

The Effects of Eight Weeks of Gymnastics-Specific Physical Conditioning and Citrulline Malate Supplementation on Serum GH, IGF-1, and Testosterone Levels; miR-1 and miR-206 Expression; and Explosive Power in Adolescent Male Gymnasts

Received:

2026/03/01

Accepted:

2026/04/14

Online ISSN

3060-7078

Adel Valipour

Department of Exercise
Physiology, Faculty of Physical
Education and Sport Sciences,
University of Tabriz, Tabriz, Iran

Mostafa Khani

Department of exercise
physiology, University of Tabriz,
Tabriz, Iran PhysioGenEx Lab,
University of Tabriz, Tabriz, Iran

Ramin Amirsasan

Department of Exercise
Physiology, Faculty of Physical
Education and Sport Sciences,
University of Tabriz, Tabriz, Iran

Elaheh Piralaiy

Department of Exercise
Physiology, Faculty of Physical
Education and Sport Sciences,
University of Tabriz, Tabriz, Iran

***Correspondence:**

Mostafa Khani

Email

khani_ms@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0003-3376-9513>

ABSTRACT

Introduction:

Citrulline malate has been identified as a potentially effective supplement for enhancing athletic performance and modulating anabolic responses. However, limited evidence is available regarding its effects on hormonal markers and microRNAs associated with muscle growth in adolescent gymnasts. Therefore, this study investigated the effects of eight weeks of gymnastics-specific physical conditioning combined with citrulline malate supplementation on growth hormone (GH), insulin-like growth factor 1 (IGF-1), testosterone, miR-1, miR-206, and indices of explosive power in adolescent male gymnasts.

Materials and Methods:

This quasi-experimental study used a pretest–posttest design involving 20 male gymnasts aged 10–14 years. Participants were randomly assigned to two groups: a training-plus-citrulline-malate group (TCM) and a training-plus-placebo group (TPL). The intervention consisted of eight weeks of gymnastics-specific skill and physical-conditioning training. Blood samples were collected 48 hours before the intervention and 48 hours after its completion. Explosive power was assessed using the medicine-ball throw and Sargent jump tests. The data were analyzed using paired t-tests and ANCOVA at a significance level of $p < 0.05$.

Results:

In the TCM group, significant increases were observed in GH ($p = 0.04$), IGF-1 ($p = 0.03$), medicine-ball throw performance ($p = 0.043$), and Sargent jump performance ($p = 0.003$). The expression of miR-1 and miR-206 decreased significantly ($p < 0.001$). In the TPL group, GH ($p = 0.244$), IGF-1 ($p = 0.412$), medicine-ball throw performance ($p = 0.17$), and Sargent jump performance ($p = 0.16$) increased, while miR-1 and miR-206 expression decreased; however, none of these changes reached statistical significance. Testosterone levels did not change significantly in either group ($p = 0.523$). Between-group analyses showed that changes in GH ($p = 0.01$), IGF-1 ($p = 0.048$), miR-1 ($p = 0.001$), miR-206 ($p = 0.039$), medicine-ball throw performance ($p = 0.021$), and Sargent jump performance ($p = 0.042$) were significantly more favorable in the TCM group.

Conclusion:

Eight weeks of gymnastics-specific physical conditioning combined with citrulline malate supplementation enhanced anabolic responses, as indicated by increases in GH and IGF-1, modulated the expression of muscle-related microRNAs, and improved explosive power in adolescent gymnasts. Citrulline malate may therefore be a useful strategy for optimizing training adaptations in this age group.

Keywords:

Citrulline malate, Gymnastics, Growth hormone, IGF-1, miR-1, miR-206, Explosive power

Extended Abstract

Introduction:

Gymnastics is a demanding sport requiring high levels of explosive power, strength, and physiological adaptation. Optimizing these characteristics in adolescent athletes is important for performance enhancement and injury prevention. Although training methodologies are well established, the role of nutritional supplements such as citrulline malate, particularly in combination with sport-specific training, remains an area of growing interest. This study investigated the combined effects of a structured gymnastics-conditioning program and citrulline malate supplementation on hormonal, molecular, and performance-related outcomes in adolescent male gymnasts. The primary objective was to examine the effects of an eight-week combined intervention consisting of gymnastics-conditioning training and citrulline malate supplementation on GH, IGF-1, testosterone, muscle-related microRNAs (miR-1 and miR-206), and explosive power in adolescent male gymnasts.

Methodology:

This semiexperimental study used a pretest–posttest design involving 20 male gymnasts aged 10–14 years. Participants were randomly assigned to either the training-plus-citrulline-malate group (TCM) or the training-plus-placebo group (TPL). Both groups completed the same eight-week training program.

Training protocol: The program consisted of six weekly sessions of gymnastics skill training and physical conditioning, with each session lasting 60–90 minutes. Skill training focused on three apparatuses per session and consisted of 10 sets of 5–8 skill repetitions performed at 60–85% of maximum heart rate. To apply progressive overload, the number of repetitions per set was increased gradually every two weeks.

The conditioning exercises were designed specifically for male artistic gymnastics, with an emphasis on upper-body explosive power. These exercises were performed three times per week after skill training for 45–60 minutes at 60–85% of maximum heart rate. They included handstand push-ups, plyometric push-ups, pull-ups, ring dips, leg raises, crunches, and various jump variations involving the upper body, core, and lower body. Rest intervals between sets were 60 seconds, and 10 minutes were allocated between apparatus changes. Training intensity was monitored using Polar heart-rate monitors and the Borg rating of perceived exertion scale.

Supplementation protocol: Participants in the TCM group received 6 g of citrulline malate (Myprotein) mixed with 250 mL of water one hour before each training session. Participants in the TPL group received a visually identical placebo. The 6-g dose was selected on the basis of previous literature and adjusted for the participants' age group because universally accepted dosage guidelines for this population have not been established.

Measurement methods: Serum GH and IGF-1 levels were measured using ELISA kits from DiaMetra (Italy). Serum testosterone levels were determined using ELISA kits from MonoKit (Germany). miR-1 and miR-206 levels were assessed through RNA extraction, cDNA synthesis, and gene-expression analysis. Explosive power was evaluated using the medicine-ball throw and Sargent jump tests. All measurements were performed before and after the intervention.

Statistical analysis: Data were summarized using means and standard deviations. The Shapiro–Wilk test was used to assess data normality, with $p > 0.05$ indicating no significant departure from normality. Paired t-tests were used to assess within-group changes. ANCOVA with Bonferroni post hoc tests was used for between-group comparisons. All analyses were performed using SPSS version 27 at a significance level of $p < 0.05$.

Results:

The TCM group showed significant increases in serum GH ($p = 0.04$), IGF-1 ($p = 0.03$), medicine-ball throw performance ($p = 0.043$), and Sargent jump performance ($p = 0.003$). Significant decreases were observed in miR-1 and miR-206 expression ($p < 0.001$). Testosterone levels did not change significantly within or between groups.

Between-group analysis showed significantly greater improvements in the TCM group than in the TPL group in GH ($p = 0.01$), IGF-1 ($p = 0.048$), medicine-ball throw performance ($p = 0.021$), and Sargent jump performance ($p = 0.042$), as well as significantly greater reductions in miR-1 ($p = 0.001$) and miR-206 ($p = 0.039$).

Discussion:

The findings suggest that combining structured gymnastics training with citrulline malate supplementation may enhance anabolic responses, modulate specific muscle-related microRNAs, and improve explosive power in adolescent male gymnasts. The observed increases in GH and IGF-1 support the potential anabolic effects of citrulline malate and may facilitate muscle growth and repair. The reductions in miR-1 and miR-206, which are associated with muscle growth and differentiation, require further investigation and may reflect a complex regulatory response to training and supplementation. The absence of a significant change in testosterone may be related to the participants' young age or to the specific training stimulus. The improvements in explosive power, measured using the medicine-ball throw and Sargent jump tests, may be related to the observed hormonal and molecular adaptations. In conclusion, an eight-week intervention combining gymnastics-conditioning training with 6 g of citrulline malate supplementation may enhance GH and IGF-1 levels, modulate miR-1 and miR-206 expression, and improve explosive power in adolescent male gymnasts. Although testosterone levels were unaffected, the overall hormonal and performance-related benefits were notable. Future studies should examine different dosages, longer intervention periods, and the precise molecular pathways affected by this combined intervention.

تأثیر هشت هفته تمرین آمادگی جسمانی ویژه ژیمناستیک و مکمل‌سازی سیترولین‌مالات بر GH، IGF-1، تستوسترون، miR-1 و miR-206 سرمی و توان انفجاری ژیمناست‌های پسر نوجوان

چکیده	تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۱۲/۱۰
مقدمه:	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۵
سیترولین‌مالات به‌عنوان یک مکمل مؤثر در بهبود عملکرد ورزشی و تعدیل پاسخ‌های آنابولیک مطرح شده است، اما شواهد محدودی درباره اثر آن بر شاخص‌های هورمونی و microRNAهای مرتبط با رشد عضلانی در ژیمناست‌های نوجوان وجود دارد. هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر هشت هفته تمرین آمادگی جسمانی ژیمناستیک همراه با مصرف سیترولین‌مالات بر GH، IGF-1، تستوسترون، miR-1 و miR-206 شاخص‌های توان انفجاری در ژیمناست‌های پسر نوجوان بود.	شاپا الکترونیکی ۳۰۶۰-۷۰۷۸
روش تحقیق:	عادل ولی پور
در این مطالعه نیمه‌تجربی با طرح پیش‌آزمون-پس‌آزمون، ۲۰ ژیمناست پسر ۱۰ تا ۱۴ ساله به‌صورت تخصیص تصادفی در دو گروه تمرین + سیترولین‌مالات (TCM) و تمرین + دارونما (TPL) قرار گرفتند. مداخله شامل هشت هفته تمرین مهارتی و آمادگی جسمانی ویژه ژیمناستیک بود. نمونه‌های خونی ۴۸ ساعت پیش از شروع و ۴۸ ساعت پس از پایان دوره تمرینی اخذ شد. توان انفجاری با آزمون‌های پرتاب مدیسن‌بال و پرش سارجنت ارزیابی گردید. داده‌ها با آزمون تی همبسته و تحلیل کوواریانس در سطح $p < 0.05$ تحلیل شدند.	گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
یافته‌ها:	مصطفی خانی
در گروه TCM افزایش معنی‌داری در GH ($P=0.04$)، IGF-1 ($P=0.03$)، پرتاب مدیسن‌بال ($P=0.043$) و پرش سارجنت ($P=0.003$) مشاهده شد، در حالی که miR-1 و miR-206 کاهش معنی‌داری نشان دادند ($P<0.001$). در گروه TPL نیز شاخص‌های GH ($P=0.044$)، IGF-1 ($P=0.042$)، پرتاب مدیسن‌بال ($P=0.017$) و پرش سارجنت ($P=0.016$) افزایش و miR-1 و miR-206 کاهش داشتند ولی هیچ‌کدام از آن‌ها معنی‌دار نبود. تغییرات تستوسترون در هیچ‌کدام از گروه‌ها معنی‌دار نبود ($P=0.523$). در ادامه، تحلیل‌های بین‌گروهی نشان داد که تغییرات GH ($P=0.01$)، IGF-1 ($P=0.048$)، miR-1 ($P=0.001$)، miR-206 ($P=0.039$)، پرتاب مدیسن‌بال ($P=0.021$) و پرش سارجنت ($P=0.042$) به‌طور معنی‌داری به نفع گروه TCM بود.	گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
نتیجه‌گیری:	الهه پیرعلایی
هشت هفته تمرین آمادگی جسمانی ویژه ژیمناستیک همراه با مصرف مکمل سیترولین‌مالات موجب تقویت پاسخ‌های آنابولیک (افزایش GH و IGF-1)، تعدیل بیان miRNAهای مرتبط با رشد عضلانی و بهبود توان انفجاری در ژیمناست‌های نوجوان شد. به‌نظر می‌رسد این مکمل می‌تواند به‌عنوان راهبردی مؤثر برای بهینه‌سازی سازگاری‌های تمرینی در این گروه سنی مورد استفاده قرار گیرد.	گروه فیزیولوژی ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
واژگان کلیدی:	* نویسنده مسئول: مصطفی خانی
واژگان کلیدی: سیترولین‌مالات، ژیمناستیک، هورمون رشد، IGF-1، miR-1، miR-206، توان انفجاری	ایمیل: khani_ms@yahoo.com https://orcid.org/0000-0003-3376-9513

مقدمه:

ژیمناستیک از جمله رشته‌های ورزشی است که افراد از سنین کودکی وارد آن می‌شوند و در سنین نوجوانی و جوانی به سطوح بالای تمرین و مسابقه می‌رسند (۱). در میان شاخه‌های مختلف این رشته، ژیمناستیک هنری به‌عنوان مهم‌ترین و رایج‌ترین شاخه شناخته می‌شود که در بخش مردان شامل شش اسباب رقابتی است (۱-۳). با توجه به ماهیت پیچیده و چندبعدی ژیمناستیک، موفقیت در این ورزش مستلزم برخورداری از مهارت‌های فنی و تکنیکی پیشرفته به‌همراه سطوح بالایی از فاکتورهای آمادگی جسمانی نظیر قدرت عضلانی، توان انفجاری، توان بی‌هوازی، انعطاف‌پذیری، چابکی، هماهنگی عصبی-عضلانی و سایر عوامل مرتبط است (۱-۴). بخش قابل توجهی از مهارت‌ها و حرکات اجرا شده در اسباب‌های مختلف ژیمناستیک ماهیتی توانی و انفجاری دارند؛ از این رو، ارتقای این قابلیت جسمانی می‌تواند نقش کلیدی در پیشرفت و موفقیت ژیمناست‌ها ایفا کند (۵-۸). توان انفجاری به‌طور مستقیم با میزان قدرت عضلانی ارتباط دارد و افزایش قدرت می‌تواند به بهبود این فاکتور منجر شود. افزون بر این، توده عضلانی به‌عنوان یکی از عوامل اساسی تعیین‌کننده قدرت عضلانی، به‌طور غیرمستقیم بر سطح توان انفجاری تأثیرگذار است (۸). در دوره نوجوانی، هم‌زمان با افزایش شدت و حجم تمرینات تخصصی، فشار فیزیولوژیکی وارده بر بدن افزایش می‌یابد و ژیمناست‌ها وارد مرحله‌ای می‌شوند که هم رشد زیستی و هم پیشرفت عملکردی به‌صورت هم‌زمان در حال وقوع است (۱، ۴، ۵). نوجوانی یکی از حساس‌ترین مراحل رشد است که با جهش رشدی، تغییرات قابل توجه در ترکیب بدنی و افزایش ترشح هورمون‌های آنابولیک همراه است. در این دوره، محورهای هورمونی از جمله هورمون رشد (GH) و فاکتور رشد شبه انسولینی-۲۱ (IGF-1) و تستوسترون در سطوح بالاتری فعالیت می‌کنند و نقشی کلیدی در افزایش توده عضلانی، رشد استخوانی و بهبود ظرفیت عملکردی دارند (۹-۱۱). با توجه به افزایش نیازهای انرژی و پروتئین برای حمایت از رشد و سازگاری به تمرین، وضعیت تغذیه‌ای در این دوره اهمیت ویژه‌ای دارد. در رشته‌ای مانند ژیمناستیک که علاوه بر شدت تمرین بالا، محدودیت‌های وزن و حساسیت به ترکیب بدنی وجود دارد، عدم تأمین کافی انرژی و مواد مغذی می‌تواند به افت عملکرد، اختلال در پاسخ‌های آنابولیک و حتی افزایش خطر آسیب منجر شود (۹). در این راستا، استفاده هدفمند از کمک‌های ارگونومیک تغذیه‌ای به‌عنوان راهبردی مکمل برای جلوگیری از افت عملکرد یا ارتقای آن مورد توجه قرار گرفته است (۱۲-۱۴). این مکمل‌ها می‌توانند از طریق بهبود متابولیسم انرژی، افزایش خون‌رسانی عضلانی، تسهیل بازسازی بافتی یا تعدیل پاسخ‌های هورمونی، سازگاری‌های تمرینی را تقویت کنند. یکی از مکمل‌هایی که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته، سیترولین مالات^۳ (CM) است. این ترکیب از طریق افزایش دسترسی زیستی آرژنین و تقویت تولید نیتریک اکساید^۴ (NO)، موجب بهبود جریان خون و انتقال اکسیژن و مواد مغذی به عضلات فعال می‌شود (۱۲-۱۴). از منظر فیزیولوژیک، بهبود محیط متابولیکی و همودینامیک ناشی از افزایش NO می‌تواند پاسخ محورهای هورمونی آنابولیک را تعدیل کند. GH با تحریک تولید IGF-1 در کبد و بافت عضلانی، مسیرهای سیگنالیینگ آنابولیک را فعال می‌کند و موجب افزایش سنتز پروتئین، تکثیر سلول‌های ماهواره‌ای و بازسازی فیبرهای عضلانی می‌شود (۱۵، ۱۶). تستوسترون نیز با اثر بر گیرنده‌های آندروژنی عضله اسکلتی، بیان ژن‌های مرتبط با هیپرتروفی و افزایش قدرت را تسهیل می‌کند. این هورمون‌ها به‌صورت هماهنگ در تنظیم رشد عضلانی و ارتقای قدرت و توان انفجاری نقش دارند؛ شاخص‌هایی که

¹ Growth Hormone² Insulin-like Growth Factor-1³ Citrulline Malate⁴ Nitric Oxide

برای موفقیت در ژیمناستیک اهمیت حیاتی دارند (۱۷، ۱۸). علاوه بر تنظیمات هورمونی، شواهد اخیر نشان می‌دهد میکروRNA-ها (miRNA) نیز در تنظیم پاسخ‌های آنابولیک عضله نقش دارند (۱۹-۲۲). miRNAها گروهی از RNAهای کوتاه و غیرکدکننده با طولی در حدود ۲۲ نوکلئوتید هستند که به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های پسارونویسی، در طیف وسیعی از فرآیندهای زیستی از جمله تکوین بافت‌ها، تنظیم مسیرهای سیگنال‌دهی سلولی و کنترل فرآیندهایی نظیر آپوپتوز نقش دارند (۱۹-۲۲). در این میان، زیرمجموعه‌ای از miRNAها که به‌عنوان miRNAهای اختصاصی عضله یا مایومیورها شناخته می‌شوند، به‌طور غالب در بافت عضلانی بیان شده و در تنظیم رشد، تمایز و سازگاری‌های عملکردی عضله اسکلتی دخیل هستند (۲۰، ۲۲، ۲۳). از مهم‌ترین این مایومیورها می‌توان به miR-1 و miR-206 اشاره کرد که به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های کلیدی محیط مولکولی عضله شناخته می‌شوند. این دو مولکول در فرآیندهای حیاتی نظیر رشد و بازسازی بافت عضلانی و همچنین تنظیم عملکردهای متابولیکی عضله نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند (۲۱، ۲۳-۲۷). شواهد پژوهشی حاکی از آن است که عملکرد miR-1 و miR-206 صرفاً به تنظیمات درون سلولی عضله محدود نمی‌شود، بلکه این miRNAها می‌توانند از طریق اثرگذاری بر بیان IGF-1، گیرنده آن و مسیرهای سیگنال‌دهی وابسته، فعالیت محور GH/IGF-1 را نیز تحت تأثیر قرار دهند (۲۳، ۲۶، ۲۸). با توجه به اینکه سیتروپین‌مالات می‌تواند محیط فیزیولوژیک عضله را از طریق افزایش NO و بهبود خون‌رسانی تغییر دهد، این احتمال مطرح است که این مکمل به‌صورت غیرمستقیم بر تنظیم بیان miRNAهای مرتبط با رشد و سازگاری عضلانی نیز اثرگذار باشد؛ هرچند شواهد مستقیم در این زمینه محدود است (۲۹).

با وجود مطالعات متعدد درباره اثرات سیتروپین‌مالات بر عملکرد یا برخی شاخص‌های فیزیولوژیک در رشته‌های ورزشی مختلف، تاکنون پژوهشی که به‌طور هم‌زمان تأثیر مکمل‌سازی سیتروپین‌مالات و تمرینات آمادگی جسمانی را بر GH، IGF-1، تستوسترون، miR-1، miR-206 و توان انفجاری در ژیمناست‌های نوجوان را بررسی کرده باشد، گزارش نشده است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر هشت هفته تمرین آمادگی جسمانی ژیمناستیک همراه با مکمل‌سازی سیتروپین‌مالات بر برخی عوامل رشدی، miR-1 و miR-206 سرمی و توان انفجاری ژیمناست‌های پسر نوجوان انجام گرفت.

روش تحقیق:

پژوهش حاضر با استفاده از طرح نیمه‌تجربی دوگروهی و اندازه‌گیری‌های پیش‌آزمون-پس‌آزمون انجام شد و دارای کد اخلاق IR.TABRIZU.REC.1404.130 صادره از کمیته اخلاق زیست‌پزشکی دانشگاه تبریز می‌باشد. جامعه آماری تحقیق را ژیمناست‌های پسر نوجوان ۱۰ تا ۱۴ ساله شهر تبریز در شاخه ژیمناستیک هنری تشکیل دادند. معیارهای ورود به مطالعه شامل نداشتن بیماری یا آسیب‌دیدگی فعال و برخورداری از حداقل دو سال سابقه فعالیت مستمر در سطح قهرمانی استانی یا کشوری در شاخه هنری بود. پس از هماهنگی‌های اولیه با هیأت ژیمناستیک استان آذربایجان شرقی و اطلاع‌رسانی به مربیان فعال، از ژیمناست‌های واجد شرایط به همراه والدین آن‌ها دعوت شد تا در جلسه معرفی پژوهش شرکت نمایند. در این جلسه، پس از تشریح اهداف و مراحل اجرای تحقیق، پرسشنامه‌های وضعیت سلامت و ارزیابی سبک زندگی در اختیار داوطلبان (۳۰ نفر) قرار گرفت و با همکاری والدین تکمیل شد؛ سپس تمامی شرکت‌کنندگان تحت معاینات پزشکی قرار گرفتند. بر اساس نتایج پرسشنامه‌ها و معاینات انجام‌شده، در نهایت ۲۰ ژیمناست واجد شرایط انتخاب و رضایت‌نامه آگاهانه با مشارکت والدین اخذ گردید (سن ۱۲/۳۱ ± ۲/۸۷ سال، قد ۱۳۹/۲۱ ± ۴/۸۶ سانتیمتر، وزن ۳۷/۶۱ ± ۵/۱۲ کیلوگرم و شاخص توده بدنی ۱۷/۱۱ ± ۲/۲۸).

⁵ Micro RNA

⁶ MyomiR

کیلوگرم بر متر مربع). دو روز پیش از آغاز مداخله، اطلاعات فردی و شاخص‌های پیکرسنجی شامل قد، وزن، سن، درصد چربی بدن و شاخص توده بدنی^۷ (BMI) نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آنالایزر ترکیب بدنی با نام تجاری آنیا ساخت ایران اندازه‌گیری گردید. سپس آزمون‌های پرتاب توپ مدیسن‌بال و پرش سارجنت به‌منظور ارزیابی توان انفجاری اندام فوقانی و تحتانی اجرا گردید. آزمودنی‌ها بر اساس سن و وضعیت بلوغ (مقادیر تستوسترون) به‌صورت تخصیص تصادفی در دو گروه تمرین ۱- تمرین آمادگی جسمانی ژیمناستیک با مصرف مکمل سیترولین‌مالات^۸ (TCM) ۲- تمرین آمادگی جسمانی ژیمناستیک با مصرف دارونما^۹ (TPL) تقسیم شدند. به‌منظور اندازه‌گیری شاخص‌های سرمی، ۴۸ ساعت پیش از نخستین جلسه تمرین و ۴۸ ساعت پس از آخرین جلسه، پنج سی‌سی نمونه خون از ورید پیش‌آرنجی تمامی آزمودنی‌ها برای سنجش تستوسترون، GH، IGF-1، miR-206 و miR-1 جمع‌آوری شد. همچنین ارزیابی‌های پیکرسنجی و آزمون‌های عملکردی مرحله پس‌آزمون، ۲۴ ساعت پس از خون‌گیری دوم انجام گرفت.

پروتکل تمرینی

برنامه تمرینی پژوهش شامل یک دوره هشت‌هفته‌ای از تمرینات مهارتی و آمادگی جسمانی ژیمناستیک بود که برای هر دو گروه پژوهش اجرا شد. تمرینات مهارتی به این شکل بود که تمامی آزمودنی‌ها در طول هر هفته، شش جلسه تمرینی بر روی اسباب مختلف ژیمناستیک و به مدت ۶۰ تا ۹۰ دقیقه در هر جلسه فعالیت داشتند. در هر جلسه، ژیمناست‌ها بر روی سه وسیله متفاوت تمرین می‌کردند و در هر وسیله ۱۰ ست تمرینی شامل ۵ تا ۸ حرکت مهارتی با شدتی معادل ۶۰ تا ۸۵ درصد ضربان قلب بیشینه^{۱۰} (MHR) اجرا می‌شد. به‌منظور اعمال اصل اضافه‌بار، تعداد حرکات انجام‌شده در هر ست به‌صورت تدریجی و هر دو هفته یک‌بار افزایش یافت؛ به‌طوری‌که در هفته‌های ابتدایی پنج حرکت و در هفته‌های پایانی هشت حرکت، در هر ست انجام می‌گرفت. شایان ذکر است که افزایش تعداد حرکات مهارتی در هر وسیله موجب افزایش مدت زمان فعالیت و در نتیجه بالا رفتن شدت تمرین برای ژیمناست‌ها می‌شد. با این حال، به‌منظور کنترل شدت تمرین، تعداد ست‌ها، مدت زمان استراحت بین ست‌ها (۶۰ ثانیه) و زمان استراحت بین اسباب‌های مختلف (۱۰ دقیقه برای تعویض وسیله و آماده‌سازی) در طول دوره تمرینی ثابت نگه داشته شد. شدت فعالیت بدنی آزمودنی‌ها با استفاده از ضربان سنج پلار و شاخص بورگ، بلافاصله پس از پایان هر ست و همچنین در پایان تمرین هر وسیله ثبت و پایش گردید.

تمرینات آمادگی جسمانی بر اساس نیازهای خاص ژیمناستیک هنری مردان طراحی شده بود. با توجه به‌اینکه این گروه از ژیمناست‌ها توان انفجاری بالاتنه اهمیت بالاتری دارد بنابراین تمرینات به گونه‌ای طراحی گردید که این بخش بیشترین تقویت را داشته باشد. این تمرینات با شدت ۸۵-۶۰ درصد MHR و به مدت ۴۵ تا ۶۰ دقیقه انجام گرفت که شامل حرکات ذیل بود: بالانس پرس سرشانه، شنای سوئدی با جهش، کشش بارفیکس ایستاده و خوابیده، کشش دارحلقه، دیپ پارالل با تاب، دیپ پارالل بدون تاب، دیپ دارحلقه، نیم صلیب دارحلقه، پرس پشت بازو در حالت جفتی، بالانس دیوار و ضربه متوالی دست، شکم پاصاف، پاباز و پاجمع در نردبان سوئدی، کرانچ پاصاف، پاباز و پاجمع روی زمین، گهواره روی شکم، هالو و آرچ پوزیشن، فیله کمر، بالا آوردن پاها از پشت در حالت درازکش، پرس قیچی، پرس متوالی ارتفاع، شمع پرس جک پاجمع، دوقلو پا.

⁷ Body Mass Index

⁸ Training Citrulline Malate

⁹ Training Placebo

¹⁰ Maximum Heart Rate

تمرینات سه جلسه در هفته و بعد از اتمام تمرینات مهارتی انجام می‌گرفت. در هر جلسه سه حرکت برای بالاتنه، دو حرکت برای میان تنه و دو حرکت برای پایین تنه اجرا میشد. سایر جزئیات تمرین در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- پروتکل هشت هفته ای تمرینات آمادگی جسمانی ژیمناستیک

Table 1 – Eight-Week Physical Fitness Training Protocol for Gymnastics

هفته	تعداد جلسه در هفته	تعداد حرکت در هر جلسه	تعداد ست از هر حرکت	تعداد تکرار در هر ست	شدت		استراحت بین ست (ثانیه)	استراحت بین حرکات (دقیقه)
					MHR	بورگ		
اول	3	7	4	10	60-65 %	5-6	60	3
دوم	3	7	4	10	60-65 %	5-6	60	3
سوم	3	7	4	12	65-70 %	6-7	90	3
چهارم	3	7	4	12	65-70 %	6-7	90	3
پنجم	3	7	4	14	70-75 %	7-8	120	3
ششم	3	7	4	14	70-75 %	7-8	120	3
هفتم	3	7	4	16	80-85 %	8-9	150	3
هشتم	3	7	4	16	80-85 %	8-9	150	3

روش مکمل سازی

سیترولین مالات با نام تجاری مای پروتئین^{۱۱}، مکمل مورد استفاده در این مطالعه بود. آزمودنی‌ها یک ساعت قبل از تمرین، شش گرم مکمل سیترولین مالات یا دارونما را همراه با ۲۵۰ میلی لیتر آب مصرف می‌کردن. با توجه به اینکه مقادیر توصیه شده‌ای برای مصرف سیترولین مالات وجود ندارد و در پژوهش‌های مختلف از دوزهای دو گرم تا دوازده گرم استفاده شده است در این مطالعه نیز با توجه به مطالعات و با در نظر گرفتن شرایط سنی آزمودنی‌ها از دوز شش گرم استفاده گردید.

روش‌های اندازه‌گیری

سطوح سرمی هورمون رشد و هورمون فاکتور رشد شبه انسولینی -۱ به روش الایزا و با استفاده از کیت‌های شرکت ایتالیایی DiaMetra و با توجه به دستورالعمل شرکت شده سازنده اندازه‌گیری شد. به منظور اندازه‌گیری سطوح هورمون تستسترون نیز از کیت‌های شرکت آلمانی MonoKit، به شیوه الایزا بهره گرفته شد. همچنین به منظور اندازه‌گیری miR-1 و miR-206

¹¹ MyProtein

نیز در مراحل استخراج RNA و سنتز cDNA و بیان ژن دنبال شد.

الف) استخراج RNA: برای استخراج RNA از سرم، از Trizol (Roche) استفاده شد. ابتدا به ۷۰۰ میکرولیتر سرم، محلول لیزکننده افزوده و نمونه به طور کامل هموژنیزه شد. سپس مخلوط به مدت ۱۰-۱۵ دقیقه روی یخ انکوبه گردید و ۲۰۰ میکرولیتر کلروفرم اضافه شد. نمونه‌ها به آرامی مخلوط و مجدداً انکوبه شدند و پس از سانتریفیوژ (۱۲۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵ دقیقه، ۴ درجه سانتیگراد)، سه فاز تشکیل شد. فاز بالایی شفاف حاوی RNA به میکروتیوب جدید منتقل و با ایزوپروپانول رسوب داده شد. پس از سانتریفیوژ و شستشوی RNA با اتانول ۷۰-۷۵٪، پلت RNA در آب DEPC-treated حل شد و غلظت آن با NanoDrop اندازه‌گیری شد. نسبت OD 260 nm/OD 280 nm برای ارزیابی خلوص RNA استفاده شد (خلوص قابل قبول ≤ 1.8).

ب) سنتز cDNA: در ادامه RNA با غلظت مناسب برای سنتز cDNA با استفاده از کیت سیناکلون (Takara) و آنزیم Reverse Transcriptase پردازش شد. در میکروتیوب ۲۰ میکرولیتر، RNA، پرایمر اختصاصی stem-loop، بافر و آنزیم ترکیب شده و پس از مرحله Denaturation در ۶۵ درجه سانتیگراد، واکنش سنتز cDNA با استفاده از ترموسایکلر Techne اجرا شد. نمونه‌های cDNA تا زمان انجام Real-time PCR در ۲۰- درجه سانتیگراد نگهداری شدند.

ج) ارزیابی بیان microRNA به روش Real-time PCR: هدف تعیین بیان miR-1 و miR-206 به همراه ژن مرجع U6 با استفاده از LightCycler 96 (Roche) و رنگ SYBR Green بود. پرایمرهای اختصاصی لیوفیلیزه شده و با غلظت ۱۰۰ پیکومول آماده و سپس محلول کاری ۴ پیکومول تهیه شد. ترکیب واکنش (۱۰ میکرولیتر) شامل Master Mix 2x SYBR Green PCR، پرایمرها و آب DEPC-treated بود. در ادامه نیز رونویسی معکوس و RT-qPCR به عنوان ترموسایکلینگ دنبال شد (جدول ۲). میزان بیان ژن‌ها با استفاده از روش $2^{-\Delta\Delta Ct}$ و میانگین Ct ژن هدف نسبت به ژن مرجع محاسبه شد. اندازه‌گیری تمامی شاخص‌های سرمی در آزمایشگاه فیزیوژنیکس دانشگاه تبریز انجام گردید.

جدول ۲-توالی پرایمرهای مورد استفاده در مطالعه

Table 2 – Sequence of Primers Used in the Study

miR-206 stem: GTCGTATCCAGTGCAGGGTCCGAGGTATTCGCACTGGATACGACCCACAC
miR-206 Forward: CGAGCGATGGAATGTAAGGAAG
hsa-miR-1-3p stem: GTCGTATCCAGTGCAGGGTCCGAGGTATTCGCACTGGATACGACATACAT
hsa-miR-1-3p Forward: AGCGAGGTTGGAATGTAAAGAAG
U6 stem: GTCGTATCCAGTGCAGGGTCCGAGGTATTCGCACTGGATACGACAAAATATGG
U6 Forward: GCAAGGATGACACGCAAATTC
Universal Reverse: GTGCAGGGTCCGAGGT

روش‌های آماری

اطلاعات حاصل با استفاده از آمار توصیفی شامل میانگین و $\pm$ انحراف استاندارد ارائه شد. به منظور بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون شاپیرو-ویلک استفاده گردید ($p < 0/05$). برای تحلیل تغییرات درون گروهی آزمون تی زوجی و جهت مقایسه‌های بین گروهی از تحلیل کوواریانس (ANCOVA) به همراه آزمون تعقیبی بونفرونی بهره گرفته شد. تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ و در سطح معناداری $p < 0/05$ انجام شد.

یافته‌ها:

برخی از مشخصات پیکرسنجی آزمودنی‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- برخی از مشخصات پیکرسنجی و فیزیولوژیکی آزمودنی‌ها

Table 3 – Some Anthropometric and Physiological Characteristics of the Subjects

متغیر پژوهش Variable	گروه Group	پیش آزمون میانگین $\pm$ انحراف استاندارد PreTest Mean $\pm$ Standard Deviation	پس آزمون میانگین $\pm$ انحراف استاندارد PostTest Mean $\pm$ Standard Deviation	درون گروهی Within-group	بین گروهی Between-group
سن (سال) Age (year)	TCM	12/43 $\pm$ 2/74			
	TPL	12/32 $\pm$ 2/04			
قد (سانتیمتر) Height (cm)	TCM	138/75 $\pm$ 5/27			
	TPL	140/90 $\pm$ 3/28			
وزن (کیلوگرم) Weight (kg)	TCM	35/29 $\pm$ 3/11	37/92 $\pm$ 5/14	P= 0/87	P= 0/34
	TPL	38/78 $\pm$ 4/40	39/27 $\pm$ 5/37	P= 0/96	
شاخص توده بدنی (کیلوگرم بر مترمربع) BMI (kg/m ²)	TCM	16/30 $\pm$ 4/75	18/02 $\pm$ 3/10	P= 0/27	P= 0/46
	TPL	17/02 $\pm$ 3/51	18/74 $\pm$ 3/76	P= 0/14	
درصد چربی (درصد) Body Mass (percent)	TCM	10/08 $\pm$ 1/25	9/02 $\pm$ 1/02	P= 0/74	P= 0/48
	TPL	10/02 $\pm$ 1/66	11/02 $\pm$ 2/17	P= 0/93	

نتایج آزمون تی همبسته نشان داد که آزمودنی‌های گروه TCM در شاخص‌های GH، IGF-1، پرتاب توپ مدیسنبال و پرش

سارجنت افزایش معنی‌داری را در پس آزمون نسبت به پیش آزمون تجربه کردند ($p < 0/05$). همچنین شاخص‌های miR-1 و mir-206 آزمودنی‌های گروه TCM کاهش معنی‌داری در پس آزمون نسبت به پیش آزمون داشتند ($p < 0/05$). در ادامه برای بررسی تفاوت بین گروهی از آزمون تحلیل کوواریانس استفاده شد و مشخص گردید که در شاخص‌های GH، IGF-1، miR-1، mir-206، پرتاب توپ مدیسنبال و پرش سارجنت تفاوت معنی‌داری بین دو گروه وجود دارد ($p < 0/05$). نتایج آزمون تی همبسته و تحلیل کوواریانس تمامی متغیرهای مستقل تحقیق در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- متغیرهای وابسته قبل و بعد از هشت هفته تمرین و مصرف مکمل یا دارونما

Table 4 – Dependent Variables Before and After Eight Weeks of Training and Supplement or Placebo Consumption

اندازه اثر Effect Size	بین گروهی Between-group	درون گروهی Within-group	پس آزمون میانگین $\pm$ انحراف استاندارد PostTest Mean $\pm$ Standard Deviation	پیش آزمون میانگین $\pm$ انحراف استاندارد PreTest Mean $\pm$ Standard Deviation	گروه Group	متغیر پژوهش Variable
0/59	#P= 0/01	*P= 0/04	47/41 $\pm$ 1/28	42/02 $\pm$ 1/21	TCM	هورمون رشد
		P= 0/244	44/02 $\pm$ 1/50	41/90 $\pm$ 0/28	TPL	(نانوگرم در میلی لیتر) GH(ng/ml)
0/45	#P= 0/048	*P= 0/03	398/41 $\pm$ 12/63	371/32 $\pm$ 12/13	TCM	فاکتور رشد شبه انسولینی - ۱
		P= 0/412	388/27 $\pm$ 10/37	374/78 $\pm$ 9/40	TPL	(نانوگرم در میلی لیتر) IGF-1(ng/ml)
0/12	P= 0/47	P= 0/523	3/83 $\pm$ 0/15	3/30 $\pm$ 0/12	TCM	تستسترون
		P= 0/931	3/00 $\pm$ 0/02	3/00 $\pm$ 0/04	TPL	Testestoron(ng/dl)
0/72	#P < 0/001	*P < 0/001	4/74 $\pm$ 0/25	5/91 $\pm$ 0/25	TCM	miR-1
		P = 0/191	6/82 $\pm$ 0/16	6/88 $\pm$ 0/17	TPL	(بیان نسبی)
0/4	#P = 0/039	*P < 0/001	6/09 $\pm$ 0/03	7/21 $\pm$ 0/83	TCM	miR-206
		P = 0/676	6/32 $\pm$ 0/05	6/33 $\pm$ 0/03	TPL	(بیان نسبی)
0/34	#P= 0/021	*P= 0/043	331/74 $\pm$ 42/74	305/14 $\pm$ 36/17	TCM	پرتاب مدیسنبال
		P= 0/17	310/75 $\pm$ 30/49	302/25 $\pm$ 28/95	TPL	(سانتی متر) MedBall Th(cm)
0/27	#P= 0/042	*P= 0/003	35/88 $\pm$ 1/30	28/14 $\pm$ 1/29	TCM	پرش سارجنت
		P= 0/16	32/87 $\pm$ 1/86	29/87 $\pm$ 1/94	TPL	(سانتی متر) Sergent J(cm)

* معنی‌داری درون گروهی # معنی‌داری بین گروهی

بحث:

هدف تحقیق حاضر تعیین تأثیر هشت هفته تمرین آمادگی جسمانی ژیمناستیک همراه با مصرف مکمل سیترولین‌مالات (TCM) و تمرین آمادگی جسمانی ژیمناستیک همراه با مصرف دارونما (TPL) بر عوامل عملکردی، عوامل رشدی، miR-1 و miR-206 سرمی ژیمناست‌های پسر نوجوان بود. نتایج تحقیق نشان داد که در گروه TCM شاخص‌های GH، IGF-1، پرتاب توپ مدیسنبال و پرش سارجنت افزایش معنی‌داری را در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون داشتند و همچنین این شاخص‌ها افزایش معنی‌داری در گروه TCM نسبت به گروه TPL داشتند. علاوه بر آن در گروه TCM در شاخص‌های miR-1 و miR-206 کاهش معنی‌داری در پس‌آزمون نسبت به پیش‌آزمون مشاهده شد که این کاهش در گروه TCM به صورت معنی‌داری بیشتر از گروه TPL بود. لازم به ذکر است که تحقیق حاضر جزو اولین تحقیقاتی است که تأثیر تمرینات آمادگی جسمانی ژیمناستیک همراه با مصرف مکمل سیترولین‌مالات را روی متغیرهای وابسته ذکر شده بررسی کرده است.

این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب تمرین با سیترولین‌مالات می‌تواند پاسخ‌های هورمونی، مولکولی و عملکردی مرتبط با سازگاری‌های آنابولیک را تقویت کند. یکی از مکانیسم‌های اصلی احتمالی در تبیین افزایش GH و IGF-1 در گروه TCM، نقش سیترولین در افزایش زیست‌دسترس‌پذیری آرژنین و به دنبال آن تقویت تولید نیتریک اکساید (NO) است. مطالعات جدید نشان داده‌اند که مکمل‌سازی سیترولین نسبت به آرژنین خوراکی، افزایش پایدارتر و مؤثرتری در سطح آرژنین پلازما ایجاد می‌کند و از این طریق مسیر NO را فعال می‌سازد (۲۸، ۳۰). NO علاوه بر بهبود جریان خون عضلانی و اکسیژن‌رسانی، در تنظیم سیگنالینگ درون‌سلولی مرتبط با رشد عضلانی نیز نقش دارد. شواهد حاکی از آن است که افزایش دسترسی به آرژنین می‌تواند ترشح GH را از طریق مهار سوماتواستاتین و تحریک محور هیپوتالاموس-هیپوفیز تسهیل کند (۳۱). بنابراین، احتمالاً سیترولین‌مالات با تقویت دسترسی آرژنین و NO، پاسخ GH ناشی از تمرین را تشدید کرده است. افزایش GH مشاهده شده در پژوهش حاضر می‌تواند محرک اصلی افزایش IGF-1 باشد. محور GH/IGF-1 یکی از اساسی‌ترین مسیرهای آنابولیک در عضله اسکلتی است و نقش کلیدی در تنظیم رشد، تمایز و هیپرتروفی عضلانی دارد. IGF-1 از طریق فعال‌سازی مسیر PI3K/Akt/mTOR موجب افزایش سنتز پروتئین‌های میوفاibrیلی و مهار مسیرهای کاتابولیک می‌شود (۲۸، ۳۲). همچنین گزارش شده است که تمرینات مقاومتی و توان‌محور در نوجوانان می‌توانند محور GH/IGF-1 را فعال کنند، اما میزان این پاسخ وابسته به شدت تمرین و وضعیت تغذیه‌ای است (۳۳، ۳۴). در این راستا، یافته‌های حاضر نشان می‌دهد که مکمل‌سازی سیترولین‌مالات احتمالاً اثر تمرین را بر فعال‌سازی این محور تقویت کرده است. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های هووانگ و همکاران (۲۰۱۸) همسو است. آن‌ها گزارش کردند که هشت هفته تمرین مقاومتی همراه با مکمل‌سازی ال-سیترولین موجب افزایش معنی‌دار توده بدون چربی و بهبود سازگاری‌های آنابولیک در مردان تمرین‌کرده شد (۳۵). با توجه به نقش GH و IGF-1 در تحریک مسیرهای آنابولیک نظیر Akt/mTOR و افزایش سنتز پروتئین‌های انقباضی، بهبود توده عضلانی گزارش شده در مطالعه مذکور می‌تواند نشان‌دهنده تقویت محیط هورمونی آنابولیک باشد که با افزایش GH و IGF-1 مشاهده شده در پژوهش حاضر هم‌راستا است. این هم‌سویی احتمالاً بیانگر نقش مکمل سیترولین در بهبود پاسخ‌های سازگاری مزمن ناشی از تمرین مقاومتی است. در مقابل، نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های تیزار و همکاران (۲۰۲۴) ناهمسو است؛ به‌طوری‌که آن‌ها گزارش کردند مصرف سیترولین‌مالات همراه با تمرینات فیتنس منجر به تغییر معنی‌دار در سطوح GH و IGF-1 نشد (۳۶). یکی از دلایل احتمالی این ناهم‌سویی می‌تواند به تفاوت در طراحی مداخله، شدت و ماهیت برنامه تمرینی، سطح آمادگی آزمودنی‌ها و نیز زمان نمونه‌گیری مربوط باشد. در پژوهش حاضر، اندازه‌گیری‌ها ۴۸ ساعت پیش از شروع دوره تمرینی و ۴۸ ساعت پس از اتمام آن انجام شد و بنابراین تغییرات مزمن هورمونی مورد ارزیابی قرار گرفت؛ در حالی که تفاوت در شرایط فیزیولوژیک آزمودنی‌ها، مدت

مداخله یا حساسیت شاخص‌های اندازه‌گیری در مطالعه مذکور می‌تواند بر پاسخ هورمونی به مکمل تأثیر گذاشته و منجر به عدم مشاهده تغییر معنی‌دار شده باشد.

از منظر مولکولی، کاهش معنی‌دار miR-1 و miR-206 در گروه TCM از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. miR-1 و miR-206 به‌عنوان مایومیرهای اختصاصی عضله شناخته می‌شوند که در تنظیم تکثیر، تمایز و بازسازی عضلانی نقش دارند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که miR-1 می‌تواند اجزای مسیر IGF-1/Akt را هدف قرار داده و بیان آن‌ها را سرکوب کند، درحالی‌که کاهش بیان این miRNA با فعال شدن سیگنالینگ آنابولیک و هیپرتروفی مرتبط است (۳۷، ۳۸). همچنین miR-206 در تنظیم تمایز سلول‌های ماهواره‌ای و پاسخ به استرس تمرینی دخیل است و تغییرات آن می‌تواند نشانگر بازآرایی سازگاری عضلانی باشد (۳۹). بنابراین، کاهش بیشتر این مایومیرها در گروه TCM احتمالاً نشان‌دهنده کاهش مهار پس‌رونویسی بر مسیر IGF-1 و تسهیل فرآیندهای سنتز پروتئین و بازسازی عضلانی بوده است.

نکته قابل توجه آن است که محور GH/IGF-1 و مایومیرهای عضلانی در تعامل متقابل با یکدیگر عمل می‌کنند. شواهد جدید حاکی از آن است که فعال‌سازی IGF-1 می‌تواند الگوی بیان برخی miRNAهای عضلانی را تعدیل کند و برعکس miR-1 و miR-206 نیز از طریق هدف‌گیری مولکول‌های سیگنالینگ آنابولیک، شدت پاسخ رشد را تنظیم می‌کنند (۴۰، ۴۱). بنابراین، می‌توان چنین استنباط کرد که در پژوهش حاضر، افزایش GH و IGF-1 ناشی از تمرین و مکمل‌سازی، به کاهش بیان miR-1 و miR-206 انجامیده و این امر به‌صورت یک چرخه تقویتی موجب تشدید سازگاری‌های آنابولیک شده است. از منظر عملکردی، افزایش معنی‌دار توان انفجاری (پرتاب توپ مدیسن‌بال و پرش سارجنت) در گروه TCM می‌تواند پیامد مستقیم این تغییرات هورمونی و مولکولی باشد. توان انفجاری وابسته به سطح مقطع عضله، کارایی عصب-عضله و عملکرد فیبرهای تندانقباض است. فعال‌سازی مسیر Akt/mTOR و افزایش سنتز پروتئین‌های انقباضی می‌تواند به بهبود تولید نیرو و نرخ توسعه نیرو منجر شود (۴۲، ۴۳). علاوه‌براین، افزایش NO ناشی از سیترولین‌مالات می‌تواند از طریق بهبود تطابق جریان خون و کاهش خستگی محیطی، ظرفیت تولید توان را در فعالیت‌های کوتاه‌مدت و پر شدت ارتقا دهد (۳۱). ازاین‌رو، بهبود شاخص‌های عملکردی در گروه TCM احتمالاً نتیجه هم‌افزایی سازوکارهای متابولیکی، هورمونی و مولکولی بوده است. در زمینه جمعیت مورد مطالعه نیز باید توجه داشت که نوجوانان در مرحله‌ای از رشد قرار دارند که حساسیت بالاتری به محرک‌های آنابولیک دارند. مطالعات نشان داده‌اند که پاسخ GH به تمرین در دوره بلوغ تقویت می‌شود و تغییرات IGF-1 نقش مهمی در رشد عضلانی این دوره ایفا می‌کند (۳۳). بنابراین، مکمل‌سازی سیترولین‌مالات ممکن است در این بازه سنی اثر تقویت‌کننده بیشتری بر محور رشد داشته باشد. لازم به‌ذکر است با دقت در نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که پروتکل تمرینی اعمال شده، در گروه دارونما نیز مؤثر بوده و باعث بهبود شاخص‌های رشدی و عملکردی آزمودنی‌های این گروه شده است هرچند این تغییرات معنی‌دار نبوده که یکی از دلایل آن می‌تواند آمادگی بالای آزمودنی‌ها و سازگاری آن‌ها با این‌گونه تمرینات باشد زیرا که تمرینات آمادگی جسمانی ژیمناستیک بخش دائمی و تقریباً در تمام طول سال تمرینات ژیمناست‌ها است.

نتیجه‌گیری:

در مجموع، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ترکیب تمرین آمادگی جسمانی ژیمناستیک با مکمل‌سازی سیترولین‌مالات می‌تواند از طریق تقویت محور GH/IGF-1، تعدیل بیان miR-1 و miR-206 و بهبود محیط همودینامیک عضله، سازگاری‌های آنابولیک و عملکردی بیشتری نسبت به تمرین همراه با دارونما ایجاد کند. این یافته‌ها علاوه‌بر گسترش دانش موجود درباره

تعامل تمرین، مکمل‌های پیش‌ساز NO و تنظیم miRNAهای عضلانی، می‌تواند پیامدهای کاربردی مهمی در بهینه‌سازی برنامه‌های تمرینی ژیمناست‌های نوجوان و سایر نوجوانان ورزشکار داشته باشد.

تضاد منافع:

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی:

بدین‌وسیله از همکاری صمیمانه ژیمناست‌های نوجوان شرکت‌کننده در این پژوهش و والدین محترم آن‌ها قدردانی می‌گردد. همچنین از مربیان ژیمناستیک، هیأت ژیمناستیک استان آذربایجان شرقی و مسئولان آزمایشگاه فیزیوژنیکس دانشگاه تبریز که در مراحل مختلف اجرای پژوهش همکاری لازم را به عمل آوردند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع:

1. Silva M-RG, Silva H-H, Paiva T. Sleep duration, body composition, dietary profile and eating behaviours among children and adolescents: A comparison between Portuguese acrobatic gymnasts. *European journal of pediatrics*. 2018;177(6):815-25.
2. Kuhlman NM, Jones MT, Jagim AR, Magee MK, Wilcox L, Fields JB. Dietary intake, energy availability, and power in men collegiate gymnasts. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2024;6:1448197.
3. Sweeney E. *Gymnastics medicine: evaluation, management and rehabilitation*: Springer Nature; 2019.
4. Jemni M. *The science of gymnastics: advanced concepts*: Routledge; 2017.
5. Caine DJ, Russell K, Lim L. *Handbook of sports medicine and science: gymnastics*: John Wiley & Sons; 2013.
6. Keskin Ö. MEN'S ARTISTIC GYMNASTICS OLYMPIC GAMES NORMATIVE VALUES. *Science of Gymnastics Journal*. 2025;17(3):461-73.
7. Moeskops S, Oliver JL, Read PJ, Cronin JB, Myer GD, Lloyd RS. The physiological demands of youth artistic gymnastics: applications to strength and conditioning. *Strength & Conditioning Journal*. 2019;41(1):1-13.
8. Redondo YR, Leon K. ANALYSIS OF THE SCIENTIFIC PRODUCTION IN ARTISTIC GYMNASTICS, AND IN THE MEN'S AND WOMEN'S MODALITIES. *Science of Gymnastics Journal*. 2024;16(1):123-50.
9. Root H, Marshall AN, Thatcher A, Valier ARS, Valovich McLeod TC, Bay RC. Sport specialization and fitness and functional task performance among youth competitive gymnasts. *Journal of athletic training*. 2019;54(10):1095-104.
10. Birzniece V. Exercise and the growth hormone–insulin-like growth factor axis. *Current Opinion in Endocrine and Metabolic Research*. 2019;9:1-7.
11. Kwon YR, Kim Y, Kim Y. Exercise-induced modulation of IGF-1 in healthy, obese, and cancer populations: a systematic review and meta-analysis. *Annals of Medicine*. 2025;57(1):2586331.
12. Gough LA, Sparks SA, McNaughton LR, Higgins MF, Newbury JW, Trexler E, et al. A critical review of citrulline malate supplementation and exercise performance. *European journal of applied physiology*. 2021;121(12):3283-95.
13. Faria VS, Egan B. Effects of 3 days of citrulline malate supplementation on short-duration repeated sprint running performance in male team sport athletes. *European Journal of Sport Science*. 2024;24(6):758-65.
14. Gills JL, Spliker B, Glenn JM, Szymanski D, Romer B, Lu H-C, et al. Acute citrulline-malate supplementation increases total work in short lower-body isokinetic tasks for recreationally active females during menstruation. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2023;37(6):1225-30.
15. Macvanin M, Gluvic Z, Radovanovic J, Essack M, Gao X, Isenovic ER. New insights on the cardiovascular effects of IGF-1. *Frontiers in endocrinology*. 2023;14:1142644.
16. Nyawose S, Naidoo R, Naumovski N, McKune AJ. The effects of consuming amino acids L-arginine, L-Citrulline (and their combination) as a beverage or powder, on athletic and physical performance: a systematic review. *Beverages*. 2022;8(3):48.
17. Pelton LM, Maris SA, Loseke J. The effects of anabolic-androgenic steroids on gene expression in skeletal muscle: a systematic review. *International journal of exercise science*. 2023;16(3):53.
18. Bhasin S, Wang C, Chandra MS, Gagliano-Jucá T, Jasuja R. Mechanisms of Testosterone's

- Anabolic Effects on Muscle and Function: Controversies and New Insights. *Endocrine Reviews*. 2025;bnaf041.
19. Ghafouri-Fard S, Askari A, Mahmud Hussien B, Taheri M, Kiani A. Sarcopenia and noncoding RNAs: A comprehensive review. *Journal of Cellular Physiology*. 2023;238(7):1416-30.
 20. Liu S, Dong H. RNA signaling in skeletal muscle: the central role of microRNAs and exosomal microRNAs. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 2025;13:1639123.
 21. Ismaeel A, Peck BD, Montgomery MM, Burke BI, Goh J, Franco AB, et al. microRNA-1 regulates metabolic flexibility by programming adult skeletal muscle pyruvate metabolism. *Molecular Metabolism*. 2025;98:102182.
 22. da Silva FC, da Rosa Iop R, Andrade A, Costa VP, Gutierrez Filho PJB, da Silva R. Effects of physical exercise on the expression of MicroRNAs: a systematic review. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2020;34(1):270-80.
 23. Lei Z, Yan F, Shu Y, Liang T, Zhang M, Wang X, et al. miR-1 Promotes Apoptosis and Aggravates Myocardial Ischemia-Reperfusion Injury by Downregulating Insulin-Like Growth Factor-1. *Chinese medicine and natural products*. 2025;5(03):e162-e71.
 24. Wang J, Yang L, Zhang J, Gong J, Wang Y, Zhang C, et al. Effects of microRNAs on skeletal muscle development. *Gene*. 2018;668:107-13.
 25. Archacka K, Ciemerych MA, Florkowska A, Romanczuk K. Non-coding RNAs as regulators of myogenesis and postexercise muscle regeneration. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(21):11568.
 26. Mousa NO, Abdellatif A, Fahmy N, El-Fawal H, Osman A. Micrnas as a tool for differential diagnosis of neuromuscular disorders. *Neuromolecular Medicine*. 2023;25(4):603-15.
 27. Malvandi AM, Faraldi M, Sansoni V, Gerosa L, Jaworska J, Lombardi G. Circulating myomiRs in physical exercise. *Advanced Exercise and Health Science*. 2024;1(2):86-98.
 28. Yoshida T, Delafontaine P. Mechanisms of IGF-1-mediated regulation of skeletal muscle hypertrophy and atrophy. *Cells*. 2020;9(9):1970.
 29. Gonzalez AM, Townsend JR, Pinzone AG, Hoffman JR. Supplementation with nitric oxide precursors for strength performance: A review of the current literature. *Nutrients*. 2023;15(3):660.
 30. Sureda A, Córdova A, Ferrer MD, Pérez G, Tur JA, Pons A. L-citrulline-malate influence over branched chain amino acid utilization during exercise. *European journal of applied physiology*. 2010;110(2):341-51.
 31. Gonzalez AM, Trexler ET. Effects of citrulline supplementation on exercise performance in humans: A review of the current literature. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2020;34(5):1480-95.
 32. Stewart CE, Sharples AP. Aging, skeletal muscle, and epigenetics. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2022;150:27S-33S.
 33. Eliakim A, Nemet D. Exercise and the GH-IGF-I axis. *Endocrinology of physical activity and sport*. 2020:71-84.
 34. Moran J, Sandercock G, Ramirez-Campillo R, Clark CC, Fernandes JF, Drury B. A meta-analysis of resistance training in female youth: its effect on muscular strength, and shortcomings in the literature. *Sports Medicine*. 2018;48(7):1661-71.
 35. Hwang P, Morales Marroquín FE, Gann J, Andre T, McKinley-Barnard S, Kim C, et al. Eight weeks of resistance training in conjunction with glutathione and L-Citrulline supplementation increases lean mass and has no adverse effects on blood clinical safety markers in resistance-trained males. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2018;15(1):30.
 36. Tizar E, Erdogan R, Tizar GR. The Effect of Citrulline Malate Supplement Applied in Addition

- to Fitness Trainings on Hormone Metabolism of Athletes. *Journal of Pioneering Medical Sciences*. 2024;13(5).
37. D'Souza RF, Markworth JF, Aasen KM, Zeng N, Cameron-Smith D, Mitchell CJ. Acute resistance exercise modulates microRNA expression profiles: Combined tissue and circulatory targeted analyses. *PloS one*. 2017;12(7):e0181594.
 38. Podgórska D, Cieśla M, Płonka A, Bajorek W, Czarny W, Król P, et al. Changes in circulating MicroRNA levels as potential indicators of training adaptation in professional volleyball players. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(11):6107.
 39. Maniscalco M, Fuschillo S, Ambrosino P, Candia C, di Domenico A, Lombardi C, et al. Skeletal muscle dysfunction in chronic obstructive pulmonary disease: miRNAs, myokines and exercise. *ERJ Open Research*. 2026.
 40. Han L, Li P, He Q, Yang C, Jiang M, Wang Y, et al. Revisiting skeletal muscle dysfunction and exercise in chronic obstructive pulmonary disease: Emerging significance of myokines. *Aging and Disease*. 2023;15(6):2453.
 41. Wang Z. Exercise-induced extracellular vesicles and their protective role against diabetes: Karolinska Institutet; 2025.
 42. Hoppeler H. Molecular networks in skeletal muscle plasticity. *Journal of Experimental Biology*. 2016;219(2):205-13.
 43. Campos C, Flores-Opazo M, Valladares-Ide D, Cabello-Verrugio C, Parada P, Morales F, et al. Fiber-specific differences in protein content of pathways related to mTORC1 signaling and oxidative metabolism in individuals with obesity. *Scientific Reports*. 2025;15(1):23839.