازخورد بصری جلوگیری شود. ابتدا زانوی فرد به صورت غیرفعال توسط آزمونگر به زاویه ۴۵ درجه فلکشن منتقل شده و برای ۵ ثانیه در این موقعیت نگه داشته می‌شود تا فرد موقعیت مفصل را درک کند. سپس زانو به حالت خنثی

و ضرایب پایایی درونی (Interclass Correlation Coefficient; ICC) بیش از ۰/۹۰ گزارش شده است، که نشان‌دهنده دقت و تکرارپذیری بالای این ابزار است (۴۵).

ارزیابی تعادل پویا

جهت ارزیابی تعادل پویا از آزمون وای (Y) استفاده شد، برای شروع آزمون تعادل Y، طول واقعی اندام تحتانی از ستون فقرات ایلپاک فوقانی قدامی تا میانی اندازه‌گیری شد تا داده‌ها نرمال شود و افراد مورد مقایسه قرار گیرند. برای اندازه‌گیری طول پا، ابتدا از آزمودنی خواسته شد که روی پشت میز دراز بکشد، سپس فاصله بین ستون فقرات ایلپاک فوقانی قدامی تا قسمت انتهایی مچ پا داخلی دو بار برای هر فرد و هر پا تکرار شد. سپس میانگین به عنوان طول پا محاسبه می‌شود. آزمودنی در مرکز اتاق ایستاد، سپس روی یک پا و سپس روی پای دیگر استراحت کرد، روی دو پا به حالت عادی بازگشت و قبل از تلاش بعدی به مدت ۱۰ تا ۱۵ ثانیه در این وضعیت باقی ماند. سه تلاش در یک جهت باید قبل از حرکت در جهت دیگر تکمیل می‌شد و باید به صورت متوالی در جهت عقربه‌های ساعت یا خلاف جهت عقربه‌های ساعت انجام شد. انگشت شست پا فرد بالاترین نقطه ممکن را در جهت‌های مشخص شده بر روی متر نواری را لمس می‌کند، در حالی که فاصله بین مرکز نقطه تماس و نقطه لمس بر حسب سانتی‌متر اندازه‌گیری



تصویر ۲: ارزیابی تعادل پویا؛ الف: جهت خلفی-داخلی، ب: جهت خلفی خارجی، ج: جهت قدامی

بازگردانده شده و از فرد خواسته می‌شود تا به صورت فعال همان زاویه را بدون استفاده از بینایی بازسازی کند. نرم‌افزار Angle Meter 360 با قرارگیری روی ساق یا ران (با استفاده از گیره یا نوار چسب) زاویه بازسازی شده را اندازه‌گیری می‌کند. اختلاف بین زاویه هدف (۴۵ درجه) و زاویه بازسازی شده به عنوان خطای حس عمقی ثبت می‌شود. این فرآیند در ۳ تا ۵ تکرار انجام شده و میانگین خطاها محاسبه می‌گردد (۴۸). خطای کمتر از ۵ درجه به عنوان طبیعی در نظر گرفته می‌شود، در حالی که خطای بیش از ۱۰ درجه ممکن است نشان‌دهنده اختلال در حس عمقی ناشی از نقص زانو باشد. این روش به عنوان ابزاری ساده، کم‌هزینه و قابل دسترس برای غربالگری یا پیگیری بهبودی پس از تمرینات توان‌بخشی کاربرد دارد. پایایی در مطالعه حاضر برای این آزمون ۰/۹۲ گزارش شده است.

بازگردانده شده و از فرد خواسته می‌شود تا به صورت فعال همان زاویه را بدون استفاده از بینایی بازسازی کند. نرم‌افزار Angle Meter 360 با قرارگیری روی ساق یا ران (با استفاده از گیره یا نوار چسب) زاویه بازسازی شده را اندازه‌گیری می‌کند. اختلاف بین زاویه هدف (۴۵ درجه) و زاویه بازسازی شده به عنوان خطای حس عمقی ثبت می‌شود. این فرآیند در ۳ تا ۵ تکرار انجام شده و میانگین خطاها محاسبه می‌گردد (۴۸). خطای کمتر از ۵ درجه به عنوان طبیعی در نظر گرفته می‌شود، در حالی که خطای بیش از ۱۰ درجه ممکن است نشان‌دهنده اختلال در حس عمقی ناشی از نقص زانو باشد. این روش به عنوان ابزاری ساده، کم‌هزینه و قابل دسترس برای غربالگری یا پیگیری بهبودی پس از تمرینات توان‌بخشی کاربرد دارد. پایایی در مطالعه حاضر برای این آزمون ۰/۹۲ گزارش شده است.

ارزیابی کینماتیک زانو

تکلیف فرود تک‌پا (Single-Leg Landing; SLL) شامل انجام سه پرش و فرود یک‌طرفه بود. پس از اطمینان از راحتی شرکت‌کنندگان با تکلیف، از آن‌ها خواسته شد سه تکرار تمرینی با پای غالب انجام دهند. تکلیف پرش و فرود شامل پریدن از جعبه‌ای به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر، فرود با همان پا روی علامتی در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از جعبه و حفظ موقعیت فرود به مدت ۳ ثانیه بود (۲۰۱). برای تحلیل کینماتیک زانو از روش دوبعدی استفاده شد و زوایای صفحه فرونتال برای هم‌ترازی والگوس زانو اندازه‌گیری شد (۴۰). یک دوربین دیجیتال (Canon

برنامه تمرینی

برنامه تمرینی هاپینگ برگرفته از مطالعه محمدی‌نیا و همکاران می‌باشد (۲۷). پروتکل تمرینی شامل شش نوع تمرین هاپینگ بود که به مدت هشت هفته، سه جلسه در هفته و هر جلسه به مدت ۳۰ دقیقه اجرا شد. شدت تمرینات به صورت پیش‌رونده با افزودن تمرینات و ست‌ها

کمتر از ۰/۰۰۱ است و معنی دار می باشد. آزمون های تعقیبی بونفرونی تأیید کرد که بهبودهای گروه تمرینی در مقایسه پیش آزمون-پس آزمون معنی دار است ($p < 0/001$) برای همه متغیرها) و تفاوت بین گروه تجربی و کنترل در پس آزمون معنی دار است ($p < 0/001$) برای همه متغیرها)، که اثربخشی تمرینات هاپینگ را در رفع نقص های عملکردی و کینماتیکی در ورزشکاران با سابقه جراحی ACL نشان می دهد.

بحث و نتیجه گیری

یافته های این مطالعه نشان داد که هشت هفته تمرینات هاپینگ در دختران ورزشکار با سابقه جراحی بازسازی ACL با اتوگرافت همسترینگ، منجر به بهبود معنی دار تعادل ایستا (OSI)، حس عمقی زانو، زاویه والگوس زانو (FPPA) و تعادل پویا در تمام جهات آزمون Y (قدامی، خلفی-داخلی، خلفی - خارجی و کل) شد، در حالی که گروه کنترل هیچ تغییر معناداری نشان نداد. این بهبودها با اندازه اثرهای بزرگ همراه بود و درصد تغییرات منفی در نقص ها (مانند کاهش ۶۱/۳۵ درصدی در OSI و ۴۴/۶۷ درصدی در خطای حس عمقی) و مثبت در عملکرد (مانند افزایش ۱۵/۹۲ درصدی در تعادل قدامی) را نشان داد. این نتایج با مطالعات همسو مانند مطالعه Kasmi و همکاران (۳۰) همخوانی دارد که نشان داد ترکیب تمرینات پلايومتریک با تقویتی پس از ACL منجر به بهبود عملکرد و کاهش خطر آسیب مجدد در زنان ورزشکار می شود (۳۰)، و همچنین با مطالعه محمدی نیا و همکاران (۲۷) که تمرینات هاپینگ را بر تعادل و عملکرد عضلانی در ورزشکاران با ناپایداری مچ پا بررسی کرد و بهبودهای مشابهی گزارش داد (۲۷). علاوه بر این، تمرینات هاپینگ به عنوان بخشی از زنجیره حرکتی بسته، با تأکید بر ادغام عضلات چندمفصلی، می تواند کینماتیک کلی اندام تحتانی را بهبود بخشد و خطر والگوس دینامیک را کاهش دهد، زیرا این رویکرد فشارهای توزیع شده ای را بر مفاصل اعمال می کند که سازگاری های بیومکانیکی پایداری ایجاد می کند (۵۱، ۴۲). تحقیقات نشان می دهد که تمرینات زنجیره بسته در مقایسه با زنجیره باز، نیروهای برشی کمتری بر لیگامان ACL اعمال می کنند و بنابراین برای مراحل اولیه توانبخشی ایمن تر هستند، که این امر می تواند توضیح دهنده بهبود تعادل و پایداری در مطالعه حاضر

افزایش یافت. جدول ۱ پروتکل تمرینات هاپینگ را نشان می دهد (۱). زمان استراحت بین ست ها ۳۰ ثانیه و بین تمرینات ۱ دقیقه بود. در طول تمرین، به بازیکنان فوتبال بازخوردهایی در مورد کنترل وضعیت بدن ارائه شد تا از بروز آسیب جلوگیری شود. همچنین، به آنها دستورالعمل هایی در مورد موقعیت دست ها (آزاد، پشت کمر یا روی سینه)، «حفظ تمرکز» و «احساس تماس پا با زمین، اجتناب از هم ترازای والگوس کلی اندام تحتانی در هنگام فرود و کاهش نیروهای عکس العمل زمین» داده شد (۲۷).

با توجه به طرح پژوهش، تجزیه و تحلیل در دو سطح توصیفی و استنباطی انجام شد. در سطح توصیفی از شاخص های میانگین و انحراف معیار استفاده شد (جدول ۲). در سطح استنباطی، پس از بررسی و تأیید نرمال بودن توزیع داده ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک و همگنی واریانس ها با استفاده از آزمون لوین، از تحلیل واریانس ترکیبی 2×2 (گروه $\times$ زمان) با آزمون های تعقیبی اصلاح شده بونفرونی استفاده شد. درصد تغییر نسبت به پیش آزمون محاسبه و مقایسه شد. سطح معناداری آماری با $p < 0/05$ تعیین شد. برای بررسی تفاوت های معنادار بین گروهی، نتایج نشان دهنده تفاوت معنادار بین گروه تجربی و کنترل بود. اندازه اثر درون گروهی و بین گروهی با استفاده از اتای سهمی (Partial Eta Squared; η^2) محاسبه شد، با آستانه های ۰/۲ (کوچک)، ۰/۵ (متوسط) و ۰/۸ (بزرگ) بر اساس راهنمای کوهن (۵۰). تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۷ انجام شد (۴۰).

یافته ها

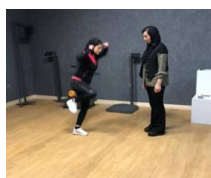
نتایج آزمون شاپیرو-ویلک برای نرمال بودن توزیع داده ها نشان داد که تمام متغیرهای وابسته در پیش آزمون و پس آزمون در هر دو گروه توزیع نرمال دارند ($p > 0/05$) برای همه متغیرها). نتایج آزمون لوین برای همگنی واریانس ها نیز نشان دهنده همگنی واریانس بین گروه تجربی و کنترل در پیش آزمون و پس آزمون برای تمام متغیرهای وابسته است ($p > 0/05$) برای هر متغیر).

تحلیل واریانس ترکیبی 2×2 (گروه $\times$ زمان) (جدول ۳) پس از بررسی پذیره های زیربنایی (نرمال بودن با شاپیرو-ویلک و همگنی واریانس با لوین، که همه $p > 0/05$ بودند) نشان داد که مقدار p اثر متقابل گروه $\times$ زمان برای تمام متغیرها

جدول ۱: برنامه تمرینی هاپینگ

هفته	حجم تمرین (تعداد جهش ها)	نوع تمرین	ست و تکرار
اول	۷۰	هاپینگ به طرفین با دو پا (دست ها آزاد)	۳×۱۰
		هاپینگ به جلو عقب با دو پا (دست ها آزاد)	۲×۱۰
		هاپینگ با حرکت به سمت جلو با دو پا (دست ها آزاد)	۲×۱۰
دوم	۹۰	هاپینگ به طرفین با دو پا (دست ها روی سینه)	۲×۱۵
		هاپینگ به جلو عقب با دو پا (دست ها آزاد)	۲×۱۰
		هاپینگ با حرکت به سمت جلو با دو پا (دست ها آزاد)	۲×۱۰
		هاپینگ به طرفین با یک پا (دست ها آزاد)	۵×۴
سوم	۱۰۰	هاپینگ به طرفین با یک پا (دست ها روی سینه)	۳×۱۰
		هاپینگ به جلو عقب با یک پا (دست ها آزاد)	۲×۱۰
		هاپینگ با حرکت به سمت جلو با دو پا (دست ها روی سینه)	۳×۱۰
		هاپینگ به صورت زیگزاگ با دو پا (دست ها آزاد)	۲×۱۰
چهارم	۱۱۰	هاپینگ به طرفین با یک پا (دست ها روی سینه)	۲×۱۰
		هاپینگ به جلو عقب با یک پا (دست ها روی سینه)	۲×۱۰
		هاپینگ با حرکت به سمت جلو با یک پا (دست ها آزاد)	۳×۱۰
		هاپینگ به صورت زیگزاگ با یک پا (دست ها آزاد)	۲×۱۰
		هاپینگ به صورت مربع با دو پا (دست ها آزاد)	۲×۱۰
پنجم و ششم	۱۲۰	هاپینگ به طرفین با یک پا (دست ها پشت سر)	۲×۱۰
		هاپینگ به جلو به جلو با یک پا (دست ها پشت سر)	۲×۱۰
		هاپینگ با حرکت به سمت جلو با یک پا (دست ها روی سینه)	۲×۱۰
		هاپینگ به صورت زیگزاگ با یک پا (دست ها روی سینه)	۲×۱۰
		هاپینگ به صورت مربع با یک پا (دست ها آزاد)	۲×۱۰
		هاپینگ به صورت هشت لاتین با دو پا (دست ها آزاد)	۲×۱۰
هفتم و هشتم	۱۳۰	هاپینگ به طرفین با یک پا (دست ها پشت سر)	۳×۱۰
		هاپینگ به جلو عقب با یک پا	۲×۱۰
		هاپینگ با حرکت به سمت جلو با یک پا (دست ها پشت سر)	۲×۱۰
		هاپینگ زیگزاگ با یک پا (دست ها پشت سر)	۲×۱۰
		هاپینگ به صورت مربع با یک پا (دست ها روی سینه)	۲×۱۰
		هاپینگ به صورت هشت لاتین با یک پا (دست ها آزاد)	۲×۱۰

نمونه‌ای از تمرینات



هاپینگ تک پا



هاپینگ زیگزاگ



هاپینگ رو به جلو



هاپینگ به طرفین

جدول ۲: مقایسه اطلاعات دموگرافیک بین دو گروه مطالعه

شاخص	گروه	انحراف معیار $\pm$ میانگین	آماره آزمون (T)	P- مقدار
سن (سال)	تمرینی	$25/10 \pm 3/39$	0/863	0/40
	کنترل	$23/70 \pm 3/49$		
قد (متر)	تمرینی	$1/69 \pm 0/07$	- 0/105	0/917
	کنترل	$1/69 \pm 0/05$		
وزن (کیلوگرم)	تمرینی	$61/59 \pm 4/24$	- 1/601	0/127
	کنترل	$64/42 \pm 3/19$		
شاخص توده بدنی (کیلوگرم/مترمربع)	تمرینی	$21/66 \pm 1/65$	- 1/20	0/246
	کنترل	$22/58 \pm 1/60$		
مدت زمان از بازسازی (ماه)	تمرینی	$8/80 \pm 2/09$	- 0/111	0/913
	کنترل	$8/90 \pm 1/70$		
سابقه ورزشی (سال)	تمرینی	$5/45 \pm 1/35$	0/453	0/565
	کنترل	$5/12 \pm 1/44$		
طول اندام تحتانی (سانتی متر)	تمرینی	$86/84 \pm 3/88$	0/256	0/800
	کنترل	$86/46 \pm 2/60$		

جدول ۳: نتایج آزمون ترکیبی ۲×۲ در متغیرهای پژوهش

متغیر	گروه	پیش آزمون میانگین $\pm$ انحراف معیار	پس آزمون میانگین $\pm$ انحراف معیار	درصد تغییرات	آماره آزمون (P) - درون گروهی	اندازه اثر	P- مقدار اثر متقابل
تعالادل ایستا (ثانیه)	تمرینی	$2/03 \pm 0/28$	$1/31 \pm 0/26$	$35/61\%$	<0/001*	0/712	<0/001*
	کنترل	$2/02 \pm 0/27$	$1/90 \pm 0/11$	$5/69\%$		0/125	
خطای حس عمقی (درجه)	تمرینی	$7/44 \pm 1/13$	$2/42 \pm 0/54$	$67/44\%$	<0/001*	0/862	<0/001*
	کنترل	$7/20 \pm 1/07$	$5/84 \pm 0/87$	$18/95\%$		0/164	
زاویه والگوس (درجه)	تمرینی	$13/76 \pm 1/46$	$7/07 \pm 1/14$	$48/62\%$	<0/001*	0/729	<0/001*
	کنترل	$13/39 \pm 1/86$	$13/46 \pm 1/30$	$0/52\%$		0/001	
تعالادل پویا، قدامی (درصد)	تمرینی	$69/26 \pm 3/71$	$80/29 \pm 2/56$	$15/92\%$	<0/001*	0/783	<0/001*
	کنترل	$69/65 \pm 3/71$	$71/08 \pm 2/50$	$2/05\%$		0/045	
تعالادل پویا، خلفی - داخلی (درصد)	تمرینی	$100/06 \pm 4/98$	$111/32 \pm 7/07$	$11/26\%$	<0/001*	0/655	<0/001*
	کنترل	$98/13 \pm 7/08$	$101/22 \pm 3/81$	$3/15\%$		0/068	
تعالادل پویا، خلفی - خارجی (درصد)	تمرینی	$95/65 \pm 2/38$	$110/75 \pm 6/92$	$15/78\%$	<0/001*	0/704	<0/001*
	کنترل	$93/13 \pm 6/12$	$93/59 \pm 3/90$	$0/49\%$		0/003	
تعالادل پویا-کل (درصد)	تمرینی	$88/34 \pm 1/90$	$100/79 \pm 3/70$	$14/08\%$	<0/001*	0/831	<0/001*
	کنترل	$86/94 \pm 3/52$	$88/62 \pm 2/14$	$1/93\%$		0/034	

η^2 : اندازه اثر، * وجود معنی داری در درون گروه.

بر کینماتیک داشته باشند، به ویژه اگر بدون ترکیب با تمرینات تعادلی اجرا شوند (۳۵)، که این تفاوت ممکن است به دلیل تمرکز کمتر بر جنسیت و نوع گرافت در آن مطالعه

باشد (۲۶). با این حال، مطالعات ناهمسو مانند مطالعه Diermeier و همکاران (۳۵) نشان می دهد که برنامه های پلائیومتریک ممکن است در برخی موارد اثرات محدودتری

باشد.

در مورد تعادل ایستا، کاهش OSI در گروه تجربی با مطالعات همسو مانند مطالعه Harrison و همکاران (۲۸) که تمرینات پلايومتریک را بر تعادل ایستا در دوندگان زن مبتدی بررسی کرد و بهبود کنترل عصبی-عضلانی را گزارش داد (۲۸)، و مطالعه جدید Qin و همکاران (۴) که آموزش عصبی-عضلانی شامل پلايومتریک را بر تعادل ایستا پس از ACL ارزیابی کرد و کاهش نوسانات مرکز ثقل را نشان داد (۴)، همخوانی دارد. مکانیسم اثرگذاری احتمالاً از طریق افزایش فعال سازی عضلات تثبیت کننده مانند گلوئوس و همسترینگ است که حس عمقی و کنترل حرکتی را بهبود می بخشد (۲۰، ۱۷)، و این تمرینات با ایجاد استرس کنترل شده بر سیستم عصبی-عضلانی، سازگاری های عصبی-عضلانی را تسهیل می کنند که منجر به کاهش ناپایداری می شود (۲۳). با این حال، مطالعات ناهمسو مانند مطالعه Lowe (۱۰) نشان می دهد که تمرینات ارتعاشی همسترینگ ممکن است اثرات مشابهی بدون پلايومتریک داشته باشند (۱۰)، که این ممکن است به دلیل تمرکز بر فرکانس ارتعاش به جای جهش باشد، هرچند در زنان با گرفت همسترینگ، هاپینگ ممکن است مؤثرتر باشد زیرا ضعف پایدار همسترینگ را هدف قرار می دهد (۱۶، ۱۰).

برای حس عمقی زانو، کاهش خطای فلکشن ۴۵ درجه با مطالعات همسو مانند مطالعه Moiroux-Sahraoui و همکاران (۲۰) که آموزش عصبی-عضلانی را بر حس عمقی پس از ACL بررسی کرد و بهبود درک موقعیت مفصل را گزارش داد (۲۰)، و مطالعه جدید Kasmi و همکاران (۳۰) که پلايومتریک را بر حس عمقی در ورزشکاران زن پس از ACL ارزیابی کرد و کاهش خطا تا ۶۷ درصد را نشان داد (۳۰)، سازگار است. مکانیسم اثرگذاری از طریق افزایش ورودی های حس عمقی از گیرنده های عضلانی و مفصلی است که با تکرار جهش ها تقویت می شود، و این تمرینات تأخیر فعال سازی همسترینگ را کاهش می دهد که در زنان پس از جراحی شایع است (۲۰). مطالعات ناهمسو مانند مطالعه Hillier و همکاران (۴۸) نشان می دهد که تمرینات تعادلی ممکن است بدون پلايومتریک اثرات مشابهی داشته باشند (۴۸)، اما در جمعیت زنان ورزشکار با ACL، ترکیب هاپینگ ممکن است برتر باشد زیرا قدرت انفجاری را نیز هدف قرار می دهد (۳۰، ۲۳).

در خصوص زاویه والگوس زانو (FPPA)، کاهش آن در فرود تک پا با مطالعات همسو مانند مطالعه ساکی و مدهوش (۲۹) که پلايومتریک هشت هفته ای را بر والگوس دینامیک در زنان بررسی کرد و کاهش زاویه ابداکشن را گزارش داد (۲۹)، و مطالعه جدید Franco و همکاران (۳۴) که برنامه های پیشگیری شامل پلايومتریک را بر کینماتیک والگوس پس از ACL ارزیابی کرد و بهبود هم ترازی را نشان داد (۳۴)، همخوانی دارد. مکانیسم اثرگذاری احتمالاً از طریق بهبود الگوهای عصبی-عضلانی و افزایش قدرت عضلات ابداکتور هیپ است که والگوس را کاهش می دهد و خطر آسیب مجدد را تا ۴۲ درصد پایین می آورد (۲۲)، و هاپینگ با تمرکز بر فرود کنترل شده، چرخش خارجی تیبیا را تعدیل می کند (۱۹). مطالعات ناهمسو مانند مطالعه Takata (۱۹) نشان می دهد که تغییرات کینماتیکی ممکن است پایدار نباشند اگر بدون نظارت بلندمدت باشند (۱۹)، اما در این مطالعه، تمرکز بر زنان جوان با گرفت همسترینگ این اثرات را تقویت کرد.

برای تعادل پویا در آزمون Y (شامل جهات قدامی، خلفی - داخلی، خلفی - خارجی و کل)، افزایش نمرات با مطالعات همسو مانند مطالعه Al Attar و همکاران (۳۱) که پلايومتریک را بر تعادل پویا در ورزشکاران بررسی کرد و بهبود در تمام جهات را گزارش داد (۳۱)، و مطالعه جدید Diermeier و همکاران (۳۵) که ترکیب تعادل و پلايومتریک را بر Y-balance پس از ACL ارزیابی کرد و افزایش ۱۴ درصدی کلی را نشان داد (۳۵)، سازگار است. مکانیسم اثرگذاری از طریق افزایش قدرت انفجاری و کنترل عصبی-عضلانی است که دسترسی در جهات مختلف را بهبود می بخشد، و این تمرینات عدم تقارن را کاهش می دهند که در زنان تا ۲۴ ماه پس از جراحی پایدار است (۲۱). مطالعات ناهمسو مانند مطالعه Poehling-Monaghan و همکاران (۳۷) نشان می دهد که گرفت پتلا ممکن است اثرات متفاوتی بر تعادل پویا داشته باشد (۳۷)، اما در گرفت همسترینگ، هاپینگ ضعف همسترینگ را جبران می کند (۱۵، ۹). با توجه به حجم بالای پرس ها در پروتکل، خستگی احتمالی با زمان استراحت کافی (۳۰ ثانیه بین ست ها و ۱ دقیقه بین تمرینات) و نظارت بر فرم صحیح کنترل شد تا تأثیر منفی بر قدرت عضلات چهارسر و والگوس به حداقل برسد. به طور کلی، این یافته ها بر اهمیت برنامه های جنسیت محور تأکید دارند و

سپاسگزاری

از همه شرکت کنندگان و پزشک محترم که در این مطالعه مشارکت و همکاری کردند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنیم. کد اخلاق از پژوهشگاه تربیت بدنی با شناسه IR.IAU.TSH.REC.1401.012 اخذ شد. این مقاله حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد است.

نقش نویسندگان

تمام نویسندگان در طراحی مطالعه، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل نتایج و نوشتن مقاله مشارکت داشته‌اند و نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

منابع مالی

مطالعه حاضر تحت هیچ حمایت مالی قرار نگرفت.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تعارض منافی در ارتباط با این مقاله وجود ندارد.

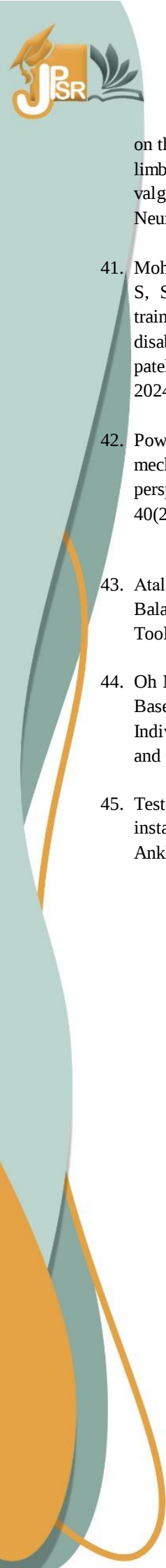
منابع

1. Hewett TE, Myer GD. The mechanistic connection between the trunk, hip, knee, and anterior cruciate ligament injury. *Exerc Sport Sci Rev.* 2011; 39(4):161-166.
2. Sutton KM, Bullock JM. Anterior cruciate ligament rupture: differences between males and females. *J Am Acad Orthop Surg.* 2013; 21(1):41-50.
3. Davison RR, Smith PM, Hopker J, Price MJ, et al. *Sport and Exercise Physiology Testing Guidelines*: Routledge; 2022.
4. Qin Z, Qin Y, Wang J. Neuromuscular Training Effects on Athletes' Jumping and Lower Limb Injury: A Systematic Review. *Journal of Motor Behavior.* 2024; 56(5): 600-613.
5. Ross AG, McKay MJ, Pappas E, Peek K. Insurance cost and injury characteristics of anterior cruciate ligament injuries in sub-elite football: A population analysis involving 3 years of Australian insurance data. *J Sci Med Sport.* 2023; 26(7): 365-71.

پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده اثرات بلندمدت (بیش از ۱۲ ماه) و ترکیب با فناوری‌های واقعیت مجازی را بررسی کنند. محدودیت‌های این مطالعه شامل چندین جنبه است که می‌تواند بر تعمیم‌پذیری و تفسیر نتایج تأثیر بگذارد. حجم نمونه کوچک (۲۰ نفر، ۱۰ نفر در هر گروه) ممکن است توانایی شناسایی تفاوت‌های ظریف‌تر بین گروه‌ها را محدود کرده باشد، به‌ویژه با توجه به تنوع در پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیومکانیکی افراد پس از جراحی ACL تمرکز جغرافیایی بر ورزشکاران ساکن تهران ممکن است تعمیم نتایج به جمعیت‌های دیگر با ویژگی‌های فرهنگی، تغذیه‌ای یا دسترسی متفاوت به امکانات ورزشی را محدود کند. علاوه بر این، عدم بررسی اثرات بلندمدت (بیش از هشت هفته) تمرینات هاپینگ، مانند پایداری نتایج یا نرخ بازگشت به ورزش حرفه‌ای، یک محدودیت کلیدی است، زیرا مطالعات نشان داده‌اند که نقص‌های کینماتیکی و عملکردی در زنان تا ۲۴ ماه پس از جراحی ممکن است پایدار بمانند. استفاده از روش دوبعدی برای تحلیل کینماتیک زانو (FPPA) به جای روش‌های سه‌بعدی پیشرفته‌تر، ممکن است دقت اندازه‌گیری حرکات پیچیده‌تر زانو را کاهش داده باشد، به‌ویژه در ارزیابی چرخش‌های تیبیا که در زنان با گرفتار همسترینگ شایع است. همچنین، عدم در نظر گرفتن متغیرهای روان‌شناختی مانند اعتماد به نفس یا ترس از آسیب مجدد، که می‌تواند بر عملکرد در آزمون‌های پرش و تعادل تأثیر بگذارد، یک خلأ بالقوه است، زیرا تحقیقات اخیر نقش عوامل روان‌شناختی را در توانبخشی ACL برجسته کرده‌اند. در نهایت، فقدان داده‌های مربوط به شدت فعالیت ورزشی شرکت کنندگان در خارج از جلسات تمرینی ممکن است بر نتایج اثر گذاشته باشد، زیرا تفاوت در فعالیت‌های روزمره می‌تواند بر بهبود عصبی-عضلانی تأثیر بگذارد. علاوه بر این، عدم ثبت مطالعه در پایگاه‌های کارآزمایی بالینی (مانند IRCT) یک محدودیت است، زیرا این مطالعه نیمه‌تجربی با حجم نمونه کوچک و هدف بررسی اولیه اثربخشی پروتکل بود، نه یک کارآزمایی بالینی بزرگ مقیاس که الزاماً نیاز به ثبت داشته باشد؛ با این حال، این امر می‌تواند شفافیت و تکرارپذیری مطالعه را تحت تأثیر قرار دهد. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با نمونه بزرگ‌تر، پیگیری بلندمدت، استفاده از فناوری‌های سه‌بعدی و در نظر گرفتن عوامل روان‌شناختی این محدودیت‌ها را برطرف کنند.

6. Gagnier JJ, Morgenstern H, Chess L. Interventions designed to prevent anterior cruciate ligament injuries in adolescents and adults: a systematic review and meta-analysis. *The Am J Sports Med.* 2013; 41(8): 1952-1962.
7. Fu K, Yu Y, Li J, Chen J, et al. Emerging strategies in anterior cruciate ligament (ACL) injury prevention: from biomechanics to neuromuscular training. *Res Sports Med.* 2025:1-22.
8. Aune AK, Holm I, Risberg MA, Jensen HK, Steen H. Four-strand hamstring tendon autograft compared with patellar tendon-bone autograft for anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized study with two-year follow-up. *Am J Sports Med.* 2001; 29(6): 722-728.
9. Mihelic R, Jurdana H, Jotanovic Z, Madjarevic T, Tudor A. Long-term results of anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison with non-operative treatment with a follow-up of 17-20 years. *Int Orthop* 2011; 35(7): 1093-1097.
10. Lowe TW. Hamstring Vibration: Restoring Quadriceps Function and Promoting Joint Health Following ACL Reconstruction: The University of Texas at Austin; 2022.
11. Paul BR, Robaina J, Parmar R, Carter T, Shah A. Myths and Facts About Allograft Use in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Detailed Review of the Literature. *JBJS rev.* 2025; 13(4): e25.
12. Tiplady A, Love H, Young SW, Frampton CM. Comparative study of ACL reconstruction with hamstring versus patellar tendon graft in young women: a cohort study from the New Zealand ACL Registry. *Am J Sports Med.* 2023; 51(3): 627-633.
13. Cruz Jr AI, Beck JJ, Ellington MD, Mayer SW, et al. Failure rates of autograft and allograft ACL reconstruction in patients 19 years of age and younger: a systematic review and meta-analysis. *JBJS Open Access.* 2020; 5(4): e20.00106.
14. Burks RT, Crim J, Brown N, Fink B, Greis PE. A prospective randomized clinical trial comparing arthroscopic single-and double-row rotator cuff repair: magnetic resonance imaging and early clinical evaluation. *Am J Sports Med.* 2009; 37(4): 674-682.
15. DeFazio MW, Curry EJ, Gustin MJ, Sing DC, et al. Return to sport after ACL reconstruction with a BTB versus hamstring tendon autograft: a systematic review and meta-analysis. *Orthop J Sports Med.* 2020; 8(12): 2325967120964919.
16. Salmon L, Heath E, Akrawi H, Roe J, Pinczewski L. 20 year outcomes of ACL reconstruction with hamstring tendon autograft. The catastrophic effect of age and posterior tibial slope. *Am J Sports Med.* 2018; 46(3): 531-543
17. Paterno MV, Kiefer AW, Bonnette S, Riley MA, et al. Prospectively identified deficits in sagittal plane hip-ankle coordination in female athletes who sustain a second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. *Clin Biomech.* 2015; 30(10): 1094-1101.
18. Nawasreh Z, Logerstedt D, Cummer K, Axe M, et al. Functional performance 6 months after ACL reconstruction can predict return to participation in the same preinjury activity level 12 and 24 months after surgery. *Br J Sports Med.* 2018; 52(6): 375-.
19. Takata AA. The Effect of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction on Long Term Post-Traumatic Knee Osteoarthritis Risk Due to Persistent Biomechanical Loading Alterations: University of Hawai'i at Manoa; 2024.
20. Moiroux--Sahraoui A, Mazeas J, Gold M, Kakavas G, Forelli F. Neuromuscular Control Deficits After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Pilot Study Using Single-Leg Functional Tests and Electromyography. *J Funct Morphol Kinesiol.* 2025; 10(1): 98.
21. Becerra-Patiño BA, Paucar-Urbe JD, Olivares-Arancibia J, Ojeda-Aravena A, Yáñez-Sepúlveda R, Gamonales JM, et al. Mapping the knowledge of research trends in sports performance asymmetries from 2015 to 2024: a bibliometric study and analysis of the most-cited papers. *Sports.* 2025; 13(4):93.
22. Olivares-Jabalera J, Fílder-Ruger A, Dos' Santos T, Afonso J, et al. Exercise-based training strategies to reduce the incidence or mitigate the risk factors of anterior cruciate ligament injury in adult football (soccer) players: a systematic review. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(24):13351.

23. Tsarhou C, Liveris NI, Xergia SA, Papageorgiou G, et al. ACL injury etiology in its context: A systems thinking, group model building approach. *J Clin Med*. 2024; 13(16): 4928.
24. Jaberzadeh S, Yeo D, Zoghi M. The effect of altering knee position and squat depth on VMO: VL EMG ratio during squat exercises. *Physiother Res Int*. 2016; 21(3): 164-173.
25. Fleming BC, Oksendahl H, Beynnon BD. Open-or closed-kinetic chain exercises after anterior cruciate ligament reconstruction? *Exerc Sport Sci Rev*. 2005; 33(3): 134-1340.
26. Pamboris GM, Pavlou K, Paraskevopoulos E, Mohagheghi AA. Effect of open vs. closed kinetic chain exercises in ACL rehabilitation on knee joint pain, laxity, extensor muscles strength, and function: a systematic review with meta-analysis. *Front Sports Act Living*. 2024; 6: 1416690.
27. Mohammadi Nia Samakosh H, Brito JP, Shojaedin SS, Hadadnezhad M, Oliveira R, editors. What does provide better effects on balance, strength, and lower extremity muscle function in professional male soccer players with chronic ankle instability? Hopping or a balance plus strength intervention? A randomized control study. *Healthcare*, 10 (10), 1822.
28. Harrison K, Williams III DSB, Darter BJ, Zernicke RF, Shall M, Finucane S. Effect of strength and plyometric training on kinematics in female novice runners. *J Strength Cond Res*. 2024;38(6):1048-1055.
29. Saki F, Madhosh M. Effect of eight weeks plyometric training on pelvic and knee alignment in female with dynamic knee valgus. *Phys Treat*. 2019; 6(12): 21-29.
30. Kasmi S, Zouhal H, Hammami R, Clark CC, et al. The effects of eccentric and plyometric training programs and their combination on stability and the functional performance in the post-ACL-surgical rehabilitation period of elite female athletes. *Front Physiol*. 2021; 12: 688385.
31. Al Attar WSA, Bakhsh JM, Khaledi EH, Ghulam H, Sanders RH. Injury prevention programs that include plyometric exercises reduce the incidence of anterior cruciate ligament injury: a systematic review of cluster randomised trials. *Journal of physiotherapy*. 2022;68(4):255-61.
32. Chandra S, Sharma A, Malhotra N, Rizvi MR, Kumari S. Effects of plyometric training on the agility, speed, and explosive power of male collegiate badminton players. *J Lifestyle Med*. 2023; 13(1): 52-58.
33. Buckthorpe M, Della Villa F. Recommendations for plyometric training after ACL reconstruction-A clinical commentary. *Int J Sports Phys Ther*. 2021; 16(3): 879.
34. Franco D, Ambrosio L, Za P, Maltese G, et al. Effective prevention and rehabilitation strategies to mitigate non-contact anterior cruciate ligament injuries: A narrative review. *Appl Sci*. 2024; 14(20): 9330.
35. Diermeier T, Rothrauff BB, Engebretsen L, Lynch AD, et al. Treatment after anterior cruciate ligament injury: panther symposium ACL treatment consensus group. *Orthop J Sports Med*. 2020; 8(6): 2325967120931097.
36. Bonanzinga T, Grassi A, Altomare D, Lucidi GA, et al. High return to sport rate and few re-ruptures at long term in professional footballers after anterior cruciate ligament reconstruction with hamstrings. *Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy*. 2022; 30(11): 3681-3688.
37. Poehling-Monaghan KL, Salem H, Ross KE, Secrist E, et al. Long-term outcomes in anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review of patellar tendon versus hamstring autografts. *Orthop J Sports Med*. 2017; 5(6):2325967117709735.
38. Akbar S, Soh KG, Jazaily Mohd Nasiruddin N, Bashir M, et al. Effects of neuromuscular training on athletes physical fitness in sports: A systematic review. *Front Physiol*. 2022; 13:939042.
39. Faul F, Erdfelder E, Lang A-G, Buchner A. G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav Res Methods*. 2007; 39(2): 175-191.
40. Samakosh HMN, Maktoubian M, Doost SPR, Oliveira R, et al. Active and sham transcranial direct-current stimulation (tDCS) plus core stability



- on the knee kinematic and performance of the lower limb of the soccer players with dynamic knee valgus; two armed randomized clinical trial. *AIMS Neurosci.* 2025; 12(3): 312-331.
41. Mohammadi Nia Samakosh H, Oliveira R, Shahabi S, Sarvarifar B, et al. Effects of high-intensity training and electrical stimulation on pain, disability, knee kinematic and performance in patellofemoral pain: a randomized controlled trial. 2024.
 42. Powers CM. The influence of abnormal hip mechanics on knee injury: a biomechanical perspective. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2010; 40(2): 42-51.
 43. Atalay E, Kızıldoğan ET. Reliability of Dynamic Balance Test with A Mobile Application of Physics Toolbox Suite. *J Sports Sci Med.* 2025; 24(1): 154.
 44. Oh M, Lee H, Han S, Hopkins JT. Virtual Reality-Based Assessment of Static Postural Control Among Individuals with Chronic Ankle Instability, Copers, and Controls. *J Sport Rehabil.* 2025;1(aop):1-7.
 45. Testerman C, Griend RV. Evaluation of ankle instability using the Biodex Stability System. *Foot Ankle Int,* 1999;20(5):317-21.
 46. Plisky PJ, Gorman PP, Butler RJ, Kiesel KB, et al. The reliability of an instrumented device for measuring components of the star excursion balance test. *N Am J Sports Phys Ther.* 2009; 4(2): 92.
 47. Wang Y, Yi N, Ericksen HM, Zhang W. Case report: Self-performed orthopedic exams in telehealth treatment of a youth athlete with acute rotator cuff strain. *Front Sports Act Living.* 2023; 5: 1150850.
 48. Hillier S, Immink M, Thewlis D. Assessing proprioception: a systematic review of possibilities. *Neurorehabil Neural Repair.* 2015; 29(10): 933-949.
 49. Ford KR, Myer GD, Hewett TE. Valgus knee motion during landing in high school female and male basketball players. *Med Sci Sports Exerc.* 2003; 35(10): 1745-1750.
 50. Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences:* routledge; 2013.
 51. Myer GD, Ford KR, Foss KDB, Liu C, et al. The relationship of hamstrings and quadriceps strength to anterior cruciate ligament injury in female athletes. *Clin J Sport Med.* 2009; 19(1): 3-8.