

Original Article

Heart Rate Variability in Response to Exam Anxiety in Adolescent Girls

Zahra Mansourjozan^{*1} , Mohammad MahdiAmini² 



Citation: Mansourjozan, Z., Amini, M. M. Heart Rate Variability in Response to Exam Anxiety in Adolescent Girls. Iranian Journal of Motor Behavior and Sport Psychology, 2025; 5(4): 10-25.



10.22034/ijmbp.2026.577033.1159

- **Received:** 22 May 2025
- **Revised:** 11 September 2025
- **Accepted:** 25 September 2025
- **Published:** 31 December 2025

*1.Laboratory of Intelligent Machines, LUT University, 53850 Lappeenranta, Finland (Corresponding Author).
E-mail: zahra_mansuri65@yahoo.com

2. Islamic Azad University, Mashhad, Iran Faculty of Humanities Associate Professor of Motor Behavior, Department of Physical Education
E-mail:mmamini33@yahoo.com

Abstract

Exam stress may affect autonomic nervous system function. This study investigated changes in heart rate variability (HRV) indices in response to exam stress and their association with anxiety dimensions in female adolescents. A total of 72 seventh- and eighth-grade female students participated in the study. Heart rate variability indices, including the root mean square of successive differences (RMSSD), the standard deviation of normal-to-normal intervals (SDNN), the low-frequency to high-frequency power ratio (LF/HF), the photoplethysmography-derived vascular index (A13), and heart rate, were recorded before, during, and after the examination. The results showed that during the examination, RMSSD decreased from 34.59 to 21.07 ms, and SDNN also showed a significant decrease ($p < 0.001$). In contrast, heart rate increased from 70.01 to 85 beats per minute, and the vascular index increased significantly ($p < 0.001$). In addition, LF/HF showed a significant decrease ($p < 0.001$). After the examination, all indices returned to levels close to baseline. Eighth-grade students exhibited lower RMSSD values during the examination than seventh-grade students ($p = 0.001$, $d = 0.85$). Furthermore, after statistical correction, none of the correlations between anxiety dimensions and HRV indices were significant. These findings indicate that exam stress in female adolescents is associated with reduced vagal activity, increased cardiac arousal, and a distinct physiological response pattern. The simultaneous decrease in LF/HF and increase in heart rate reflects the complexity of the autonomic response to stress.

Keywords: Heart rate variability; test anxiety; adolescents; autonomic regulation

مقاله پژوهشی

تغییرپذیری ضربان قلب در پاسخ به اضطراب امتحان در دختران نوجوان

زهرا منصورجوزان^{۱*} ، محمد مهدی امینی^۲

چکیده

استرس امتحان می‌تواند بر عملکرد دستگاه عصبی خودمختار اثر بگذارد. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب (HRV) در مواجهه با استرس امتحان و ارتباط آن با ابعاد اضطراب در نوجوانان دختر انجام شد. در این مطالعه، ۷۲ دانش‌آموز دختر پایه‌های هفتم و هشتم انتخاب شدند. شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب شامل میانگین مربعات تفاضل‌های متوالی ضربان‌های قلب (RMSSD)، انحراف معیار فواصل طبیعی بین ضربان‌های قلب (SDNN)، نسبت توان مؤلفه فرکانس پایین به توان مؤلفه فرکانس بالا (LF/HF)، شاخص عروقی استخراج‌شده از فوتوپلتیسموگرافی (A۱۳) و ضربان قلب در سه مرحله پیش از امتحان، حین امتحان و پس از امتحان ثبت شدند. نتایج نشان داد در حین امتحان، RMSSD از ۳۴/۵۹ به ۲۱/۰۷ میلی‌ثانیه کاهش یافت و SDNN نیز کاهش معناداری نشان داد ($p < 0.001$). در مقابل، ضربان قلب از ۷۰/۰۱ به ۸۵ ضربه در دقیقه افزایش یافت و شاخص عروقی نیز به‌طور معناداری افزایش پیدا کرد ($p < 0.001$) همچنین LF/HF کاهش معناداری داشت ($p < 0.001$). پس از پایان امتحان، تمامی شاخص‌ها به سطوحی نزدیک به مقادیر پیش از امتحان بازگشتند. دانش‌آموزان پایه هشتم در مرحله حین امتحان، مقادیر پایین‌تری از RMSSD نسبت به دانش‌آموزان پایه هفتم نشان دادند ($p = 0.001$)، $d/85 = 0$). همچنین پس از اعمال اصلاح آماری، هیچ‌یک از همبستگی‌های بین ابعاد اضطراب و HRV معنادار نبود. این یافته‌ها نشان می‌دهد استرس امتحان در نوجوانان دختر با کاهش فعالیت واگال، افزایش برانگیختگی قلبی و الگوی پاسخ فیزیولوژیک همراه است. کاهش هم‌زمان LF/HF و افزایش ضربان قلب، پیچیدگی پاسخ خودمختار به استرس را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تغییرپذیری ضربان قلب؛ اضطراب امتحان؛ نوجوانان؛ تنظیم خودگردان

تاریخ دریافت: ۱ خرداد ۱۴۰۴
تاریخ بازنگری: ۲۰ شهریور ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۳ مهر ۱۴۰۴
تاریخ انتشار: ۱۰ دی ۱۴۰۴

^۱ آزمایشگاه ماشین‌های هوشمند، دانشگاه لاپرنتا ، فنلاند (نویسنده مسئول).

E-mail: zahra_mansuri65@yahoo.com

^۲ رفتار حرکتی علوم انسانی-گروه رفتار حرکتی آزاد اسلامی واحد مشهد ایران.

E-mail: mmamini33@yahoo.com

مقدمه

دوره نوجوانی به‌عنوان یکی از حساس‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین مراحل تحول انسان شناخته می‌شود و حدود ۱۶ درصد جمعیت جهان را دربر می‌گیرد (۱). این دوره با بازآرایی گسترده در سطوح زیستی، عصبی - شناختی و اجتماعی مشخص می‌شود (۲). تغییرات در ساختارهای لیمبیک و قشری مغز و نیز نوسان عملکرد محور هیپوتالاموس - هیپوفیز - آدرنال در طول نوجوانی موجب تغییر در الگوهای پاسخ به استرس می‌شود. در نتیجه، پاسخ‌های هورمونی و عصبی به عوامل استرس‌زا در این دوره نسبت به بزرگسالان متفاوت و در برخی شرایط شدیدتر گزارش شده است (۳،۴). این بازآرایی نورویولوژیک (مجموعه تغییرات عصبی و زیستی مرتبط با بلوغ مغز و سامانه‌های تنظیم استرس) اگرچه بستر سازگاری با الزامات محیطی را فراهم می‌کند، هم‌زمان نوجوانان را نسبت به موقعیت‌های ارزشیابی اجتماعی و تحصیلی حساس‌تر می‌سازد (۳).

موقعیت‌های ارزشیابی رسمی مانند امتحانات مدرسه که به‌عنوان عوامل استرس‌زای واقعی زندگی تحصیلی شناخته می‌شوند، می‌توانند پاسخ‌های قابل‌توجه فیزیولوژیک و افزایش فعالیت خودمختار را در نوجوانان برانگیزند، امری که در پژوهش‌های میدانی با اندازه‌گیری تغییرات ضربان قلب و شاخص‌های خودمختار ثبت شده است (۵،۶). امتحانات مدرسه به دلیل پیامدهای تحصیلی، انتظارات خانواده و نگرانی از ارزیابی عملکرد، از مهم‌ترین منابع استرس در میان نوجوانان محسوب می‌شوند و می‌توانند با افزایش تنش روان‌شناختی و برانگیختگی فیزیولوژیک همراه باشند (۵). ازاین‌رو، بررسی عینی شاخص‌های زیستی در بسترهای طبیعی زندگی تحصیلی برای درک بهتر سازوکارهای فیزیولوژیک استرس اهمیت ویژه‌ای یافته است (۶).

اضطراب امتحان به‌عنوان یک سازه چندبعدی شامل مؤلفه‌های شناختی (مانند نگرانی و افکار مزاحم)، فیزیولوژیک (برانگیختگی خودمختار) و

به اختلالات اضطرابی و افسردگی در مقایسه با همسالان سالم، سطوح پایین‌تری از شاخص‌های HRV را نشان می‌دهند (۵,۱۶). این یافته‌ها حاکی از آن است که کاهش انعطاف‌پذیری سیستم عصبی خودمختار با نشانه‌های هیجانی منفی و دشواری در تنظیم هیجان ارتباط دارد و می‌تواند به‌عنوان یکی از نشانگرهای فیزیولوژیک آسیب‌پذیری روان‌شناختی در نوجوانان مطرح باشد (۱۵,۱۶). این یافته‌ها نشان می‌دهند که کاهش تون واگال و محدود شدن دامنه تغییرپذیری ضربان قلب می‌تواند شاخصی از آسیب‌پذیری روان‌شناختی و کاهش ظرفیت سازگاری باشد. از منظر بالینی و آموزشی، چنین شواهدی اهمیت غربالگری و مداخلات مبتنی بر تنظیم خودگردان را برجسته می‌سازد. چارچوب نظری پژوهش حاضر بر نظریه پلی‌واگال استوار است که توسط استیون پورجز مطرح شده و توضیح می‌دهد چگونه عصب واگ و شاخه‌های پاراسمپاتیک آن در تنظیم هیجان، ارتباط اجتماعی و پاسخ به استرس نقش دارند. این نظریه، سیستم عصبی خودمختار را به‌صورت یک سازمان سلسله‌مراتبی از پاسخ‌ها در نظر می‌گیرد و نشان می‌دهد که انعطاف‌پذیری خودگردان می‌تواند به سازگاری بهتر با تنش و بازیابی سریع‌تر پس از آن کمک کند (۱۱,۱۲)؛ بنابراین، این چارچوب نظری با پژوهش حاضر مرتبط است، زیرا HRV می‌تواند بازتابی از میزان تنظیم‌پذیری خودمختار در برابر استرس امتحان باشد (۱۱,۱۲). علاوه بر این، از دیدگاه تنظیم سازگاری بدن، مواجهه مکرر یا مزمن با عوامل استرس‌زا (به‌ویژه در بافت‌های واقعی زندگی تحصیلی) می‌تواند به فرسودگی فیزیولوژیک تجمعی منتهی شود، وضعیتی که فشار مستمر تنظیم پاسخ استرس را بر بدن وارد می‌آورد و با پیامدهای بلندمدت جسمی و روانی همراه است (۱۳). براین اساس، بررسی نوسانات HRV در بستر واقعی امتحانات می‌تواند تصویری عینی از پویایی سازگاری فیزیولوژیک و روانی در نوجوانان ارائه دهد.

باوجود رشد مطالعات آزمایشگاهی در زمینه استرس و HRV، هنوز روشن نیست که این تغییرات در شرایط واقعی و در متن فشارهای تحصیلی روزمره نوجوانان چگونه رخ می‌دهند؛ زیرا بیشتر شواهد موجود از محیط‌های کنترل‌شده به‌دست‌آمده است و تعمیم آن‌ها به موقعیت‌های طبیعی آموزشی محدود است. در نتیجه، پژوهش‌های میدانی که تغییرات شاخص‌های زمانی و فرکانسی HRV را در مراحل پیش از امتحان، حین امتحان و پس از امتحان در نمونه‌های نوجوان بررسی کرده باشند، همچنان محدود است (۱۷,۱۸). این خلأ به‌ویژه در مطالعات طولی کوتاه‌مدت اهمیت دارد، زیرا چنین مطالعاتی می‌توانند نشان دهند آیا پاسخ خودگردان پس از رفع استرسور به‌سرعت به خط پایه بازمی‌گردد یا خیر، و آیا برخی نوجوانان در سازگاری و بازیابی فیزیولوژیک با تأخیر مواجه می‌شوند. چنین رویکردی امکان درک بهتر پویایی تنظیم خودگردان را فراهم می‌آورد و می‌تواند به شناسایی نوجوانان آسیب‌پذیر از نظر تنظیم استرس کمک کند.

مطالعه حاضر باهدف بررسی پاسخ‌های خودگردان به استرس امتحان در

رفتاری (اجتناب یا بی‌قراری) تعریف می‌شود و در موقعیت‌های ارزشیابی تحصیلی بروز می‌یابد (۷). اهمیت این سازه از آن روست که می‌تواند عملکرد تحصیلی دانش‌آموزان را تحت‌تأثیر قرار دهد و با کاهش نمرات آزمون‌ها و افت پیشرفت تحصیلی همراه باشد (۸). این وضعیت می‌تواند کارکردهای شناختی؛ مانند حافظه کاری و کنترل توجه را مختل کند؛ به‌طوری‌که شواهدی وجود دارد که اضطراب امتحان با کاهش کارایی پردازش اطلاعات و کارکردهای حافظه مرتبط است (۹,۱۰).

علاوه بر این، نتایج مطالعات نشان داده‌اند که در شرایط امتحان، پاسخ‌های فیزیولوژیک مانند افزایش برانگیختگی عصبی و کاهش تغییرپذیری ضربان قلب به‌عنوان نشانه‌هایی از فعال شدن سیستم عصبی خودمختار مشاهده می‌شود که با شدت اضطراب ادراک‌شده همبستگی دارد (۷,۱۱). این تغییرات نه‌تنها می‌توانند عملکرد تحصیلی را تحت‌تأثیر قرار دهند، بلکه با پیامدهای هیجانی و رفتاری نامطلوب نیز همراه هستند (۸,۱۱). در سال‌های اخیر و با افزایش توجه به ارتباط میان فرایندهای فیزیولوژیک و سلامت روان، تغییرپذیری ضربان قلب (HRV) به‌عنوان یک شاخص زیست‌پزشکی غیرتهاجمی، معتبر و قابل‌تکرار برای سنجش تعادل سمپاتیک - پاراسمپاتیک موردتوجه گسترده‌ای قرار گرفته است. HRV بازتابی از انعطاف‌پذیری سیستم عصبی خودمختار در پاسخ به تقاضاهای محیطی است و به‌عنوان شاخصی کلیدی از ظرفیت تنظیم هیجانی شناخته می‌شود (۶,۷). به‌طور خاص، سطوح بالاتر HRV با توانایی بیشتر در سازگاری با موقعیت‌های استرس‌زا، تنظیم مؤثرتر هیجان‌ها و حفظ تعادل فیزیولوژیک مرتبط است، درحالی‌که کاهش HRV اغلب با استرس، اضطراب و دشواری در تنظیم هیجانی همراه دانسته می‌شود (۷,۱۱). پژوهش‌های انجام‌شده در محیط‌های آموزشی و موقعیت‌های واقعی استرس مانند امتحانات نشان داده‌اند که هنگام مواجهه با استرس امتحان، کاهش معنادار در شاخص‌های وابسته به فعالیت واگال مانند RMSSD (میانگین مربعات تفاوت‌های متوالی ضربان قلب، شاخص فعالیت پاراسمپاتیک) و HF (بخش با فرکانس بالا، شاخص فعالیت پاراسمپاتیک) و افزایش نسبت LF/HF (نسبت فرکانس پایین به فرکانس بالا، نشان‌دهنده تعادل سمپاتیک - پاراسمپاتیک) رخ می‌دهد که بیانگر غالب شدن فعالیت سمپاتیک است (۱۲,۱۳). این مطالعات عمدتاً با ثبت سیگنال الکتروکاردیوگرام یا فوتو پلتیسموگرافی در شرایط استراحت و مقایسه آن با دوره‌های پیش از امتحان یا حین امتحان انجام شده‌اند و تغییرات HRV را به‌عنوان شاخصی از پاسخ فیزیولوژیک به استرس ارزیابی کرده‌اند (۱۲,۱۴). افزون بر این، تحلیل‌های پیشرفته در مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این شاخص‌های HRV قابلیت بالایی در شناسایی استرس روانی در زمینه‌های آموزشی دارند و می‌توانند به‌عنوان ابزار پیش‌بینی بار استرس به کار روند، هرچند شواهد در مورد قابلیت پیش‌بینی دقیق عملکرد تحصیلی هنوز نیاز به مطالعه بیشتری دارد (۷).

مطالعات مقایسه‌ای در جمعیت نوجوان نشان داده‌اند که افراد مبتلا

داده‌ها، رضایت‌نامه آگاهانه از والدین یا سرپرستان قانونی و افراد شرکت‌کننده اخذ و اهداف پژوهش برای دانش‌آموزان تشریح شد.

ابزار

مقیاس اضطراب اجتماعی نوجوانان (SASA) برای سنجش اضطراب اجتماعی، در این پژوهش از مقیاس اضطراب اجتماعی نوجوانان (Social Anxiety Scale for Adolescents: SASA) استفاده شد که نسخه فارسی آن نیز در مطالعات پیشین گزارش شده است. این مقیاس که توسط پوکلیک (۱۹۹۷) طراحی شده است، از پرکاربردترین ابزارهای سنجش اضطراب اجتماعی در نوجوانان محسوب می‌شود و شواهد مناسبی از روایی سازه، اعتبار همگرا و پایایی آن در مطالعات بین‌المللی و نسخه فارسی گزارش شده است (۲۰ و ۱۹). این مقیاس شامل ۲۸ گویه است و بر اساس طیف لیکرت پنج‌درجه‌ای از ۱ (هرگز) تا ۵ (همیشه) نمره‌گذاری می‌شود. این ابزار دو بُعد اصلی را می‌سنجد: ۱) ترس از ارزیابی منفی (Fear of Negative Evaluation: AFNE) با ۱۵ گویه، و ۲) تنش و بازداری در تماس اجتماعی (Tension and Inhibition in Social Contact: TISC) با ۱۳ گویه. نمرات بالاتر در هر یک از این ابعاد نشان‌دهنده سطح بالاتر اضطراب اجتماعی است (۱۹). ویژگی‌های روان‌سنجی نسخه فارسی این مقیاس در پژوهش‌های پیشین روی نمونه‌های نوجوان ایرانی ارزیابی شده است. نتایج تحلیل عاملی و شاخص‌های روایی گزارش شده نشان داده‌اند که ساختار دویعدی مقیاس در نمونه‌های ایرانی از برازش قابل‌قبولی برخوردار است (۲۰). به طور مشخص، ضریب آلفای کرونباخ برای ابعاد AFNE و TISC به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۷۱ گزارش شده است که نشان‌دهنده همسانی درونی مطلوب برای استفاده در جمعیت نوجوان است (۲۰).

در مطالعه حاضر نیز پایایی ابزار با آلفای کرونباخ محاسبه شد؛ نتایج نشان داد که آلفای کرونباخ برای بُعد AFNE برابر ۰/۷۸ و برای بُعد TISC برابر ۰/۶۵۲ بود که حاکی از همسانی درونی قابل‌قبول این پرسش‌نامه در نمونه پژوهش است. اگرچه مقدار آلفا برای بُعد TISC پایین‌تر از بُعد AFNE بود، اما با توجه به ماهیت پژوهش اکتشافی و تعداد گویه‌های این خرده مقیاس، در محدوده قابل‌قبول برای پژوهش‌های رفتاری قرار می‌گیرد. این نکته در تفسیر یافته‌های مرتبط با این مقیاس مدنظر قرار گرفت.

سیاهه‌ی اضطراب حالتی - صفتی (STAI) به منظور اندازه‌گیری سطوح اضطراب عمومی، در این پژوهش از سیاهه‌ی اضطراب حالتی - صفتی اشیپیلرگر (State-Trait Anxiety Inventory: STAI) استفاده شد که ابتدا توسط اشیپیلرگر و همکاران (۱۹۸۳) توسعه یافت (۲۱). این ابزار شامل دو زیرمقیاس ۲۰ گویه‌ای است: ۱) اضطراب حالتی (STAI-S) : سنجش اضطراب گذرا و موقعیتی

دختران نوجوان طراحی و اجرا شد. اهداف این پژوهش عبارت بودند از:

۱. بررسی تغییرات شاخص‌های HRV شامل RMSDD, SDNN (انحراف معیار فاصله‌های متوالی ضربان قلب، شاخص کلی تغییرپذیری ضربان قلب) و نسبت LF/HF در سه بازه زمانی یک هفته پیش از امتحانات، حین امتحانات و یک هفته پس از آن؛
۲. بررسی ارتباط ابعاد اضطراب (حالتی، صفتی و اجتماعی) با شاخص‌های فیزیولوژیک استرس؛
۳. مقایسه الگوی واکنش‌پذیری خودگردان بین دانش‌آموزان پایه هفتم و هشتم.

باتوجه به ناهم‌سویی یافته‌های مطالعات میدانی درباره تغییرات نسبت LF/HF در موقعیت‌های ارزشیابی (V)، پرسش اصلی پژوهش این است که آیا استرس امتحان با تغییر در شاخص‌های HRV در بستر طبیعی مدرسه همراه است و این تغییرات در طول زمان چگونه بروز می‌کنند؟

روش‌شناسی

شرکت‌کننده‌ها

هدف پژوهش حاضر بررسی تغییرات شاخص‌های HRV و ارتباط آن با ابعاد اضطراب در مواجهه با استرس امتحان در دختران نوجوان بود. جامعه آماری پژوهش شامل دانش‌آموزان دختر مقطع متوسطه اول شهر مشهد (ناحیه ۶) بود. نمونه‌ای ۷۲ نفری از شش کلاس (سه کلاس پایه هفتم و سه کلاس پایه هشتم) با استفاده از نمونه‌گیری در دسترس و داوطلبانه انتخاب شد (۱۲ نفر از هر کلاس). برای انتخاب مدرسه، ابتدا با چند مدرسه متوسطه اول در ناحیه ۶ مشهد هماهنگی اولیه انجام شد و مدرسه‌ای انتخاب شد که ضمن قراردادن در محدوده پژوهش، از نظر اجرایی امکان همکاری با پژوهش را داشت و مدیریت آن آمادگی لازم برای مشارکت در اجرای مطالعه را اعلام کرد. مدرسه منتخب از نوع نمونه دولتی بود و دسترسی به کلاس‌های پایه هفتم و هشتم را فراهم می‌کرد. دامنه سنی شرکت‌کنندگان بین ۱۲ تا ۱۴ سال با میانگین ۱۳/۱ و انحراف معیار ۰/۸ سال بود که شامل ۲۶ دانش‌آموز پایه هفتم (۱۲ تا ۱۳ سال) و ۳۶ دانش‌آموز پایه هشتم (۱۳ تا ۱۴ سال) می‌شد.

معیارهای ورود به مطالعه عبارت بودند از:

۱. ثبت نام در پایه‌های هفتم یا هشتم،
 ۲. عدم سابقه ابتلا به اختلالات روان‌پزشکی تشخیص‌داده‌شده یا بیماری‌های قلبی - عروقی،
 ۳. عدم مصرف داروهای مؤثر بر ضربان قلب (مانند مسدودکننده‌های بتا یا محرک‌ها).
- معیارهای خروج شامل پاسخ‌دهی ناقص به پرسش‌نامه‌ها یا فقدان داده‌های فیزیولوژیک در هر مرحله از پژوهش بود. پیش از آغاز جمع‌آوری

Polar OH۱ ثبت شدند. انتخاب فرکانس نمونه‌برداری ۱۳۵ هرتز به‌منظور افزایش دقت زمانی در شناسایی قله‌های سیگنال و استخراج دقیق IBI انجام شد، زیرا دقت بالاتر در نمونه‌برداری امکان تشخیص بهتر تغییرات سریع ضربان قلب و کاهش خطای تخمین HRV را فراهم می‌کند. تمام مراحل پردازش سیگنال و استخراج ویژگی‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون (نسخه ۳/۹) و کتابخانه‌های تخصصی شامل NeuroKit۲ (نسخه ۰/۲۰)، NumPy (نسخه ۱/۲۴)، SciPy (نسخه ۱/۱۰) و Pandas (نسخه ۱/۵) انجام شد.

جدول ۱. کیفیت سیگنال ضربان قلب در سه مرحله اندازه‌گیری: تعداد شرکت‌کنندگان با داده کامل، حذف‌شده و درصد پالس‌های قابل‌قبول

مرحله	تعداد شرکت‌کنندگان با داده کامل	تعداد حذف‌شده	درصد پالس‌های قابل‌قبول (%)
یک هفته پیش از امتحانات	۷۲	۰	۹۸/۵
حین امتحان	۷۲	۰	۹۶/۷
یک هفته پس از امتحانات	۷۲	۰	۹۷/۳

یادداشت. درصد پالس‌های قابل‌قبول نشان‌دهنده نسبت فواصل بین‌ضربانی نرمال (NN intervals) پس از حذف آرتیفکت‌های ناشی از حرکت و نویز سیگنال به کل فواصل ثبت‌شده در هر مرحله است. این شاخص بیانگر کیفیت داده خام PPG و قابلیت اتکای آن برای تحلیل HRV است؛ به‌طوری که مقادیر بالاتر از ۹۵٪ نشان‌دهنده کیفیت مطلوب سیگنال و کفایت داده برای انجام تحلیل‌های زمانی و فرکانسی HRV محسوب می‌شود.

پیش‌پردازش سیگنال

۱. سیگنال‌های خام ابتدا با یک فیلتر میان‌گذر باترورث مرتبه ۴ (باند عبور ۰/۵-۵ هرتز) فیلتر شدند تا نویزهای فرکانس پایین (حرکتی) و فرکانس بالا (نویز الکترونیکی) کاهش یابند. هدف از استفاده از فیلتر میان‌گذر، حفظ بازه فرکانسی مرتبط با تغییرات فیزیولوژیک ضربان قلب و حذف مؤلفه‌هایی است که خارج از محدوده فیزیولوژیک HRV قرار دارند؛ زیرا HRV عمدتاً در بازه فرکانسی مشخصی از تغییرات ضربان قلب قابل تحلیل است و حضور نویز می‌تواند دقت استخراج IBI را کاهش دهد. ۲. برای شناسایی و حذف مصنوعات حرکتی از یک الگوریتم تطبیقی مبتنی بر آستانه‌گذاری استفاده شد: هر پنجره پنج‌دقیقه‌ای بررسی شد و بخش‌هایی که دامنه سیگنال کمتر از $0.5 \times SD$ (انحراف آن پنجره) بودند به‌عنوان کیفیت پایین علامت‌گذاری و از تحلیل حذف یا پرچم‌گذاری شدند.

۳. در مواردی که نویز موضعی وجود داشت ولی حذف کامل پنجره ضروری نبود، از فیلترهای زمانی - فرکانسی و آستانه‌گذاری مشتق برای

۲. اضطراب صفتی (STAI-T): ارزیابی اضطراب پایدار و خصیصه‌ای همه‌گویه‌ها بر اساس طیف لیکرت چهاردرجه‌ای از ۰ (اصلاً/به‌ندرت) تا ۳ (بسیار زیاد/تقریباً همیشه) نمره‌گذاری می‌شوند و دامنه نمرات هر زیرمقیاس بین ۰ تا ۶۰ است.

نسخه‌ی فارسی این پرسش‌نامه در جمعیت نوجوان ایرانی از پایایی مطلوب برخوردار بوده است. نسخه فارسی سیاهه STAI-Y در دانش‌آموزان دبیرستانی ایرانی از ویژگی‌های روان‌سنجی مطلوبی برخوردار گزارش شده است. در مطالعه عبدلی و همکاران، ضریب آلفای کرونباخ برای اضطراب صفتی ۰/۸۸۶ و برای اضطراب حالتی ۰/۸۴۶ به دست آمد و روایی همگرای مناسب آن از طریق همبستگی معنادار با پرسش‌نامه اضطراب بک (به ترتیب ۰/۶۱۲ و ۰/۶۴۳) تأیید شد (۲۲). در نمونه پژوهش حاضر نیز، ضریب آلفای کرونباخ برای اضطراب حالتی ۰/۸۴ و برای اضطراب صفتی ۰/۸۹ به دست آمد که نشان‌دهنده همسانی درونی رضایت‌بخش این ابزار است (۲۲).

داده‌های فیزیولوژیک

برای جمع‌آوری داده‌های HRV، از سنسور نوری Polar OH۱ (ساخت شرکت Polar Electro، فنلاند) استفاده شد. این سنسور با بهره‌گیری از فناوری فوتو پلتیسموگرافی (Photoplethysmography: PPG)، سیگنال‌های ضربان قلب را با نرخ نمونه‌برداری ۱۳۵ هرتز ثبت می‌کند (۲۳). استفاده از فناوری PPG به‌دلیل غیرتهاجمی بودن، سهولت استفاده در محیط‌های طبیعی مانند کلاس درس، و قابلیت ثبت پیوسته سیگنال قلبی بدون ایجاد مزاحمت برای شرکت‌کنندگان انتخاب شد. در مقایسه با روش الکتروکاردیوگرافی (ECG)، اگرچه ECG دقت بالاتری در شرایط آزمایشگاهی دارد، اما PPG در مطالعات میدانی و نوجوانان به دلیل راحتی اجرا، تحمل‌پذیری بیشتر و کاهش محدودیت‌های حرکتی، کاربرد گسترده‌تری دارد (۲۵،۲۴).

در هر جلسه ثبت داده، سنسور بر روی ساعد شرکت‌کنندگان نصب شد و فواصل بین‌ضربانی (Inter-Beat Intervals: IBI) به‌صورت پیوسته ثبت می‌شد؛ IBI به فاصله زمانی بین دو ضربان متوالی قلب گفته می‌شود و مبنای اصلی محاسبه شاخص‌های HRV در حوزه زمانی و فرکانسی است. تغییرات IBI نشان‌دهنده پویایی تنظیم سیستم عصبی خودمختار در پاسخ به استرس است. برای اطمینان از کیفیت داده‌ها، محل قرارگیری سنسور مطابق دستورالعمل شرکت سازنده تنظیم شد و پیش از شروع ثبت، سیگنال ضربان قلب از نظر پایداری و عدم وجود نویز بررسی شد. همچنین در صورت مشاهده حرکت یا افت کیفیت سیگنال، ثبت داده متوقف و پس از اصلاح وضعیت اتصال مجدداً آغاز می‌گردید. این روش غیرتهاجمی و قابل تکرار، امکان پایش پاسخ‌های خودمختار به استرس در بستر طبیعی تحویلی را فراهم می‌کند (۲۵،۲۴).

پردازش سیگنال‌های PPG و استخراج شاخص‌های HRV

سیگنال‌های PPG با فرکانس نمونه‌برداری ۱۳۵ هرتز توسط سنسور

واریبیلیتی کلی ضربان قلب است و تحت‌تأثیر هر دو شاخه سمپاتیک و پاراسمپاتیک قرار دارد؛ بنابراین نشان‌دهنده تعادل کلی و پایداری سیستم تنظیم قلبی - عروقی است.

• $pNN50$ (%): درصد اختلاف‌های متوالی بزرگ‌تر از 50 ms . این شاخص نیز بازتابی از فعالیت پاراسمپاتیک است و افزایش آن معمولاً نشان‌دهنده غالب بودن تون واگ و وضعیت آرامش فیزیولوژیک است.

محاسبه شاخص‌های حوزه فرکانس

۱. فواصل RR نامنظم ابتدا با روش بازفون‌برداری به نرخ 4 Hz بازفون‌برداری شدند.

۲. چگالی طیف توان با روش ولج محاسبه شد: پنجره هنینگ، طول پنجره 300 ثانیه، هم‌پوشانی 50% .

۳. باندها تعریف شدند: $LF=0.04-0.15\text{ Hz}$; $HF=0.40-0.15\text{ Hz}$. توان هر باند به صورت ms^2 گزارش شد.

۴. نسبت LF/HF محاسبه گردید و به دلیل انحراف از نرمال، برای آزمون‌های استنباطی تبدیل لگاریتم طبیعی (\ln) انجام شد. توجه: در جداول توصیفی میانگین و SD مقادیر خام LF/HF گزارش شده‌اند تا تفسیر کلینیکی آسان باشد؛ اما همه تحلیل‌های آنووا و همبستگی براساس $\ln(LF/HF)$ انجام شده‌اند.

شاخص $A13$ مشتق شده از PPG

$A13$ مطابق روش گزارش شده در مطالعات مرجع (۲۲) محاسبه شد: برای هر ضربان، دامنه موج سیستولیک اصلی و موج (های) بازتابی شناسایی و کاهش درصدی از موج اول به موج سوم ($A13$) محاسبه و میانگین بر کل پالس‌های هر بازه گرفته شد. $A13$ به‌عنوان شاخص وضعیت عروقی و واکنش‌پذیری به استرس گزارش گردید.

کنترل کیفیت نهایی و بازبینی دستی

تمام شاخص‌های محاسبه شده از نظر دامنه‌های غیرمعمول بررسی شدند (مثلاً 5 ms $RMSSD$ یا $< 100\text{ ms}$). این حدود بر اساس دامنه‌های فیزیولوژیک گزارش شده در مطالعات HRV و برای شناسایی مقادیر غیرواقعی ناشی از خطاهای استخراج RR یا آرتیفکت‌های باقی‌مانده تعیین شد. مقادیر مشکوک توسط دو ارزیاب مستقل بازبینی شدند. در این مرحله، هر دو ارزیاب به‌صورت جداگانه داده‌های خام RR و سری زمانی HRV را در نرم‌افزار پردازش سیگنال (Python/NeuroKit2) بررسی کرده و تطابق آن‌ها با الگوی فیزیولوژیک ضربان قلب (از نظر تغییرات ناگهانی غیرمنطقی یا جهش‌های غیرپیوسته) را ارزیابی کردند. توافق بین ارزیابان منبای تصمیم‌گیری نهایی برای حذف یا اصلاح داده‌ها قرار گرفت. در صورت تأیید وجود الگوی نادرست، داده‌ها حذف یا اصلاح شدند.

روش اجرا

فرآیند جمع‌آوری داده‌ها در سه مقطع زمانی نسبت به دوره امتحانات

کاهش اثرات استفاده شد.

تشخیص پیک‌ها و استخراج فواصل بین‌ضربانی (RR)

• تشخیص پیک‌ها با استفاده از توابع تشخیص پیک موجود در کتابخانه NeuroKit2 (الگوریتم مبتنی بر مشتق اول و آستانه‌گذاری تطبیقی) انجام شد. این الگوریتم با شناسایی نقاط ماکزیمم موضعی در سیگنال PPG و استفاده از تغییرات شیب (first derivative) به همراه آستانه‌های پویا، امکان تفکیک پالس‌های واقعی قلب از نوسانات ناشی از نویز یا حرکت را فراهم می‌کند. استفاده از این روش در تحلیل HRV به دلیل دقت مناسب در داده‌های PPG و تطابق با ساختار فیزیولوژیک ضربان قلب، در مطالعات متعدد توصیه شده است (۲۶). خروجی زمان وقوع هر پیک به میلی‌ثانیه ذخیره شد و فواصل بین‌ضربانی (RR) به صورت تفاضل زمانی بین پیک‌های متوالی محاسبه گردید. پس از استخراج اولیه، سیگنال RR از نظر وجود پیک‌های غیرطبیعی یا فاصله‌های غیرواقعی بررسی و در صورت نیاز با روش‌های استاندارد تصحیح آرتیفکت، داده‌های مشکوک حذف یا اصلاح شدند تا دقت محاسبه شاخص‌های HRV افزایش یابد. حذف آرتیفکت و درون‌یابی

• فواصل RR خارج از محدوده فیزیولوژیک ($RR > 300\text{ ms}$ یا $RR < 300\text{ ms}$) یا تغییرات ناگهانی بیش از 20% نسبت به RR قبلی به‌عنوان آرتیفکت علامت‌گذاری شدند. این معیارها برای شناسایی ضربان‌های غیرواقعی ناشی از خطای تشخیص پیک، حرکات بدن، قطع سیگنال یا ضربان‌های غیرطبیعی غیرمرتبط با فعالیت فیزیولوژیک قلب به کار رفتند؛ به‌عنوان مثال، فاصله‌های بسیار کوتاه معمولاً ناشی از شناسایی اشتباه یک پیک اضافی و فاصله‌های بسیار طولانی ناشی از دست رفتن پیک واقعی هستند.

• آرتیفکت‌های منفرد با درون‌یابی خطی میانگین پنج RR مجاور اصلاح گردید. در ثبت‌هایی که بیش از 10% فواصل نیاز به اصلاح داشتند، کل پنجره پنج‌دقیقه‌ای از تحلیل حذف شد. این آستانه برای حفظ اعتبار آماری و جلوگیری از ورود پنجره‌های با کیفیت پایین به تحلیل HRV در نظر گرفته شد، زیرا حجم بالای آرتیفکت می‌تواند بر برآورد شاخص‌های زمانی و فرکانسی اثر مخدوش‌کننده داشته باشد. در کل داده‌ها کمتر از 5% فواصل نیاز به اصلاح داشتند (جدول کیفیت).

محاسبه شاخص‌های حوزه زمان

برای هر بازه 5 دقیقه‌ای شاخص‌های زیر محاسبه شدند (مطابق توصیه‌های کارگروه استاندارد مرجع ۲۷):

• $RMSSD$ (ms): ریشه میانگین مربعات تفاوت‌های متوالی RR - شاخص فعالیت واگال. این شاخص حساس‌ترین شاخص زمانی به فعالیت پاراسمپاتیک (واگال) است و به‌عنوان نشانگر ظرفیت تنظیم هیجانی و انعطاف‌پذیری سیستم عصبی خودمختار در مواجهه با استرس شناخته می‌شود.

• $SDNN$ (ms): انحراف معیار RR - شاخص کلی HRV. این شاخص بیانگر

برنامه‌ریزی شد: (۱) یک هفته پیش از امتحانات (خط پایه)، (۲) درست پیش از شروع یک امتحان مهم (مرحله حین)، و (۳) یک هفته پس از پایان امتحانات (بازگشت). انتخاب این سه بازه زمانی باهدف بررسی تغییرات تدریجی و وابسته به استرس امتحان در شاخص‌های HRV انجام شد؛ به‌گونه‌ای که مرحله پیش از امتحان به‌عنوان وضعیت پایه بدون فشار حد، مرحله حین به‌عنوان اوج مواجهه با استرس واقعی تحصیلی، و مرحله پس از امتحان به‌عنوان شاخص بازگشت یا بازیابی سیستم عصبی خودمختار در نظر گرفته شد. این طراحی امکان تحلیل واکنش‌پذیری و نیز بازیابی فیزیولوژیک را فراهم می‌کند. تمام اندازه‌گیری‌ها در کلاس آرام بین ساعات ۰۸:۰۰ تا ۱۰:۰۰ صبح انجام شد. شرکت‌کنندگان پیش از اندازه‌گیری حداقل دو ساعت از مصرف کافئین، فعالیت بدنی سنگین و وعده غذایی حجیم پرهیز کردند. در هر جلسه ابتدا پرسشنامه STAI-S تکمیل و سپس سنسور بر روی مچ دست نصب و پس از ۵ دقیقه استراحت، سیگنال PPG برای ۵ دقیقه ثبت شد. موقعیت شرکت‌کنندگان استاندارد و یکسان نگه داشته شد (نشسته، پشت صاف، پاها روی زمین، تنفس طبیعی). پرسشنامه‌های SASA و STAI-T تنها در خط پایه تکمیل شدند.

روش آماری

آمار توصیفی

میانگین و انحراف معیار برای متغیرهای جمعیت - شناختی، پرسشنامه‌ها و شاخص‌های HRV در هر سه مقطع محاسبه شد. پایایی پرسشنامه‌ها با ضریب آلفای کرونباخ محاسبه و فواصل اطمینان ۹۵٪ با بوت‌استرپ ۱۰۰۰ نمونه برآورد گردید. روش بوت‌استرپ یک روش بازنگونه‌گیری مبتنی بر نمونه‌های تصادفی با جایگذاری از داده‌های مشاهده‌شده است که امکان برآورد پایدارتر و بدون فرض توزیع نرمال از فاصله‌های اطمینان را فراهم می‌کند. استفاده از این روش به‌ویژه در نمونه‌های نسبتاً کوچک و داده‌های زیست‌فیزیولوژیک مانند HRV مناسب است، زیرا حساسیت کمتری به نقض فرض نرمال بودن دارد و دقت برآورد پارامترها را افزایش می‌دهد.

تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر

برای آزمون اثر زمان بر $RMSSD$ ، $SDNN$ ، $\ln(LF/HF)$ ، $A13$ و HR از آن‌وا یک‌طرفه با اندازه‌گیری مکرر استفاده شد. مفروضه کرویت با آزمون موجلی سنجیده شد؛ آزمون موجلی بررسی می‌کند که واریانس اختلاف بین سطوح مختلف تکراری (مثلاً سه زمان اندازه‌گیری) برابر باشد. این مفروضه یکی از پیش‌شرط‌های اصلی آن‌وا با اندازه‌گیری‌های مکرر است و نقض آن می‌تواند منجر به افزایش خطای نوع اول و برآورد نادرست آماره F شود. در صورت نقض این فرض، استفاده از تصحیحات درجات آزادی برای حفظ اعتبار نتایج ضروری است. در موارد نقض، اصلاحیه گرین‌هاوس - گیسر به‌کار گرفته شد و مقادیر F با درجات آزادی تصحیح‌شده گزارش گردید. اندازه اثر برای آن‌وا به صورت $generalized$

$G_eta\ squared$ (η^2) گزارش شد و فاصله اطمینان ۹۵٪ آن از طریق روش بوت‌استرپ برآورد شد. مقایسه‌های زوجی پس از آزمون با تصحیح بونفرونی انجام شد؛ صحیح بونفرونی یک روش محافظه‌کارانه برای کنترل خطای نوع اول در آزمون‌های چندگانه است و احتمال نتیجه‌گیری کاذب را زمانی که چندین مقایسه همزمان انجام می‌شود کاهش می‌دهد. این روش با تقسیم سطح معناداری بر تعداد مقایسه‌ها، از افزایش جمععی خطا در آزمون‌های زوجی جلوگیری کرده و اعتبار نتایج را حفظ می‌کند. اندازه اثر مقایسه‌های زوجی به صورت $Cohen's\ dz = t / \sqrt{n}$ محاسبه و گزارش شد.

تحلیل همبستگی

روابط بین ابعاد اضطراب (AFNE، TISC، STAI-S، STAI-T) و شاخص‌های فیزیولوژیک در مرحله حین با ضریب همبستگی پیرسون بررسی شد. انتخاب این ابعاد بر اساس دو چارچوب نظری و تجربی انجام شد: نخست، نظریه‌های اضطراب امتحان و اضطراب اجتماعی که نشان می‌دهند مؤلفه‌های شناختی (نگرانی و ترس از ارزیابی منفی) و هیجانی، فیزیولوژیک (برانگیختگی خودمختار) به‌طور متفاوتی با عملکرد سیستم عصبی خودمختار مرتبط هستند؛ دوم، شواهد تجربی که نشان می‌دهند اضطراب حالتی و صفتی می‌توانند الگوهای متفاوتی از HRV را در شرایط استرس واقعی پیش‌بینی کنند؛ بنابراین، این زیرمقیاس‌ها برای بررسی ارتباط بین ابعاد شناختی - هیجانی اضطراب و شاخص‌های فیزیولوژیک انتخاب شدند. برای کنترل خطای نوع اول ناشی از آزمون‌های متعدد، تصحیح بونفرونی اعمال شد (تعدیل‌شده = 0.025 ، برابر با 0.05 تقسیم بر 20 مقایسه). در متن و جدول‌ها مقادیر p خام و p تصحیح‌شده به تفکیک ارائه شده‌اند.

نرمال بودن و معنادرای آماری

نرمال بودن توزیع متغیرها با آزمون شاپیرو - ویلک بررسی شد. بررسی نرمال بودن به این دلیل اهمیت دارد که بسیاری از آزمون‌های پارامتریک (از جمله تحلیل واریانس و همبستگی پیرسون) بر فرض نرمال بودن داده‌ها استوار هستند و نقض این فرض می‌تواند منجر به برآورد نادرست ضرایب، افزایش خطای نوع اول یا کاهش توان آزمون شود. در مواردی که نیاز بود، تبدیل‌های مناسب (مثلاً \ln برای LF/HF) اعمال گردید. این تبدیل‌ها باهدف نزدیک کردن توزیع داده‌ها به نرمال و بهبود پایداری نتایج آماری انجام شدند تا امکان استفاده معتبر از آزمون‌های پارامتریک حفظ شود. همه آزمون‌ها دوطرفه و با سطح معنی‌داری $0.05 = \alpha$ انجام شدند؛ مقادیر p دقیق گزارش و در صورت کمتر از 0.01 به صورت $p < 0.01$ ارائه شده‌اند.

نتایج

ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و پایایی ابزارها

جدول ۳. ضرایب پایایی (آلفای کرونباخ) برای پرسشنامه‌های پژوهش

مقیاس	آلفای کرونباخ ()	CI %۹۵
ترس از ارزیابی منفی	۰/۷۰۱	(۰/۷۷۶, ۰/۵۶۱)
تنش و بازداری اجتماعی	۰/۶۵۲	(۰/۷۶۳, ۰/۴۱۶)
اضطراب حالتی	۰/۸۲۹	(۰/۸۷۵, ۰/۷۵۰)
اضطراب صفتی	۰/۸۳۶	(۰/۸۷۶, ۰/۷۷۱)

تغییرات شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب در مراحل قبل، حین و بعد از امتحان

برای بررسی تغییرات شاخص‌های فیزیولوژیک در سه مرحله قبل، حین و بعد از امتحان، از تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر استفاده شد. در جدول ۴، میانگین و انحراف معیار شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب شامل SDNN، RMSSD، نسبت LF/HF، شاخص A۱۳ و ضربان قلب در سه مرحله زمانی ارائه شده است.

یادداشت. اختلاف‌ها به صورت «قبل - حین»، «قبل - بعد»، «حین - بعد» محاسبه شده‌اند. مقدار منفی در «قبل - حین» برای A۱۳ نشان‌دهنده افزایش مقدار A۱۳ در مرحله حین نسبت به قبل است. این تغییرات در شاخص‌های HRV و ضربان قلب بازتابی از واکنش سیستم عصبی خودمختار به استرس امتحان هستند؛ به طوری که کاهش RMSSD و SDNN در مرحله حین بیانگر کاهش فعالیت پاراسمپاتیک (واگال) و کاهش انعطاف‌پذیری تنظیم قلبی - عروقی است، در حالی که افزایش ضربان قلب نشان‌دهنده غالب شدن فعالیت سمپاتیک و افزایش برانگیختگی فیزیولوژیک در شرایط استرس می‌باشد. تغییرات مشاهده‌شده در LF/HF

نمونه شامل ۷۲ دانش‌آموز دختر بود که از این تعداد، ۳۶ نفر در پایه هفتم و ۳۶ نفر در پایه هشتم تحصیل می‌کردند. انتخاب نمونه متعادل از دو پایه تحصیلی به منظور امکان مقایسه متصفانه بین گروه‌های سنی نزدیک اما از نظر تحولی متفاوت انجام شد؛ این توازن باعث می‌شود اثرات مشاهده‌شده کمتر تحت تأثیر تفاوت حجم نمونه و بیشتر ناشی از تفاوت‌های رشدی و تحولی باشد. میانگین سنی شرکت‌کنندگان ۱۳/۱ سال با انحراف معیار ۰/۸ سال بود. جدول ۲ مشخصات جمعیت‌شناختی و نمرات پرسشنامه‌ها را به تفکیک پایه نشان می‌دهد. این جدول تصویری کلی از ویژگی‌های جمعیت‌شناختی، شاخص‌های روان‌شناختی و یک شاخص کلیدی فیزیولوژیک (RMSSD) ارائه می‌دهد تا امکان مقایسه اولیه بین دو گروه تحصیلی فراهم شود.

یادداشت: مقادیر به صورت میانگین \pm انحراف معیار گزارش شده‌اند. این شیوه گزارش‌دهی، برآوردی از مرکزیت داده‌ها و پراکندگی آن‌ها ارائه می‌دهد و امکان تفسیر هم‌زمان سطح کلی متغیرها و میزان ناهمگنی بین‌فردی را فراهم می‌سازد. ردیف پایانی (RMSSD) در مرحله حین امتحان) به منظور نمایش تفاوت‌های رشدی به این جدول افزوده شده است.

به منظور ارزیابی پایایی درونی پرسشنامه‌ها، ضریب آلفای کرونباخ برای هر یک از زیرمقیاس‌ها محاسبه شد. مقادیر به دست آمده به همراه فاصله اطمینان ۹۵ درصد در جدول ۳ ارائه شده‌اند. نتایج نشان داد که ضرایب آلفا برای تمامی مقیاس‌ها در دامنه مطلوب پایایی قرار دارند. تنها استثنا، زیرمقیاس «تنش و بازداری اجتماعی» بود که با مقدار = ۰/۶۵۲ در سطح مرزی قابل قبول ارزیابی شد و بیانگر کفایت حداقلی همسانی درونی این زیرمقیاس است.

جدول ۲. ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و نمرات پرسشنامه‌ها به تفکیک پایه تحصیلی

متغیر	پایه هفتم (N=۳۶)	پایه هشتم (N=۳۶)	کل (N=۷۲)
سن (سال)	۰/۸۳ \pm ۱۲/۸۱	۰/۷۸ \pm ۱۳/۳۹	۰/۸ \pm ۱۳/۱۰
ترس از ارزیابی منفی	۷/۹۷ \pm ۳۷/۲۴	۷/۷۱ \pm ۳۶/۳۸	۷/۸۲ \pm ۳۷/۸۰
تنش و بازداری اجتماعی	۷/۴۹ \pm ۳۰/۸۲	۴/۹۷ \pm ۳۱/۰۷	۶/۳۲ \pm ۳۰/۹۵
اضطراب حالتی	۹/۱۸ \pm ۲۴/۱۲	۷/۳۵ \pm ۲۱/۰۷	۸/۴۲ \pm ۲۲/۶
اضطراب صفتی	۸/۶۵ \pm ۲۴/۵۹	۸/۹ \pm ۲۵/۰۷	۸/۷۳ \pm ۲۴/۸۳
RMSSD در مرحله حین امتحان (ms)	۱۱/۴۵ \pm ۲۴/۷۹	۹/۴۸ \pm ۱۷/۳۵	۱۲/۲۱ \pm ۲۱/۰۷

جدول ۴. شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب در مراحل قبل، حین و بعد از امتحان

شاخص	قبل از امتحان	حین امتحان	بعد از امتحان
RMSSD (ms)	۱۱/۶۴ \pm ۳۴/۵۹	۱۲/۲۱ \pm ۲۱/۰۷	۹/۶۰ \pm ۳۹/۷۸
SDNN (ms)	۱۹/۱۱ \pm ۵۶/۵۸	۱۹/۲۳ \pm ۲۴/۵۹	۱۳/۹۶ \pm ۶۳/۷۱
LF/HF (LF / ۰/۱۵-۰/۴ HF / ms ^۲)	۱/۶۰ \pm ۴/۱۶	۱/۱۵ \pm ۳/۴۸	۱/۱۶ \pm ۴
شاخص A۱۳ (PPG)	۱۶/۴۹ \pm ۲۶/۲۷	۱۲/۶۳ \pm ۳۶/۲۴	۱۲/۲۷ \pm ۲۰/۸۴
ضربان قلب (bpm)	۵/۰۱ \pm ۷۰/۰۱	۱۰/۰۷ \pm ۸۵	۲/۹۶ \pm ۶۵/۰۳

جدول ۵. نتایج تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر برای مقایسه شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب در مراحل مختلف امتحان

مقدار p	F (df۱, df۲)	فاصله اطمینان ۹۵٪	G ²	شاخص
>۰/۰۰۱	F (۱/۸۴, ۵۳/۳۱)=۲۶/۰۲	(۰/۳۵۹, ۰/۶۱۱)	۰/۴۷۳	RMSSD
>۰/۰۰۱	F (۱/۷۱, ۴۹/۶۹)=۱۶/۴۹	(۰/۱۹۶, ۰/۵۶۸)	۰/۳۶۳	SDNN
>۰/۰۰۱	F (۱/۰۴, ۳۰/۲۸)=۱۵۲/۱۵۱۱	(۰/۷۷۰, ۰/۹۰۷)	۰/۸۴۰	LF/HF
>۰/۰۰۱	F (۱/۴۲, ۴۱/۰۸)=۲۶/۹۱	(۰/۶۴۵, ۰/۳۳۲)	۰/۴۸۱	A۱۳
>۰/۰۰۱	F (۱/۶۰, ۴۶/۲۶)=۴۲/۸۳	(۰/۷۳۰, ۰/۴۴۹)	۰/۵۹۶	HR

پاسخ به استرس تحصیلی در شرایط واقعی است. بر اساس تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر، اثر زمان بر همه شاخص‌های مورد بررسی معنادار بود: SDNN، RMSSD، نسبت A۱۳، LF/HF و ضربان قلب. برای معنادار بودن SDNN، RMSSD، نسبت LF/HF و ضربان قلب، به دلیل نقض مفروضه کرویت، اصلاح گرین‌هاوس - گیسر اعمال شد؛ درحالی‌که برای A۱۳ مفروضه کرویت برقرار بود. نتایج مقایسه‌های زوجی نشان داد که در مرحله حین امتحان، RMSSD و SDNN کاهش یافتند، نسبت LF/HF و A۱۳ تغییر کردند و ضربان قلب افزایش یافت. بازگشت مقادیر در مرحله پس از امتحان به سطوح نزدیک یا حتی بهتر از پیش از امتحان، بیانگر ماهیت گذرای پاسخ استرسی و بازبازی نسبی سیستم عصبی خودمختار پس از پایان موقعیت تنش‌زا است.

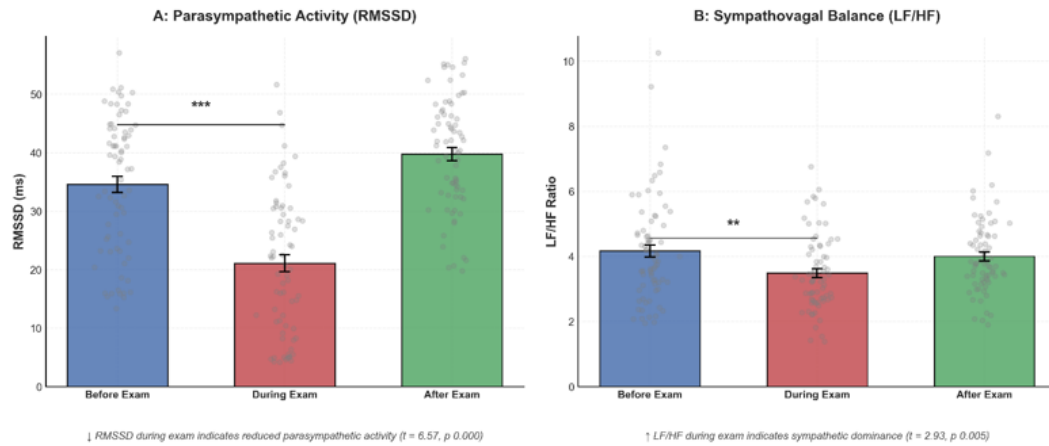
یادداشت. تحلیل با استفاده از ANOVA با اندازه‌گیری‌های مکرر در سه مرحله (قبل، حین و بعد از امتحان) انجام شد. ²G بیانگر اندازه اثر ژنرالایز شده است. فاصله‌های اطمینان ۹۵٪ با روش بوت‌استرپ محاسبه شده‌اند. تمامی اثرات زمان در سطح $p < 0.001$ معنادار بودند.

و شاخص مبتنی بر A۱۳ (PPG) نیز نشان‌دهنده جابه‌جایی تعادل بین دو شاخه سیستم عصبی خودمختار در پاسخ به موقعیت ارزیابی تحصیلی است. مقادیر p دوطرفه و اندازه اثر (Cohen's dz) بر اساس اختلاف‌های زوجی گزارش شده‌اند. مقادیر به صورت میانگین \pm انحراف معیار گزارش شده‌اند.

نتایج تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر نشان داد که اثر اصلی «مرحله زمانی» بر تمامی شاخص‌های فیزیولوژیک مورد بررسی معنادار است (جدول ۵). آزمون موچلی بیانگر آن بود که مفروضه کرویت برای متغیرهای SDNN، RMSSD، نسبت LF/HF و ضربان قلب برقرار نیست؛ بنابراین به منظور تصحیح درجات آزادی، اصلاح گرین‌هاوس - گیسر اعمال شد. این یافته نشان می‌دهد که شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب و ضربان قلب به‌طور معناداری در طول سه مرحله (قبل، حین و بعد از امتحان) تغییر می‌کنند که این الگو بیانگر حساسیت بالای سیستم عصبی خودمختار به موقعیت استرس‌زای امتحان است. به‌عبارت‌دیگر، تغییرات مشاهده‌شده نشان‌دهنده واکنش‌پذیری و سپس بازبازی فیزیولوژیک در

جدول ۶. مقایسه‌های زوجی شاخص‌های HRV و فیزیولوژیک در سه مرحله (n = ۷۲)

شاخص	مقایسه	M اختلاف	SD	T(۷۱)	p	d (Cohen's dz)	۹۵٪ CI برای d
RMSSD	قبل - حین	۱۳/۵۲	۴/۵۰	۲۵/۴۹	<۰/۰۰۱	۳	۲/۲۴ تا ۲۴/۷۷
	قبل - بعد	-۵/۱۸	۵/۶۵	-۷/۷۹	<۰/۰۰۱	-۰/۹۲	-۰/۶۸ تا -۱/۱۵
	حین - بعد	-۱۸/۷۱	۶/۵۲	-۲۴/۳۴	<۰/۰۰۱	-۲/۸۷	-۲/۶۳ تا -۳/۱۰
SDNN	قبل - حین	۲۱/۹۹	۴/۵۶	۴۰/۹۳	<۰/۰۰۱	۴/۸۲	۵/۰۶ تا ۴/۵۹
	قبل - بعد	-۷/۱۲	۵/۸۵	-۱۰/۳۳	<۰/۰۰۱	-۱/۲۲	-۰/۹۸ تا -۱/۴۵
	حین - بعد	-۲۹/۱۲	۷/۶۵	-۳۲/۳۱	<۰/۰۰۱	-۲/۸۱	-۳/۵۷ تا -۴/۰۴
LF/HF	قبل - حین	۰/۶۸	۱/۸۷	۳/۰۹	۰/۰۰۳	۰/۳۶	۰/۶۰ تا ۰/۱۳
	قبل - بعد	۰/۱۷	۱/۸۹	۰/۷۵	۰/۴۵۸	۰/۰۹	۰/۳۲ تا -۰/۱۵
	حین - بعد	-۰/۵۱	۱/۴۵	-۳/۰۱	۰/۰۰۴	-۰/۳۵	-۰/۱۲ تا -۰/۵۹
A۱۳	قبل - حین	۹/۹۷	۲۰/۰۳	۴/۲۲	<۰/۰۰۱	-۰/۵۰	-۰/۲۶ تا -۰/۷۳
	قبل - بعد	۵/۴۳	۱۹/۷۱	۲/۳۴	۰/۰۲۲	۰/۲۸	۰/۰۵۱ تا ۰/۰۴
	حین - بعد	۱۵/۴۰	۱۸/۸۲	۶/۹۴	<۰/۰۰۱	۰/۸۲	۱/۰۵ تا ۰/۵۸
(HR (bpm	قبل - حین	-۱۴/۹۹	۵/۰۶	-۲۵/۱۴	<۰/۰۰۱	-۲/۹۶	-۲/۷۳ تا -۳/۲۰
	قبل - بعد	۴/۹۸	۲/۰۶	۲۰/۲۴۸	<۰/۰۰۱	۲/۴۱	۲/۶۵ تا ۲/۱۸
	حین - بعد	۱۹/۹۷	۷/۱۲	۲۳/۸۰	<۰/۰۰۱	۲/۸۰	۳/۰۴ تا ۲/۵۷



شکل ۱. تغییرات شاخص‌های (الف) RMSSD و (ب) نسبت LF/HF در سه مرحله قبل، حین و بعد از امتحان. مقادیر به صورت میانگین ارائه شده‌اند و میله‌های خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین (SEM) هستند.

از ۰/۰۵ بود معنادار باقی ماندند؛ سایر روابط در سطح ۰/۰۵ غیرمعنادار شدند (مثلاً LF/HF و ترس از ارزیابی منفی). p values were Bonferroni-adjusted (p_{adj} = p × ۲۰). جدول ۷. ضرایب همبستگی پیرسون بین ابعاد اضطراب و شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب در مرحله حین امتحان

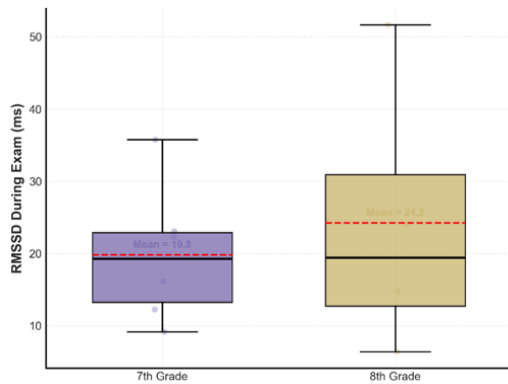
متغیر اضطراب	شاخص HRV	r	p (پیش از تصحیح)	p (تصحیح شده بونفرونی)
ترس از ارزیابی منفی	RMSSD	-۰/۲۴۱	۰/۰۴۰	۰/۰۸
	SDNN	-۰/۱۹۳	۰/۱۰۰	۱
	LF/HF	+۰/۶۴۶	<۰/۰۰۱	<۰/۰۲
	A۱۳	+۰/۲۵۶	۰/۰۳۰	۰/۰۶
تنش و بازداری اجتماعی	HR	+۰/۲۰۳	۰/۰۹۰	۱
	RMSSD	-۰/۲۷۳	۰/۰۲	۰/۰۴
	SDNN	-۰/۲۱۴	۰/۰۷	۱
	LF/HF	+۰/۲۸۴	۰/۰۲	۰/۰۴
اضطراب حالتی	A۱۳	+۰/۴۲۶	<۰/۰۰۱	۰/۰۸
	HR	+۰/۲۱۷	۰/۰۶	۱
	RMSSD	+۰/۱۳۹	۰/۰۲	۱
	SDNN	+۰/۸۱	۰/۰۳	۱
اضطراب صفتی	LF/HF	-۰/۶۰۱	<۰/۰۰۱	۰/۰۲
	A۱۳	+۰/۱۷۶	۰/۰۱۵	۱
	HR	-۰/۰۷۳	۰/۰۳	۱
	RMSSD	+۰/۰۸۷	۰/۰۳	۱
اضطراب صفتی	SDNN	+۰/۰۷۱	۰/۰۳	۱
	LF/HF	-۰/۲۷۹	۰/۰۲	۰/۰۴
	A۱۳	+۰/۰۴۸	۰/۰۴	۱
	HR	-۰/۰۷۶	۰/۰۳	۱

آزمون‌های تعقیبی (مقایسه‌های زوجی) به منظور تعیین محل دقیق تفاوت‌ها بین مراحل زمانی، مقایسه‌های زوجی با استفاده از آزمون t وابسته و با اعمال تصحیح بونفرونی انجام شد. نتایج این تحلیل‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

میانگین‌های گزارش شده برای LF/HF بر اساس مقادیر خام ارائه شده‌اند، در حالی که تحلیل‌های آماری بر روی مقادیر ln(LF/HF) انجام شد. مقایسه‌های زوجی با تصحیح بونفرونی نشان داد که RMSSD و SDNN در مرحله حین امتحان نسبت به قبل به طور معناداری کاهش یافتند و پس از پایان امتحانات افزایش پیدا کردند. همچنین، ضربان قلب در مرحله حین امتحان افزایش و پس از امتحانات کاهش یافت. شاخص A۱۳ در مرحله حین نسبت به قبل افزایش و در مرحله بعد نسبت به مرحله حین کاهش نشان داد. نسبت LF/HF نیز بین مراحل قبل و حین و همچنین حین و بعد تفاوت معناداری داشت، اما تفاوت بین مراحل قبل و بعد معنادار نبود. جزئیات آماره‌های آزمون، اندازه‌های اثر و سطوح معنی‌داری در جدول ۶ ارائه شده است. شکل ۱ روند تغییرات RMSSD و نسبت LF/HF را در سه مرحله قبل، حین و بعد از امتحان نشان می‌دهد. همبستگی بین اضطراب و شاخص‌های تغییرپذیری ضربان قلب در مرحله حین امتحان

برای بررسی رابطه بین ابعاد مختلف اضطراب (AFNE، TISC، STAI-S) و (STAI-T) و شاخص‌های فیزیولوژیک در شرایط استرس امتحان، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. باتوجه به تعداد زیاد آزمون‌ها (۲۰ مقایسه)، برای کنترل خطای نوع یک، روش تصحیح بونفرونی اعمال گردید و سطح معنی‌داری تعدیل شده برابر با ۰/۰۰۲۵ تعیین شد. نتایج همبستگی‌ها در جدول ۷ ارائه شده است.

پس از بونفرونی، تنها همبستگی‌هایی که مقدار p تعدیل شده آن‌ها کمتر



شکل ۳. مقایسه RMSSD در مرحله حین امتحان بین دانش‌آموزان پایه هفتم و هشتم. خط افقی داخل جعبه‌ها نمایانگر میانه، خط چین قرمز نمایانگر میانگین و نقاط پراکنده داده‌های خام هر شرکت‌کننده را نشان می‌دهند. جعبه‌ها محدوده بین چارک اول تا چارک سوم را نمایش می‌دهند. تفاوت بین دو گروه در سطح $p < 0.001$ معنادار است.

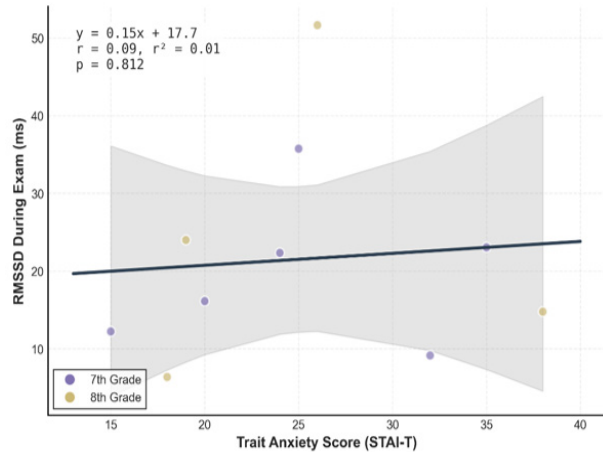
شکل ۳. مقایسه RMSSD در مرحله حین امتحان بین دانش‌آموزان پایه هفتم و هشتم. خط افقی داخل جعبه‌ها نمایانگر میانه، خط چین قرمز نمایانگر میانگین و نقاط پراکنده داده‌های خام هر شرکت‌کننده را نشان می‌دهند. جعبه‌ها محدوده بین چارک اول تا چارک سوم را نمایش می‌دهند. تفاوت بین دو گروه در سطح $p < 0.001$ معنادار است.

خلاصه یافته‌ها

در این مطالعه مواجهه با استرس امتحان با کاهش معنادار شاخص‌های پاراسمپاتی (RMSSD، SDNN) و افزایش ضربان قلب و شاخص A13 همراه بود. نسبت LF/HF نیز در مرحله حین امتحان کاهش معناداری نشان داد. این الگو بیانگر تغییر پاسخ‌های خودگردان قلبی - عروقی در شرایط ارزشیابی تحصیلی و افزایش برانگیختگی فیزیولوژیک در مواجهه با استرس امتحان است. همچنین، بازگشت نسبی SDNN، RMSSD و ضربان قلب پس از پایان امتحانات نشان‌دهنده بازیابی نسبی تنظیم خودمختار پس از رفع عامل استرس‌زا بود.

بحث

شاخص‌های HRV و ضربان قلب، نشانگرهای غیرتهاجمی و حساس تنظیم سیستم عصبی خودمختار هستند و امکان ارزیابی پاسخ بدن به استرس را فراهم می‌کنند. در میان این شاخص‌ها، RMSSD و SDNN به ترتیب بازیابی از فعالیت واگال و تغییرپذیری کلی ضربان قلب‌اند و تغییرات آن‌ها می‌تواند نشان دهد که بدن تا چه اندازه در برابر فشار روانی انعطاف‌پذیر یا آسیب‌پذیر است. همچنین، ضربان قلب و شاخص A13



شکل ۲. نمودار پراکندگی همبستگی بین اضطراب صفتی و RMSSD در مرحله حین امتحان. خط مشکی نشان‌دهنده رگرسیون خطی و ناحیه خاکستری نشان‌دهنده فاصله اطمینان ۹۵٪ است. هر نقطه نمایانگر یک شرکت‌کننده است (پایه هفتم، پایه هشتم). اگرچه پس از تصحیح بونفرونی این همبستگی معنادار نبود، الگوی کلی نزولی قابل مشاهده است.

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، ستون سوم شامل مقادیر p خام و ستون چهارم مقادیر p پس از تصحیح بونفرونی برای ۲۰ مقایسه است. رابطه بین ترس از ارزیابی منفی و نسبت LF/HF همبستگی مثبت نسبتاً قوی دارد ($r = 0.646$, $p < 0.001$) که پس از تصحیح بونفرونی نیز همچنان معنادار باقی ماند ($p_{adj} = 0.02$). همچنین رابطه منفی بین اضطراب حالتی و نسبت LF/HF ($r = -0.601$, $p < 0.001$) پس از تصحیح نیز معنادار باقی ماند. سایر ضرایب همبستگی که در سطح خام معنادار بودند، پس از اصلاح بونفرونی در سطح ۰/۰۵ باقی ماندند. شکل ۲ نمودار پراکندگی رابطه بین اضطراب صفتی و RMSSD را نشان می‌دهد.

شکل ۲. نمودار پراکندگی همبستگی بین اضطراب صفتی و RMSSD در مرحله حین امتحان. خط مشکی نشان‌دهنده رگرسیون خطی و ناحیه خاکستری نشان‌دهنده فاصله اطمینان ۹۵٪ است. هر نقطه نمایانگر یک شرکت‌کننده است (پایه هفتم، پایه هشتم). اگرچه پس از تصحیح بونفرونی این همبستگی معنادار نبود، الگوی کلی نزولی قابل مشاهده است.

تفاوت‌های رشدی در پاسخ فیزیولوژیک به استرس

برای بررسی اثر پایه تحصیلی، شاخص RMSSD در مرحله حین امتحان بین دانش‌آموزان پایه هفتم و هشتم مقایسه شد. نتایج آزمون t مستقل (که در انتهای جدول ۲ نیز درج شده است) نشان داد که دانش‌آموزان پایه هشتم ($M = 17.35 \pm 9.48$, $SD = 11.145$) نسبت به پایه هفتم ($M = 24.47 \pm 11.145$) RMSSD پایین‌تری داشتند ($t = 6.9$, $p = 0.001$) و اندازه اثر کوهن $d = 0.85$ بود که نشان‌دهنده تفاوت بزرگ بین دو گروه است. شکل ۳ این تفاوت را به صورت تصویری نمایش می‌دهد.

یافته‌های برخی مطالعات همسو است، هرچند جهت تغییر LF/HF در مطالعات مختلف سازگار نبوده و تفاوت‌های روش‌شناختی (از جمله ثبت هم‌زمان تنفس و تعیین پهنای باند HF متناسب با سن) می‌تواند تا حد زیادی تبیین‌گر اختلاف‌ها باشد (۱۲، ۱۳). کاهش RMSSD عمدتاً نشان‌دهنده کاهش فعالیت پاراسمپاتیک است، اما کاهش هم‌زمان LF/HF تبیینی غیرقطعی می‌طلبد و می‌تواند ناشی از تغییر در توان LF، انتقال انرژی HF به خارج از باند تعریف‌شده یا هم‌آبی واگال - سمپاتیک باشد (۱۱، ۱۷). همچنین، یافته‌های مشابه در سایر زمینه‌های استرس روانی گزارش شده‌اند، به‌طوری که کاهش کلی HRV و افزایش مشارکت فعالیت سمپاتیک در شرایط استرس آور دیده شده است (۱۱). شاخص‌های مشتق‌شده از سیگنال PPG مانند A۱۳ نیز در مطالعات پیشین با سطوح بالای استرس رابطه نشان داده‌اند و می‌توانند حساسیت کاهش فعالیت پاراسمپاتیک در مواجهه با استرس را آشکار سازند (۲۸).

تحلیل‌های همبستگی نشان داد که برخی از ابعاد اضطراب با شاخص‌های فیزیولوژیک HRV ارتباط معناداری دارند. به‌طور کلی، الگوهای به‌دست‌آمده تا حدی با فرض کاهش کارآمدی تنظیم هیجانی در سطوح بالاتر اضطراب همسو بودند. با این حال، پس از اعمال تصحیح بونفرونی، تنها بخشی از این روابط پایدار باقی ماند و سایر همبستگی‌ها از نظر آماری معنادار نبودند. این الگو نشان می‌دهد که ارتباط بین اضطراب و شاخص‌های فیزیولوژیک احتمالاً چندعاملی، وابسته به زمینه و غیرخطی است و صرفاً به روابط خطی ساده محدود نمی‌شود (۷، ۸، ۱۱). در مجموع، یافته‌ها حاکی از آن است که ارتباط بین اضطراب و شاخص‌های HRV در شرایط استرس امتحان پیچیده بوده و به برخی مؤلفه‌های خاص اضطراب محدود می‌شود؛ بنابراین تبیین دقیق‌تر این روابط نیازمند مطالعات آینده با حجم نمونه بالاتر و طراحی‌های طولی است (جدول ۷).

مقایسه بین دو پایه تحصیلی نشان داد که دانش‌آموزان پایه هشتم در مرحله حین امتحان، شاخص RMSSD پایین‌تری نسبت به دانش‌آموزان پایه هفتم داشتند. این یافته می‌تواند نشان‌دهنده تفاوت‌های رشدی در تنظیم خودکار قلبی - عروقی در دوره نوجوانی باشد. شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که با پیشرفت سن در دوران نوجوانی، به دلیل تکامل تدریجی شبکه‌های عصبی مرتبط با تنظیم هیجان، از جمله قشر پیش‌پیشانی و ارتباطات آن با ساختارهای لیمبیک، الگوهای پاسخ به استرس دستخوش تغییر می‌شود و انعطاف‌پذیری سیستم پاراسمپاتیک ممکن است کاهش یابد یا بازآرایی شود (۳، ۴). در همین راستا، شواهد طولی نیز نشان می‌دهد که شاخص‌های HRV در دوره نوجوانی با تغییرات رشدی در کنترل خودتنظیمی و واکنش‌پذیری استرس همگام هستند و با افزایش سن، کاهش نسبی مؤلفه‌های وابسته به فعالیت واگال مشاهده می‌شود (۱۸، ۱۵).

از منظر نورویولوژیک، این تفاوت‌ها می‌تواند با روند بلوغ قشری - لیمبیک و افزایش کنترل مهارتی قشر پیش‌پیشانی بر ساختارهای مرتبط با پاسخ استرس مانند آمیگدال تبیین شود (۳). علاوه بر این، تفاوت در

می‌تواند اطلاعاتی درباره سطح برانگیختگی قلبی - عروقی و پاسخ عروقی به موقعیت‌های استرس‌زا ارائه دهند. در این چارچوب، هم‌زمانی بررسی شاخص‌های HRV و شاخص‌های مبتنی بر PPG امکان درک چندبعدی‌تری از پاسخ استرس فراهم می‌کند، زیرا هر یک جنبه متفاوتی از تنظیم خودکار را بازتاب می‌دهند.

یافته‌های پژوهش حاضر تصویر روشنی از تغییرات فیزیولوژیک مرتبط با استرس امتحان در دختران نوجوان ارائه می‌دهد. به‌طور مشخص، شاخص‌های RMSSD و SDNN در مرحله حین امتحان نسبت به مراحل قبل کاهش معناداری داشتند، در حالی که ضربان قلب و شاخص A۱۳ در حین افزایش معناداری نشان دادند. این الگو بیانگر کاهش فعالیت پاراسمپاتیک (کاهش تون واگال) و هم‌زمان افزایش برانگیختگی قلبی در پاسخ به موقعیتی عامل استرس‌زا امتحان است. این الگو با تضعیف فرآیندهای خودتنظیمی هیجانی همسو است، به‌گونه‌ای که کاهش HRV معمولاً به‌عنوان شاخصی از کاهش ظرفیت تنظیم هیجان و انعطاف‌پذیری فیزیولوژیک در برابر استرس تعبیر می‌شود (۹، ۱۰، ۲۹، ۳۰). یافته غیرمنتظره این پژوهش، کاهش نسبت LF/HF در مرحله حین امتحان نسبت به قبل بود که با برداشت ساده از استرس حاد به‌عنوان افزایش تعادل سمپاتیک (و در نتیجه افزایش LF/HF) همسو نیست. این الگو بنابراین نیازمند تبیین نظری و ملاحظات روش‌شناختی دقیق‌تری است.

در همین راستا، شواهد جدید نشان می‌دهند که نسبت LF/HF تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله تنفس، شرایط اندازه‌گیری و محدودیت‌های طیفی قرار دارد و نباید به‌صورت تک‌بعدی تفسیر شود (۱۱، ۱۴، ۱۷). چند سازوکار محتمل می‌تواند الگوی غیرانتظاری تغییرات HRV، به‌ویژه در نسبت LF/HF را توضیح دهد. نخست، ویژگی‌های رشدی نمونه نوجوان و استفاده از باند‌های فرکانسی مبتنی بر استانداردهای بزرگسالان ممکن است بر برآورد مؤلفه‌های HF و در نتیجه نسبت LF/HF اثر گذاشته باشد، به‌گونه‌ای که بخشی از انرژی طیفی مرتبط با ریتم تنفسی خارج از محدوده تعریف‌شده قرار گیرد (۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۲۷). دوم، ماهیت موقعیتی استرس امتحان که عمدتاً شامل انتظار و کاهش فعالیت بدنی است، می‌تواند الگوی متفاوتی از پاسخ سیستم عصبی خودمختار نسبت به استرس‌ورهای فعال ایجاد کند و بر تفکیک‌پذیری شاخص‌های فرکانسی اثر بگذارد. سوم، این الگو می‌تواند بازتاب تعاملات غیرخطی و هم‌زمان بین شاخه‌های سمپاتیک و پاراسمپاتیک باشد، به‌طوری که تغییرات هم‌زمان LF و HF لزوماً به تغییر خطی در نسبت LF/HF منجر نمی‌شود. براین‌اساس، الگوی مشاهده‌شده در شاخص‌های فرکانسی می‌تواند ناشی از تعامل هم‌زمان چند عامل از جمله ویژگی‌های رشدی، شرایط اندازه‌گیری و محدودیت‌های تفسیری شاخص‌های طیفی باشد. مطالعات قبلی نیز نشان داده‌اند که تفسیر LF/HF در شرایط استرس واقعی باید با احتیاط انجام شود، زیرا این شاخص لزوماً بازتاب مستقیم فعالیت سمپاتیک نیست (۱۲، ۱۳، ۱۷).

کاهش معنادار RMSSD و کاهش نسبت LF/HF در حین امتحان با

در محیط واقعی ارائه می‌دهند و می‌توانند مبنایی برای پژوهش‌های دقیق‌تر آینده باشند.

پیشنهادات پژوهشی

پژوهش‌های آینده باید با بهره‌گیری از طراحی‌های طولی، نمونه‌های بزرگ‌تر و متنوع‌تر، امکان بررسی دقیق‌تر تغییرات رشدی و تعامل بین عوامل روانی و فیزیولوژیک را فراهم کنند. همچنین باتوجه به الگوی غیرمنتظره در نسبت LF/HF، استفاده از روش‌های تحلیلی پیشرفته‌تر همراه با ثبت هم‌زمان شاخص‌های تنفسی برای بهبود دقت تحلیل باندهای فرکانسی توصیه می‌شود. به‌کارگیری شاخص‌های چندگانه فیزیولوژیک مانند فعالیت الکترودرمال و کورتیزول می‌تواند درک جامع‌تری از پاسخ استرس ارائه دهد. علاوه بر این، انجام مطالعات با توان آماری بالاتر برای بررسی دقیق‌تر ارتباط بین ابعاد اضطراب و شاخص‌های HRV ضروری است. در سطح کاربردی، بررسی اثربخشی مداخلات مبتنی بر بیوفیدبک HRV، آموزش مهارت‌های تنظیم هیجان و رویکردهای مبتنی بر ذهن‌آگاهی می‌تواند در کاهش اضطراب امتحان مؤثر باشد. همچنین، باتوجه به نقش فعالیت بدنی در تنظیم سیستم عصبی خودمختار، ارزیابی اثر مداخلات حرکتی منظم مانند تمرینات هوازی، یوگا یا فعالیت‌های گروهی بر بهبود HRV و کاهش واکنش‌پذیری فیزیولوژیک پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه نشان داد که مواجهه با استرس امتحان در دختران نوجوان با تغییرات معنادار و سازگار با کاهش شاخص‌های زمانی HRV و افزایش ضربان قلب همراه است. در مرحله حین امتحان، RMSSD (شاخص واگال/پاراسمپاتیک) و SDNN (شاخص کلی تغییرپذیری ضربان قلب) به‌طور معناداری کاهش یافتند، در حالی که ضربان قلب به‌طور معنادار آماری افزایش یافت. این الگو با افزایش برون‌داد سمپاتیک و کاهش تون واگال سازگار است؛ با این حال، به‌دلیل کنترل‌نشده تنفس و برخی عوامل فیزیولوژیک دیگر، تفسیر آن باید با احتیاط انجام شود. نسبت LF/HF نیز در مرحله حین نسبت به قبل کاهش یافت و این تغییر، هرچند از نظر آماری معنادار بود، با اندازه اثر کوچکتری نسبت به شاخص‌های زمانی همراه بود؛ بنابراین، تفسیر این شاخص نیازمند احتیاط و در نظر گرفتن عوامل تعدیل‌گر نظیر الگوی تنفس و ویژگی‌های رشدی نمونه است. شاخص عروقی مشتق‌شده از فوتو پلتیسوموگرافی (A13) نیز در مرحله حین افزایش یافت و پس از امتحان کاهش نشان داد که می‌تواند بازتابی از تغییرات گذرای تنظیم عروقی در پاسخ به استرس باشد. پس از پایان امتحان، RMSSD و SDNN به سطوح نزدیک به خط پایه بازگشتند و ضربان قلب نیز کاهش یافت که نشان‌دهنده ماهیت گذرای پاسخ فیزیولوژیک به استرس امتحان است. بر اساس تحلیل‌های همبستگی،

فشارهای تحصیلی و انتظارات ارزشیابی میان پایه‌های تحصیلی نیز ممکن است در تشدید پاسخ‌های فیزیولوژیک نقش داشته باشد.

یافته‌های حاضر را می‌توان در چارچوب نظریه یکپارچگی عصبی - احشایی و همچنین نظریه فرسودگی فیزیولوژیک تجمعی تبیین کرد. کاهش کوتاه‌مدت HRV معمولاً به‌عنوان پاسخی سازگار به استرس حاد در نظر گرفته می‌شود، اما تکرار یا مزمین شدن این پاسخ‌ها می‌تواند منجر به اختلال در تنظیم هیجانی و پیامدهای منفی سلامت بلندمدت شود (۲۹،۳۰،۳۱). در نوجوانانی با اضطراب بالاتر، این پاسخ‌ها ممکن است به تجمع بار فیزیولوژیک و تقویت چرخه نگرانی - برانگیختگی منجر شود. از این منظر، مداخلات پیشگیرانه در محیط‌های آموزشی می‌توانند با هدف کاهش بار استرس فیزیولوژیک و تقویت تنظیم هیجان طراحی شوند (۳۲،۵،۸،۳۱).

در مجموع، تفاوت‌های رشدی مشاهده‌شده بین پایه‌های تحصیلی نشان می‌دهد که اوایل نوجوانی می‌تواند دوره‌ای حساس برای مداخلات آموزشی و روان‌شناختی در زمینه مدیریت استرس باشد، زیرا در این دوره، واکنش‌پذیری فیزیولوژیک به استرس و شیوع اضطراب امتحان در سطح بالاتری قرار دارد (۸).

محدودیت‌ها

این مطالعه دارای چند محدودیت است که باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرد. نخست، نمونه پژوهش به دانش‌آموزان دختر یک مدرسه محدود بود، بنابراین تعمیم نتایج به سایر گروه‌های جنسیتی، زمینه‌های اجتماعی - اقتصادی متفاوت و نظام‌های آموزشی دیگر با احتیاط انجام می‌شود و مطالعات چندمرکزی با نمونه‌های بزرگ‌تر برای بررسی تعامل سن و جنس ضروری است. همچنین، طراحی مقطعی مطالعه امکان استنباط علی یا رشدی دقیق را محدود می‌کند و برای بررسی تغییرات واقعی در مسیر رشد، مطالعات طولی مورد نیاز است. از نظر اندازه‌گیری، استفاده از PPG در شرایط میدانی ممکن است تحت‌تأثیر نویز و آرتیفکت‌های حرکتی قرار گرفته باشد و عدم ثبت هم‌زمان تنفس نیز می‌تواند بر دقت برآورد شاخص‌هایی مانند HF اثرگذار باشد؛ از این‌رو استفاده از روش‌های مرجع مانند ECG و کنترل تنفسی در مطالعات آینده توصیه می‌شود. علاوه بر این، برخی متغیرهای مداخله‌گر مانند خواب، فعالیت بدنی، مصرف کافئین و وضعیت هورمونی کنترل نشدند که می‌تواند بخشی از تغییرات HRV را توضیح دهد. استفاده از پرسشنامه‌های خودگزارشی نیز ممکن است با سوگیری پاسخ همراه باشد و ترکیب آن با ارزیابی‌های رفتاری یا بالینی می‌تواند اعتبار نتایج را افزایش دهد. در نهایت، اگرچه حجم نمونه برای تحلیل‌های اصلی مناسب بود، توان آماری برای برخی تحلیل‌های زیرگروهی محدود است و نیاز به نمونه‌های بزرگ‌تر در پژوهش‌های آینده وجود دارد. در مجموع، باوجود این محدودیت‌ها، یافته‌ها همچنان تصویری ارزشمند از پاسخ‌های روانی - فیزیولوژیک به استرس امتحان

رابطه بین «ترس از ارزیابی منفی» و نسبت LF/HF و همچنین رابطه بین «اضطراب حالتی» و این شاخص، حتی پس از اعمال تصحیح بونفرونی نیز معنادار باقی ماندند. در مقابل، سایر همبستگی‌های خام مشاهده‌شده میان ابعاد اضطراب و شاخص‌های فیزیولوژیک، پس از تصحیح بونفرونی از دامنه معناداری خارج شدند. این یافته‌ها حاکی از آن است که رابطه بین اضطراب خودگزارشی و پاسخ‌های فیزیولوژیک از پیچیدگی برخوردار است و تبیین دقیق آن مستلزم انجام مطالعات با توان آماری بالاتر و استفاده از مدل‌های مختلط چندسطحی یا مدل‌های میانجی - تعدیل‌گر، همراه با کنترل نرخ تنفس، چرخه قاعدگی، مصرف کافئین، خواب و ساعت روز، می‌باشد. در مجموع، نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که پایش تغییرپذیری ضربان قلب می‌تواند ابزاری عینی و حساس برای شناسایی پاسخ‌های استرس در محیط‌های آموزشی باشد. استفاده از شاخص‌های HRV در کنار ارزیابی‌های روان‌شناختی می‌تواند به شناسایی دانش‌آموزان در معرض آسیب‌پذیری بیشتر و طراحی مداخلات هدفمند تنظیم هیجانی کمک کند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

این تحقیق هیچ‌گونه کمک مالی از سازمان‌های تامین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرد.

مشارکت نویسندگان

هر دو نویسنده مشارکت یکسانی داشتند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

تقدیر و قدردانی

از تمامی افرادی که در انجام این پژوهش ما را یاری کردند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

References

- World Health Organization. Children and adolescent health country profiles: a healthy start for a healthy life. World Health Organization. Regional Office for Europe; 2025 Dec 31.
- Patton GC, Sawyer SM, Santelli JS, Ross DA, Afifi R, Allen NB, Arora M, Azzopardi P, Baldwin W, Bonell C, Kakuma R. Our future: a Lancet commission on adolescent health and wellbeing. *The Lancet*. 2016 Jun 11;387(10036):2423-78.
- Casey BJ, Getz S, Galvan A. The adolescent brain. *Developmental review*. 2008 Mar 1;28(1):62-77.
- Romeo RD. Pubertal maturation and programming of hypothalamic–pituitary–adrenal reactivity. *Frontiers in neuroendocrinology*. 2010 Apr 1;31(2):232-40.
- Putwain DW. Examination stress and test anxiety. *Psychologist*. 2008 Dec 1;21(12):1026-9.
- Ginty AT, Phillips AC, Higgs S, Heaney JL, Carroll D. Disordered eating behaviour is associated with blunted cortisol and cardiovascular reactions to acute psychological stress. *Psychoneuroendocrinology*. 2012 May 1;37(5):715-24.
- Bian W, Zhang X, Dong Y. Autonomic nervous system response patterns of test-anxious individuals to evaluative stress. *Frontiers in Psychology*. 2022 Feb 28;13:824406.
- Von der Embse N, Jester D, Roy D, Post J. Test anxiety effects, predictors, and correlates: A 30-year meta-analytic review. *Journal of affective disorders*. 2018 Feb 1;227:483-93.
- Eysenck MW, Derakshan N, Santos R, Calvo MG. Anxiety and cognitive performance: attentional control theory. *Emotion*. 2007 May;7(2):336.
- Song J, Chang L, Zhou R. Effect of test anxiety on visual working memory capacity using evidence from event-related potentials. *Psychophysiology*. 2022 Feb;59(2):e13965.
- Kim HG, Cheon EJ, Bai DS, Lee YH, Koo BH. Stress and heart rate variability: a meta-analysis and review of the literature. *Psychiatry investigation*. 2018 Feb 28;15(3):235.
- Tharion E, Parthasarathy S, Neelakantan N. Short-term heart rate variability measures in students during examinations. *Natl Med J India*. 2009 Mar 1;22(2):63-6.
- Melillo P, Bracale M, Pecchia L. Nonlinear Heart Rate Variability features for real-life stress detection. Case study: students under stress due to university examination. *Biomedical engineering online*. 2011 Nov 7;10(1):96.
- Shaffer F, Ginsberg JP. An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in public health*. 2017 Sep 28;5:290215.
- Koenig J, Kemp AH, Beauchaine TP, Thayer JF, Kaess M. Depression and resting state heart rate variability in children and adolescents—A systematic review and meta-analysis. *Clinical psychology review*. 2016 Jun 1;46:136-50.
- Cheng C, Dong D, Jiang Y, Ming Q, Zhong X, Sun X, Xiong G, Gao Y, Yao S. State-related alterations of spontaneous neural activity in current and remitted depression revealed by resting-state fMRI. *Frontiers in Psychology*. 2019 Feb 11;10:245.
- Immanuel S, Teferra MN, Baumert M, Bidargaddi N. Heart rate variability for evaluating psychological stress changes in healthy adults: a scoping review. *Neuropsychobiology*. 2023 Sep 14;82(4):187-202.
- Li Z, Snieder H, Su S, Ding X, Thayer JF, Treiber FA, Wang X. A longitudinal study in youth of heart rate variability at rest and in response to stress. *International Journal of Psychophysiology*. 2009 Sep 1;73(3):212-7.
- Puklek M, Vidmar G. Social anxiety in Slovene adolescents: Psychometric properties of a new

- measure, age differences and relations with self-consciousness and perceived incompetence. *European Review of Applied Psychology*. 2000;50(2):249-58.
20. Faghani N, Moghadasin M. Psychometric Properties of the Persian Version of Social Anxiety Scale for Social Media Users (SAS-SMU). *Iranian journal of psychiatry*. 2023 Oct;18(4):406.
 21. Parady G, Taniguchi A, Takami K. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives.
 22. Abdoli N, Farnia V, Salemi S, Davarinejad O, Jouybari TA, Khanegi M, Alikhani M, Behrouz B. Reliability and validity of Persian version of state-trait anxiety inventory among high school students. *East Asian Archives of Psychiatry*. 2020 Jun 1;30(2):44-7.
 23. Hermand E, Cassirame J, Ennequin G, Hue O. Validation of a photoplethysmographic heart rate monitor: Polar OH1. *International journal of sports medicine*. 2019 Jul;40(07):462-7.
 24. Harris-Love MO, Seamon BA, Gonzales TI, Hernandez HJ, Pennington D, Hoover BM. Eccentric exercise program design: a periodization model for rehabilitation applications. *Frontiers in physiology*. 2017 Feb 23;8:112.
 25. Mansourjozan Z, Hekmatmanesh A, Amini MM. Hippotherapy on autonomic regulation and behavioral symptoms in children with autism. *Human-Animal Interactions*. 2025 Dec 19;13(1):0055.
 26. Selvaraj N, Jaryal A, Santhosh J, Deepak KK, Anand S. Assessment of heart rate variability derived from finger-tip photoplethysmography as compared to electrocardiography. *Journal of medical engineering & technology*. 2008 Jan 1;32(6):479-84.
 27. Electrophysiology TF. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*. 1996 Mar 1;93(5):1043-65.
 28. Michels N, Sioen I, Clays E, De Buyzere M, Ahrens W, Huybrechts I, Vanaelst B, De Henauw S. Children's heart rate variability as stress indicator: Association with reported stress and cortisol. *Biological psychology*. 2013 Oct 1;94(2):433-40.
 29. Thayer JF, Hansen AL, Saus-Rose E, Johnsen BH. Heart rate variability, prefrontal neural function, and cognitive performance: the neurovisceral integration perspective on self-regulation, adaptation, and health. *Annals of behavioral medicine*. 2009 Apr 1;37(2):141-53.
 30. Koenig J. Neurovisceral regulatory circuits of affective resilience in youth: Principal outline of a dynamic model of neurovisceral integration in development. *Psychophysiology*. 2020 May;57(5):e13568.
 31. McEwen BS. Stress, adaptation, and disease: Allostasis and allostatic load. *Annals of the New York academy of sciences*. 1998 May;840(1):33-44.
 32. Rapee RM, Creswell C, Kendall PC, Pine DS, Waters AM. Anxiety disorders in children and adolescents: A summary and overview of the literature. *Behaviour research and therapy*. 2023 Sep 1;168:104376.