



Προπόνηση ακρίβειας: ξεκλειδώνοντας τη δύναμη της χρήσης των δεδομένων

Γραμμένου Μαρία

Λέκτορας, Συντονίστρια του Διδακτορικού Προγράμματος Σπουδών «Επιστήμη και Υγεία στο Ποδόσφαιρο»,
Ινστιτούτο Αθλητικής και Προληπτικής Ιατρικής, Πανεπιστήμιο του Σάαρλαντ, Σααρμπρύνκεν, Γερμανία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρουσία διατομικής διακύμανσης στις αποκρίσεις του οργανισμού σε οξεία και χρόνια προπονητικά ερεθίσματα αναγνωρίζεται ευρέως στην επιστημονική κοινότητα. Ενώ οι πηγές αυτής της διακριτικής ποικιλότητας δεν έχουν ακόμα κατανοηθεί πλήρως, η ανάπτυξη τεχνολογιών και της επιστήμης δεδομένων επιτρέπει σε ερευνητές και πραγματογνώμονες να λαμβάνουν αποφάσεις βασισμένες στα δεδομένα. Οι προσεγγίσεις που βασίζονται σε δεδομένα και χρησιμοποιούν πραγματικά δεδομένα αναλύσεων και βιοδεικτών μπορούν δυνητικά να χρησιμοποιηθούν για να κατανοήσουμε πλήρως τις πηγές της διακριτικής ποικιλότητας και να δημιουργήσουμε προγνωστικά μοντέλα προπονητικών προσαρμογών. Αυτές οι μεθοδολογίες μπορούν να είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τους αθλητές υψηλής απόδοσης, καθώς μπορούν να αξιοποιήσουν τα δεδομένα για να διαχειριστούν αποτελεσματικά την κόπωση και να βελτιστοποιήσουν τις προπονητικές τακτικές, ενισχύοντας έτσι τα αποτελέσματα των αθλητών.

Λέξεις κλειδιά: γενετική, βιοπληροφορική, ρυθμός αποκατάστασης

Εισαγωγή

Για την επίτευξη υψηλής αθλητικής απόδοσης, ιδιαίτερα σε υψηλό επίπεδο, είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός εξατομικευμένου και μακροπρόθεσμου προπονητικού προγράμματος, το οποίο αποτελεί μια οργανωμένη διαδικασία προετοιμασίας που στοχεύει στην αύξηση των φυσικών, ψυχολογικών και άλλων ικανοτήτων των αθλητών (Harte, 1982). Παρόλα αυτά, υπάρχουν αυξανόμενες αποδείξεις που υποστηρίζουν την ύπαρξη μεταβλητότητα στις αποκρίσεις μεταξύ των ατόμων, παρότι οι αθλούμενοι ακολουθούν το ίδιο προπονητικό πρόγραμμα (Churchward-Venne et al. 2015; Marsh et al., 2020), η οποία μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες, όπως το προπονητικό υπόβαθρο (Wilkinson et al. 2008), ο ρυθμός αποκατάστασης μετά από μία ή περισσότερες προπονητικές μονάδες (Thorpe et al., 2016) κ.λπ. Μεταξύ αυτών των παραγόντων, ο ρυθμός αποκατάστασης αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες, καθώς η διαχείριση της κόπωσης και του προπονητικού φορτίου αποτελεί βασικό στοιχείο της προπονητικής διαδικασίας (Halson, 2014; Thorpe, Atkinson et al., 2017).

Διεύθυνση αλληλογραφίας:

Γραμμένου Μαρία
Λέκτορας, Συντονίστρια του Διδακτορικού Προγράμματος Σπουδών «Επιστήμη
και Υγεία στο Ποδόσφαιρο»
Ινστιτούτο Αθλητικής και Προληπτικής Ιατρικής
Πανεπιστήμιο του Σάαρλαντ, Σααρμπρύνκεν, Γερμανία
maria.grammenou@uni-saarland.de

E-mail:

Ένας από τους παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζει το ρυθμό αποκατάστασης είναι το επίπεδο φυσικής κατάστασης, καθώς έχει αναφερθεί ότι άτομα με υψηλότερες φυσικές ικανότητες φαίνεται να είναι πιο ανθεκτικά στην κόπωση (Tomlin & Wenger, 2001; Kotikangas et al., 2024) και τείνουν να έχουν γρηγορότερο ρυθμό αποκατάστασης (Johnston et al., 2015; Lievens et al., 2020). Το επίπεδο των φυσικών ικανοτήτων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η προπόνηση, η διατροφή, ο τρόπος ζωής και άλλους. Ωστόσο η γενετική προδιάθεση αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα επίτευξης υψηλού επιπέδου φυσικής κατάστασης, καθώς αυτή καθορίζει το ανώτερο όριο απόδοσης που μπορεί να επιτευχθεί (Tucker & Collins, 2012).

Οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν επιτρέψει στους ερευνητές να εξερευνήσουν αναλυτικά τους γονιδιακούς πολυμορφισμούς που μπορούν να επηρεάσουν την αθλητική απόδοση (Semenova et al., 2023). Συγκεκριμένα, έχουν αναφερθεί 221 γονιδιακοί πολυμορφισμοί που σχετίζονται με την αθλητική απόδοση και τις προπονητικές αποκρίσεις (Semenova et al., 2023). Για παράδειγμα, ο πολυμορφισμός *ACTN3* R577X (rs1815739), έχει αποδειχθεί ότι έχει πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της δύναμης και της ισχύος (Yang, MacArthur et al. 2003). Πιο αναλυτικά, έχει αποδειχθεί ότι τόσο άντρες όσο και γυναίκες αθλητές ταχύτητας είναι λιγότερο πιθανό να κατέχουν το αλληλόμορφο X σε σύγκριση με αθλητές αντοχής. Επομένως, έχει προταθεί ότι ο γονότυπος RR είναι πιο επωφελής για αθλήματα ταχύτητας συγκριτικά με το γονότυπο XX (Yang et al., 2003; Norman et al., 2009).

Ωστόσο, είναι κοινά αποδεκτό ότι τα περισσότερα ανθρώπινα χαρακτηριστικά, όπως και οι φυσικές ικανότητες, επηρεάζονται από πολλαπλούς γονιδιακούς πολυμορφισμούς (Ruiz et al., 2009, Ruiz; Arteta et al., 2010). Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθεί μια προσέγγιση που να λαμβάνει υπόψη το αθροιστικό αποτέλεσμα πολλαπλών γονιδιακών πολυμορφισμών στην αθλητική απόδοση (Jones et al., 2016; Pickering et al., 2018). Πράγματι, δεδομένα από τους Ruiz και συν. (Ruiz et al., 2009; Ruiz et al., 2010) παρέχουν ενδείξεις ότι όταν συνδυάζονται πολυμορφισμοί που σχετίζονται είτε με την αντοχή είτε με τη δύναμη/ισχύ σε ένα Συνολικό Γονιδιακό Σκορ (TGS), το σκορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει την πιθανότητα να γίνει κανείς αθλητής αντοχής ή αθλητής δύναμης/ισχύος.

Παρόλα αυτά, ένας από τους μεγαλύτερους περιορισμούς των μεθόδων που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή είναι ότι οι γονιδιακοί πολυμορφισμοί που χρησιμοποιούνται στη δημιουργία του σκορ συνήθως δεν επαληθεύονται σε πολλαπλές ανεξάρτητες πληθυσμιακές ομάδες (Pickering et al., 2019). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ενσωματώνονται στο σκορ πολυμορφισμοί που μπορεί να μην έχουν πραγματική συσχέτιση με έναν φαινότυπο, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να μειώνει την ικανότητα του σκορ να διακρίνει μεταξύ ατόμων με διαφορετικές φυσικές ικανότητες (Guilherme 7 Lancha Jr, 2020). Συνεπώς, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν προσεγγίσεις βασισμένες εξολοκλήρου στα δεδομένα για να ενισχυθεί η εμπιστοσύνη μας στα αποτελέσματα και στην πρακτική εφαρμογή των γονιδιακών σκορ στην προπονητική διαδικασία.

Συνεπώς ο στόχος της σειράς μελετών που θα παρουσιαστούν ήταν η διεξαγωγή μιας γονιδιακής ανάλυσης [αγγλικός όρος: Genome Wide Association Study (GWAS)] για να εξεταστεί η σχέση μεταξύ των γονιδιακών πολυμορφισμών και φυσικών ικανοτήτων όπως η δύναμη και η αερόβια ικανότητα, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τη μελέτη UK Biobank.

Ο δεύτερος στόχος είναι τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό ενός TGS (Ανάπτυξη των Γονοτυπικών Σκορ), το οποίο εξετάστηκε περαιτέρω σε ένα ξεχωριστό δείγμα, για να επαληθευτεί η χρησιμότητα αυτών των σκορ. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας

υπόψιν ότι ο ρυθμός αποκατάστασης επηρεάζεται από το επίπεδο φυσικής κατάστασης, ο στόχος της μελέτης ήταν αν εξεταστεί εάν το γενετικό υπόβαθρο επηρεάζει το ρυθμό αποκατάστασης μετά από μία προπονητική μονάδα.

Μέθοδος

Συμμετέχοντες

Μελέτη 1

Στην πρώτη μελέτη το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από τη μελέτη UK Biobank που διεξήχθη στο Ηνωμένο Βασίλειο. Στη μελέτη πήραν μέρος 503.317 συμμετέχοντες ηλικίας 40 έως 69 ετών που επιστρατεύτηκαν από διάφορα κέντρα σε όλη την Αγγλία, την Ουαλία και τη Σκωτία (Bycroft et al., 2018). Η μελέτη εγκρίθηκε από την Πολυκεντρική Επιτροπή Ηθικής Έρευνας της Βορειοδυτικής Αγγλίας, το Εθνικό Συμβούλιο Διακυβέρνησης Πληροφοριών για την Υγεία και την Κοινωνική Φροντίδα στην Αγγλία και την Ουαλία, καθώς και την Συμβουλευτική Ομάδα του Μητρώου Υγείας στην Κοινότητα στη Σκωτία. Ο αριθμός έγκρισης είναι 11/NW/0382.

Μελέτη 2

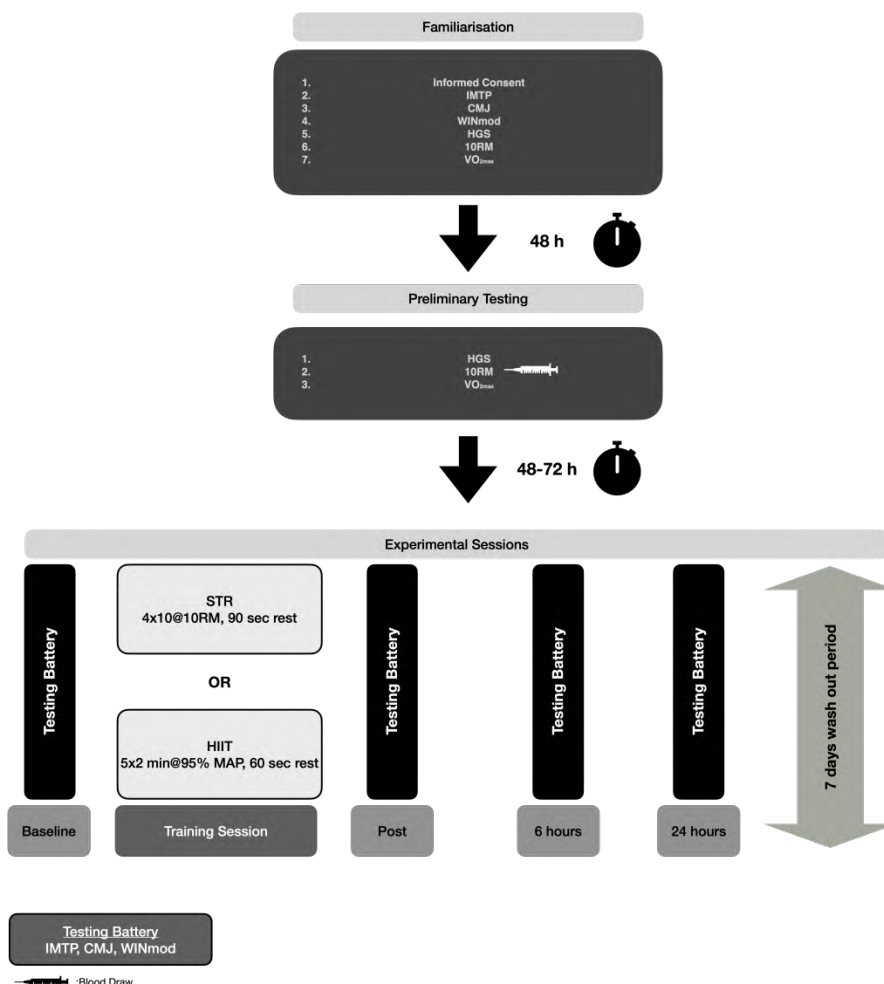
Συνολικά, είκοσι οκτώ άνδρες ($n=21$) και γυναίκες ($n=9$) συμμετέχοντες, οι οποίοι επισκέφθηκαν το εργαστήριο 8 φορές μέσα σε διάρκεια 15-17 μέρες (Σχήμα 1). Οι συμμετέχοντες είχαν εμπειρία στην προπόνηση με αντιστάσεις για τουλάχιστον δύο φορές την εβδομάδα για τουλάχιστον 6 μήνες. Ο αριθμός των συμμετεχόντων επιλέχθηκε με βάση ανάλυση ισχύος *a priori*, λαμβάνοντας υπόψη μέγεθος αποτελέσματος 0,6 και επίπεδο $\alpha=0,05$ και στατιστική ισχύ 0,8. Για να είναι επιλέξιμοι για συμμετοχή, οι συμμετέχοντες έπρεπε να πληρούν τα ακόλουθα κριτήρια:

1. Να έχουν εμπειρία σε προπόνηση με αντιστάσεις τουλάχιστον δύο φορές την εβδομάδα τους τελευταία έξι μήνες πριν τη συμμετοχή τους στη μελέτη.
2. Να είναι σε θέση να εκτελέσουν 10 μέγιστες επαναλήψεις (10 ME) με αντίσταση τουλάχιστον 1,5 φορές το βάρος του σώματος τους.

Οι ασκούμενοι δεν μπορούσαν να συμμετέχουν, εάν υπήρχε:

1. Οποιοδήποτε τραυματισμός στα κάτω άκρα εντός των έξι προηγούμενων μηνών πριν από τη συμμετοχή.
2. Χρήση εργογονικών βοηθημάτων που βελτιώνουν την απόδοση, όπως τα omega-3 ή αγγειοδιασταλτικά.
3. Κατανάλωση περισσότερων από 1200 mg αντιφλεγμονώδων φαρμάκων (NSAIDs) κατά την εβδομάδα που προηγείται της συμμετοχής (Calabrese & Rooney 1986).

Όλοι οι συμμετέχοντες παρείχαν τη συγκατάθεση τους και συμπλήρωσαν ένα ερωτηματολόγιο της Εταιρείας Ασκήσεως και Επιστήμης Αθλητισμού Αυστραλίας (ESSA), σύμφωνα με τις οδηγίες που έχει θέσει η Επιστημονική Επιτροπή Ηθικής Έρευνας του Πανεπιστημίου Edith Cowan (Αριθμός Έγκρισης: 2020-0298).



Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση του σχεδιασμού της μελέτης.

Σημειώσεις: IMTP=Ισομετρική έλξη, CMJ=Άλμα με ταλάντευση, WINmod=Τροποποιημένο Wingate Τεστ, HGS=Δύναμη λαβής χεριού, 10RM=10 Μέγιστες επαναλήψεις, VO_{2max} =Μέγιστη πρόσληψη οξυγόνου, MAP=Μέγιστη αερόβια ισχύς, STR=Προπόνηση Δύναμης, HIIT=Προπόνηση υψηλής έντασης διάρκειας

Όργανα Μέτρησης

Μελέτη 1

Σταθερό εργόμετρο: Bosch, eBike, Firmware v1.7 (Γκέρλινγκεν, Βάδη-Βυρτεμβέργη, Γερμανία)

Ηλεκτροκαρδιογράφος: GE Healthcare, CAM-USB 6.5, Cardiosoft v6.5 (Σικάγο, Ιλλινόις, ΗΠΑ)

Υδραυλικό δυναμόμετρο χεριού: Lafayette Instrument USA, Jamar J00105 (Λαφαγιέτ, Ιντιάνα, ΗΠΑ)

Μελέτη 2

Υδραυλικό δυναμόμετρο χεριού: Lafayette Instrument USA, Jamar J00105 (Λαφαγιέτ, Ιντιάνα, ΗΠΑ)

Ποδηλατικό εργόμετρο: Wattbike Pro Nottingham (Νότινχαμ, Ηνωμένο Βασίλειο)

Πρέσα ποδιών: Cybex (Ρόσμοντ, Ιλλινόις, ΗΠΑ)

Αναλυτής πρόσληψης οξυγόνου: Parvo Medics, True One (Σολτ Λέικ Σίτι, ΗΠΑ).

Καρδιοσυχνόμετρο: Polar Electro Oy, H10 (Κέμπελε, Φινλανδία)

Vacutainers αιμοληψίας: Livingstone International (Νέα Νότια Ουαλία, Αυστραλία)

Ρυθμιζόμενη βάση ισομετρικών τεστ: Fitness Technology (Αδελαΐδα, Αυστραλία)

Πλατφόρμα μέτρησης της δύναμης: BP1200; AMT1, Newton (Μασαχουσέτη, ΗΠΑ)

Φορητό γωνιόμετρο: Exacta Goniometer (Καλιφόρνια, ΗΠΑ)

Κιτ εξαγωγής DNA: QIAamp DNA maxi, Qiagen (Χίλντεν, Γερμανία)

Διαδικασίες

Μελέτη 1

Φαινότυποι Ενδιαφέροντος

Οι συμμετέχοντες στη μελέτη UK Biobank υποβλήθηκαν σε πολλαπλές φυσικές δοκιμές, συμπεριλαμβανομένων των φαινοτύπων ενδιαφέροντος της παρούσας μελέτης, οι οποίοι περιλάμβαναν τη δύναμη (δύναμη λαβής χεριού) και την αερόβια ικανότητα (μέγιστο έργο που επιτεύχθηκε σε μια δοκιμή με εργομετρικό ποδήλατο με αυξανόμενη ένταση).

Υπολογισμός t-σκορ

Για να μετατρέψουμε τις μετρήσεις της δύναμης λαβής χεριού (HGS) και της μέγιστης αερόβιας ισχύος (MAP) σε t-σκορ, τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά από τους αθλητικούς επιστήμονες για να ποσοτικοποιήσουν την απόδοση με τρόπο συγκρίσιμο με την απόδοση άλλων ατόμων (Turner, Jones et al. 2019), εφαρμόσαμε τον ακόλουθο τύπο, όπου SD είναι η τυπική απόκλιση και $\sqrt{n}$ είναι η ριζική μέση τετραγωνική τιμή του μεγέθους του δείγματος.

$$t\text{-score} = (\text{ατομική βαθμολογία} - \text{μέση ομαδική βαθμολογία}) / (SD / \sqrt{n})$$

Συνολικός Βαθμός Φυσικής Κατάστασης (TFS)

Δεδομένου ότι οι συμμετέχοντες στη μελέτη UK Biobank εκτέλεσαν δοκιμές σε πολλαπλές περιπτώσεις (instances), ο Συνολικός Βαθμός Φυσικής Κατάστασης (TFS) δημιουργήθηκε αφού πραγματοποιήσαμε μια ανάλυση ποιοτικού ελέγχου για να απομακρύνουμε τους συμμετέχοντες που δεν διέθεταν είτε βαθμολογίες HGS είτε MAP σε καμία από τις περιπτώσεις. Ένας βαθμός δημιουργήθηκε στη συνέχεια για όλους τους συμμετέχοντες και για τις δύο περιπτώσεις με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\text{Περίπτωση 1 - TFS1} = (t\text{-score}_{\text{HGS1}} + t\text{-score}_{\text{MAP1}}) / 2$$

$$\text{Περίπτωση 2 - TFS2} = (t\text{-score}_{\text{HGS2}} + t\text{-score}_{\text{MAP2}}) / 2$$

Τα δεδομένα από τις περιπτώσεις 1 και 2 συνδυάστηκαν για όλες τις αναλύσεις, και όπου οι συμμετέχοντες υποβλήθηκαν σε δοκιμές και στις δύο περιπτώσεις, συμπεριλήφθηκε μόνο ο υψηλότερος βαθμός TFS.

Γονιδιακά Δεδομένα

Η μελέτη UK Biobank περιλαμβάνει επίσης γονιδιακά δεδομένα. Τα δεδομένα προήλθαν από δείγματα DNA που εξήχθησαν από αποθηκευμένο αίμα. Όλοι οι γονοτυπικοί έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν από το Εργαστήριο Ερευνών Affymetrix (Bycroft et al., 2018).

Ποιότητα Ελέγχου Γενετικών Δεδομένων και GWAS Ποσοτικών Χαρακτηριστικών

Πριν από την εξέταση της συσχέτισης μεταξύ γενετικών δεικτών και φαινοτύπων, τα δεδομένα γονοτύπησης προετοιμάστηκαν με το να αφαιρεθούν γενετικοί δείκτες με ποσοστό κλήσης γονοτύπησης <95% και ελάχιστη συχνότητα ελαχίστης αλληλεπίδρασης <0,01. Για την αναγνώριση της συσχέτισης μεταξύ γενετικών δεικτών και φαινοτύπων πραγματοποιήθηκε γραμμική παλινδρόμη ανάλυση χρησιμοποιώντας το R Studio (πακέτο lme4) (Chang, Chow et al. 2015). Όλες οι αναλύσεις συσχέτισης πραγματοποιήθηκαν στο υποσύνολο ίσο με τα 2/3 του δείγματος (δείγμα ανίχνευσης). Η ανάλυση περιλάμβανε την ηλικία και το φύλο καθώς και τον κύριο συνιστώσα ως συνδεδεμένες μεταβλητές. Η υψηλή αυστηρότητα εφαρμόζεται για τη μείωση των ψευδών θετικών αποτελεσμάτων, αλλά αυξάνει επίσης την πιθανότητα ψευδών αρνητικών αποτελεσμάτων. Έτσι, η μείωση της αυστηρότητας επιτρέπει στους ερευνητές να ανιχνεύσουν του γονιδιακούς πολυμορφισμούς, αλλά αυτή η προσέγγιση απαιτεί επιβεβαίωση σε άλλα ανεξάρτητα δείγματα για να επιβεβαιωθεί η συσχέτιση. Μελετήσαμε τις συσχετίσεις των μεμονωμένων παραλλαγών και διαφορετικά επίπεδα αυστηρότητας, από την καθολική σημαντικότητα στην γενική αποδεικτικότητα p τιμών.

Επαλήθευση Αποτελεσμάτων

Για την επικύρωση των γονιδιακών συσχετίσεων που εντοπίστηκαν στο δείγμα εξέτασης, πραγματοποιήσαμε μια ανάλυση γραμμικής παλινδρόμης συσχέτισης στο ξεχωριστό δείγμα επικύρωσης (1/3 του συνολικού δείγματος). Όλοι οι μεμονωμένοι πολυμορφισμοί που αναγνωρίστηκαν ως συσχετισμένοι σε επίπεδο ονομαστικής σημαντικότητας ($p < 0,05$) στο δείγμα ανακάλυψης αξιολογήθηκαν στο υποσύνολο επικύρωσης.

Ανάπτυξη των Γονοτυπικών Σκορ

Ανάπτυξη των Γονοτυπικών Σκορ (TGS)

Εκτός από την αξιολόγηση των επιπέδων καθολικής σημαντικότητας σε γενετικό επίπεδο, αναλύθηκε επίσης ονομαστικές τιμές σημαντικότητας p στην έρευνά μας. Επομένως, δημιουργήθηκε ένα γονοτυπικό σκορ (TGS) για κατώτερα όρια τιμών p από $p < 5 \times 10^{-6}$ έως $p < 5 \times 10^{-3}$ για κάθε συγκεκριμένο μεταβλητή ενδιαφέροντος (HGS, MAP and TFS), ενσωματώνοντας τους πολυμορφισμούς που συσχετίζονται με το αντίστοιχο αποτέλεσμα στο καθορισμένο όριο τιμής p . Για παράδειγμα, αν 10 πολυμορφισμοί συνδέονταν με την MAP σε επίπεδο $p < 5 \times 10^{-5}$, το TGS για τη MAP θα περιλάμβανε αυτούς τους 10 πολυμορφισμούς και θα σημειωνόταν ως $\text{mapTGS}_{0.00005}$. Αυτή η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε όλες τις μετρήσεις αποτελεσμάτων και τα όρια τιμής p , με αποτέλεσμα τη δημιουργία 12 TGS, τα οποία ονομάζονται ως εξής: $\text{hgsTGS}_{0.000005}$, $\text{hgsTGS}_{0.00005}$, $\text{hgsTGS}_{0.0005}$, $\text{hgsTGS}_{0.005}$, $\text{mapTGS}_{0.000005}$, $\text{mapTGS}_{0.00005}$, $\text{mapTGS}_{0.0005}$, $\text{mapTGS}_{0.005}$, $\text{tfsTGS}_{0.000005}$, $\text{tfsTGS}_{0.00005}$, $\text{tfsTGS}_{0.0005}$ και $\text{tfsTGS}_{0.005}$. Το TGS για κάθε συμμετέχοντα υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό στατιστικής R (RStudio Team, Βοστώνη, Μασαχουσέτη, ΗΠΑ). Οι βήτα συντελεστές για την κατανομή του γενετικού υλικού βασίστηκαν στην ανάλυση συσχέτισης που πραγματοποιήθηκε στο υποσύνολο δείγματος εξέτασης (2/3). Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το εξής και βασίστηκε στο μοντέλο των Williams και Folland (Williams and Folland 2008):

$$TGS = (GS1*B1 + GS2*B2 + \dots + GS_n*B_n) * 100$$

Εξέταση των Γονοτυπικών Σκορ

Για όλες τις στατιστικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το RStudio (RStudio Team, Βοστώνη, Μασαχουσέτη, ΗΠΑ). Οι συμμετέχοντες δείγμα επαλήθευσης (1/3) ομαδοποιήθηκαν σε τρίτα με βάση το TGS τους που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας πολυμορφισμούς που συσχετίζονται με HGS, MAP και TFS, με αποτέλεσμα να υπάρχουν τρία διαφορετικά σκορ TGS για κάθε συμμετέχοντα (hgsTGS, mapTGS και tfsTGS). Η κανονικότητα της κατανομής των δεδομένων επαληθεύθηκε μέσω της εξέτασης των Q-Q διαγραμμάτων και της εφαρμογής των δοκιμών Shapiro-Wilk.

Για να αξιολογηθούν οι διαφορές μεταξύ των ομάδων TGS και της απόδοσης, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση διακύμανσης (ANCOVA), με την ηλικία ως συνδεδεμένη μεταβλητή, ενώ πραγματοποιήθηκαν δύο ξεχωριστές αναλύσεις για άνδρες και γυναίκες (Silveira, Pokhvisneva et al. 2023). Σε περίπτωση στατιστικά σημαντικού αποτελέσματος TGS, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ακολουθιών Holms-Bonferroni για την εξέταση περαιτέρω διαφορών μεταξύ των ομάδων.

Για να αντιμετωπιστεί η πιθανότητα για σφάλματα τύπου I, εφαρμόστηκαν διορθώσεις πολλαπλών ελέγχων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο false discovery rate (FDR). Αυτή η διόρθωση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση p.adjust εντός του πακέτου stats (έκδοση 3.6.2) στο R Studio. Συνεπώς, οι αναφερόμενες τιμές p αναφέρονται στις διορθωμένες τιμές p με βάση το FDR. Το επίπεδο σημαντικότητας τέθηκε στο $p < 0,05$, ενώ οι ορίσεις του μεγέθους επιρροής καθορίστηκαν ως εξής: $< 0,2$ (ασήμαντο), $0,21-0,5$ (μικρό), $0,51-0,8$ (μέτριο), $0,81-1,2$ (μεγάλο), $1,2-2,0$ (πολύ μεγάλο), $> 2,0$ (σημαντικό).

Μελέτη 2

Αφού οι συμμετέχοντες ολοκλήρωσαν τη συμπλήρωση της φόρμας συγκατάθεσης, εξοικειώθηκαν με τις διαδικασίες, συμπεριλαμβανομένων της δύναμης λαβής χεριού (handgrip strength: HGS), της ισομετρικής έλξης (isometric mid-thigh pull: IMTP), του άλματος με ταλάντευση (countermovement jump: CMJ) και Wingate τεστ (WINmod). Για να αποφευχθεί η κόπωση, οι συμμετέχοντες εξοικειώθηκαν μόνο με τρία στάδια αυξανόμενης έντασης για το τεστ μέγιστης πρόσληψης οξυγόνου (VO_{2max}), καθώς και για το τεστ 10 ME για πρέσα ποδιών (10 RM).

Δύο μέρες μετά τη συνεδρία εξοικείωσης, οι συμμετέχοντες επέστρεψαν στο εργαστήριο έτσι ώστε να εκτελέσουν τα τεστ (HGS, 10 RM, VO_{2max}) καθώς και για την αιμοληψία. Τα αιματολογικά δείγματα λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του διαλλείματος διάρκειας 30 λεπτών διαλλείματος μεταξύ του τεστ 10 RM και VO_{2max} .

Δύναμη Χειρολαβής

Η δύναμη της χειρολαβής αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό δυναμόμετρο χειρολαβής (Lafayette Instrument, μοντέλο 5030D1, Indianapolis, ΗΠΑ), ακολουθώντας καθιερωμένα πρωτόκολλα (Crossland, Piasecki et al. 2020). Συνοπτικά, οι συμμετέχοντες πραγματοποίησαν τρεις δοκιμές διάρκειας 3 δευτερολέπτων για κάθε χέρι, με διάλειμμα 1 λεπτού μεταξύ των δοκιμών. Η καλύτερη δοκιμή για κάθε χέρι υπολογίστηκε και χρησιμοποιήθηκε για περαιτέρω ανάλυση.

10 Μέγιστες Επαναλήψεις στην Πρέσα Ποδιών

Μετά την ολοκλήρωση μιας γενικής προθέρμανσης που περιελάμβανε 5 λεπτά πετάλι σε έναν εργομετρικό ποδήλατο (Wattbike Pro Nottingham, UK) με επίπεδο αντίστασης αέρα 4, οι συμμετέχοντες ακολούθησαν μια τυποποιημένη διαδικασία προθέρμανσης που έχει χρησιμοποιηθεί προηγουμένως (Kraemer, Fry et al. 1995). Συνοπτικά, οι συμμετέχοντες πραγματοποίησαν ένα σετ 10 επαναλήψεων με φορτίο ίσο με το 50% του εκτιμώμενου φορτίου 10 ME και στη συνέχεια ένα φορτίο ίσο με το 75% (Kraemer, Fry et al. 1995). Στη συνέχεια, οι συμμετέχοντες πραγματοποίησαν μια προσπάθεια 10 ME, με ανώτερο όριο τις τρεις προσπάθειες χρησιμοποιώντας μια πρέσα ποδιών (Cybex, Rosemont, Illinois, ΗΠΑ) και με διάλειμμα 3 λεπτών μεταξύ των προσπαθειών. Συγκεκριμένα, μετά την προθέρμανση, οι συμμετέχοντες αξιολογήθηκαν σε φορτίο ίσο με το 90% της εκτίμησής τους. Η αντίσταση αυξήθηκε προοδευτικά κατά 2.5 κιλά έως 20 κιλά μέχρι οι συμμετέχοντες να μην μπορέσουν να ολοκληρώσουν 10 επαναλήψεις (Kraemer, Fry et al. 1995). Εάν μια προσπάθεια ήταν ανεπιτυχής, οι συμμετέχοντες λάμβαναν διάλειμμα 3 λεπτών και το φορτίο μειωνόταν κατά 5-10 κιλά (Kraemer et al., 1995). Για να διασφαλιστεί ότι επιτεύχθηκε ένα ακριβές τεστ 10 ME, για να μετρηθεί μια επανάληψη, το ανώτερο μέρος των μηρών έπρεπε να είναι παράλληλο με την πλάκα της πρέσας ποδιών και να επιτευχθεί πλήρης έκταση κατά τη σύγκεντρη φάση (Kraemer et al., 1995).

Μέγιστη Πρόσληψη Οξυγόνου (VO_{2max})

Οι συμμετέχοντες υποβλήθηκαν σε δοκιμή VO_{2max} που πραγματοποιήθηκε σε εργομετρικό ποδήλατο (Wattbike Pro Nottingham, UK). Σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή, το τεστ ξεκίνησε στα 120 Watt για τους άνδρες ή στα 80 Watt για τις γυναίκες, με αυξήσεις κατά 20 Watt για τους άνδρες ή 15 Watt για τις γυναίκες ανά λεπτό μέχρι την εξάντληση (Johnston et al., 2015). Μετρήσεις της κατανάλωσης οξυγόνου (VO_2), της παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα (VCO_2) και της αναπνευστικής ανταλλαγής (RER) καταγράφηκαν και υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο ανά 20 δευτερόλεπτα (Parvo Medics, True One, Salt Lake City, USA). Η καρδιακή συχνότητα (Polar Electro Oy, Kempele, Finland) και η αξιολόγηση της αντιλαμβανόμενης καταπόνησης των συμμετεχόντων καταγράφηκαν στο τέλος κάθε σταδίου με κλίμακα Borg, σε επίπεδο 1-10 (McLaren, Coutts et al. 2021). Η μέγιστη αερόβια ισχύς (MAP) προσδιορίστηκε ως η ισχύς κατά την εκούσια κόπωση, ενώ η εγκυρότητα της δοκιμής αξιολογήθηκε με βάση τα καθιερωμένα κριτήρια (Gore et al., 2013).

Δείγματα Αίματος

Κατά την περίοδο μεταξύ της αξιολόγησης των 10 ME στην πρέσα ποδιών και του τεστ VO_{2max} , ένας γιατρός πήρε 5 mL αίματος από τη φλεβική κοιλότητα. Το αίμα συλλέχθηκε σε δοκιμαστικό σωλήνα κενού που περιείχε αιθυλενοδιαμινοτετραοξικό οξύ (EDTA) (Livingstone International, Mascot, NSW, Australia). Μετά τη συλλογή, τα δείγματα ολικού αίματος αποθηκεύτηκαν άμεσα σε καταψύκτη σε θερμοκρασία $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αυτά τα δείγματα διατηρήθηκαν για μετέπειτα εξαγωγή και ανάλυση DNA, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για όλους τους συμμετέχοντες μετά την ολοκλήρωση της μελέτης σε μια κοινή παρτίδα.

Πειραματικές Συνεδρίες

Οι συμμετέχοντες επέστρεψαν στο εργαστήριο για την πρώτη πειραματική συνεδρία 48-72 ώρες μετά την αρχική αξιολόγηση. Στην αρχή κάθε επίσκεψης, οι συμμετέχοντες ολοκλήρωσαν μια εκτενή δοκιμαστική δέσμη μετρήσεων, η οποία περιλάμβανε τα IMTP, CMJ και WINmod. Αυτές οι αξιολογήσεις επαναλήφθηκαν αμέσως μετά την προπόνηση καθώς και 6 και 24 ώρες μετά την προπόνηση. Μετά από μια ελάχιστη περίοδο αποχής 7 ημερών, οι συμμετέχοντες επισκέφθηκαν ξανά το εργαστήριο για τη δεύτερη προπονητική συνεδρία, κατά την οποία οι διαδικασίες πριν και μετά την άσκηση παρέμειναν ίδιες με την αρχική συνεδρία. Πριν από κάθε πειραματική συνεδρία, οι συμμετέχοντες συμμετείχαν σε μια τυποποιημένη διαδικασία προθέρμανσης. Αυτή η προθέρμανση περιλάμβανε 5 λεπτά πετάλι σε εργομετρικό ποδήλατο (Wattbike Pro Nottingham, UK) σε επίπεδο αντίστασης αέρα 4, ακολουθούμενη από μια τυποποιημένη διαδικασία προθέρμανσης όπως έχει καταγραφεί προηγουμένως (Comfort et al., 2022).

Ισομετρική Έλξη (IMTP)

Μετά την τυποποιημένη προθέρμανση, οι συμμετέχοντες υποβλήθηκαν σε τρεις προσπάθειες IMTP, βασισμένες σε προηγουμένως δημοσιευμένες μεθόδους (Comfort et al., 2019; Comfort et al., 2022). Συνοπτικά, οι συμμετέχοντες τοποθετήθηκαν, σύμφωνα με καθιερωμένες κατευθυντήριες γραμμές (Chavda et al., 2020), σε μία ακίνητη ρυθμιζόμενη βάση ισομετρικών τεστ (Fitness Technology, Adelaide, Australia), που τοποθετήθηκε πάνω σε μια πλατφόρμα δύναμης που δειγμάτιζε με ρυθμό 2.000 Hz (BP1200; AMT1, Newton, MA, USA) (Guppy et al., 2019). Μόλις ο συμμετέχων βρισκόταν στη σωστή θέση, οι γωνίες του γόνατος και του ισχίου μετρήθηκαν με ένα φορητό γωνιόμετρο (Exacta Goniometer, California, USA) και η τοποθέτηση των ποδιών ποσοτικοποιήθηκε με τη χρήση ενός πλέγματος που τοποθετήθηκε στην πλατφόρμα δύναμης για να εξασφαλιστεί ότι η ίδια θέση σώματος και τοποθέτηση ποδιών χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δοκιμές. Οι συμμετέχοντες πραγματοποίησαν τρεις προσπάθειες και κατά τη διάρκεια όλων των προσπαθειών χρησιμοποιήθηκαν ιμάντες άρσης βαρών και δόθηκαν τυποποιημένες οδηγίες και λεκτική ενθάρρυνση σύμφωνα με προηγουμένως δημοσιευμένες μεθόδους (Chavda et al., 2020).

Συγκεκριμένα, οι συμμετέχοντες ξεκίνησαν να τραβούν με την εντολή "3,2,1, τραβήξτε". Κάθε προσπάθεια πραγματοποιήθηκε για 5 δευτερόλεπτα ή μέχρι να υπάρξει οπτική μείωση της καμπύλης δύναμης (Dos'Santos et al., 2017; Brady et al., 2020; Chavda et al., 2020). Εάν υπήρχε διαφορά στη μέγιστη δύναμη (PF) που ξεπερνούσε τα 250 N μεταξύ των προσπαθειών (Kraska et al., 2009), ή αν ανιχνευόταν υπερβολική εφαρμογή δύναμης στη μπάρα, οριζόμενη ως μια παραγωγή δύναμης πάνω από 100 N πάνω από το σωματικό βάρος, αμέσως πριν την έναρξη μιας δοκιμής (Comfort et al., 2019), αυτή η συγκεκριμένη προσπάθεια εξαιρούνταν από την ανάλυση και πραγματοποιούνταν μια επιπλέον προσπάθεια. Οι προσπάθειες επίσης επιθεωρούνταν οπτικά σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της συλλογής δεδομένων. Οποιοσδήποτε προσπάθειες θεωρούνταν ότι περιείχαν ταλάντευση από τον ερευνητή εξαιρούνταν, και πραγματοποιούνταν μια επιπλέον προσπάθεια (Comfort et al., 2019). Η ανάλυση δεδομένων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα προσαρμοσμένο φύλλο Excel (Microsoft, Redmond, WA, USA). Συγκεκριμένα, η κορυφαία δύναμη (PF), η δύναμη στα 150ms (F150), η δύναμη στα 200ms (F200), η δύναμη στα 250ms (F250), ο ρυθμός ανάπτυξης δύναμης μεταξύ 0-150ms (RFD150), 0-200ms (RFD200), 0-250ms (RFD250) και

η ώθηση μεταξύ 0-150ms (IMP150), 0-200ms (IMP200) ποσοτικοποιήθηκαν. Επιπλέον, για να ληφθεί υπόψη οι διαστάσεις του σώματος, όλα τα δεδομένα δύναμης κλιμακώθηκαν αλωμετρικά με βάση τυποποιημένες διαδικασίες (Brady et al. 2020; Chavda et al., 2020). Οι στατιστικές αναλύσεις για όλες τις μεταβλητές πραγματοποιήθηκαν με βάση τη μέση τιμή των τριών προσπαθειών (Claudino et al., 2017).

Άλμα με Ταλάντευση (CMJ)

Πέντε λεπτά μετά την ολοκλήρωση των προσπαθειών IMTP, οι συμμετέχοντες πραγματοποίησαν μια σειρά από μέγιστα άλματα με ταλάντευση (CMJs) πάνω σε μια πλατφόρμα δύναμης με ρυθμό δειγματοληψίας 2.000 Hz (BP1200; AMT1, Newton, MA, USA). Τα CMJs πραγματοποιήθηκαν σε σετ των τριών, με διάλειμμα 1 λεπτού μεταξύ κάθε προσπάθειας. Οι συμμετέχοντες ξεκινούσαν κάθε άλμα με τα χέρια τοποθετημένα στη μέση ακούγοντας την εντολή "3,2,1, άλμα". Τα δεδομένα που ελήφθησαν από τις προσπάθειες CMJ αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας καθιερωμένες και τυποποιημένες διαδικασίες (Moir, 2008; Owen et al., 2014; Owen et al., 2014; Harry et al., 2020). Ένα προσαρμοσμένο φύλλο Excel (Microsoft, Redmond, WA, USA) (Chavda et al., 2018) χρησιμοποιήθηκε για να ποσοτικοποιηθούν το ύψος του άλματος (JH), ο χρόνος απογείωσης (TTO), η έκκεντρη μετατόπιση (ED) και ο τροποποιημένος δείκτης αντιδραστικής δύναμης (RSImod). Οι στατιστικές αναλύσεις για όλες τις μεταβλητές πραγματοποιήθηκαν με βάση τη μέση τιμή από τις τρεις προσπάθειες (Claudino et al., 2017).

Τροποποιημένη Δοκιμασία Wingate (WINmod)

Οι συμμετέχοντες πραγματοποίησαν τη δοκιμασία WINmod σε ένα εργομετρικό ποδήλατο (Wattbike Pro Nottingham, UK), σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή (Page 2016). Συνοπτικά, η προσπάθεια ξεκίνησε με τους συμμετέχοντες να ποδηλατούν αργά χωρίς αντίσταση για μια αρχική περίοδο 5 δευτερολέπτων. Στη συνέχεια, οι συμμετέχοντες έλαβαν εντολή να ποδηλατούν όσο το δυνατόν γρηγορότερα, ξεκινώντας την προσπάθειά τους με την εντολή "3,2,1, πάμε". Το επίπεδο αντίστασης επιλέχθηκε με βάση το σωματικό βάρος κάθε συμμετέχοντα αυτόματα από το λογισμικό της Wattbike. Οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να διατηρήσουν τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό για μια διάρκεια 30 δευτερολέπτων. Καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειας, οι συμμετέχοντες λάμβαναν ισχυρή λεκτική ενθάρρυνση για να τους κινητοποιήσουν και να εξασφαλίσουν τη μέγιστη προσπάθειά τους. Οι αναλυμένες μεταβλητές περιλάμβαναν τη μέγιστη ισχύ (PP), τη μέση ισχύ (MP) που αναλύθηκαν αυτόματα από το λογισμικό και τον δείκτη κόπωσης (FI%) που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο: $FI\% = [(Κορυφαία\ Ισχύς - Ελάχιστη\ Ισχύς) / Κορυφαία\ Ισχύς] * 100$.

Προπονητικές Συνεδρίες

Προπόνηση με Αντιστάσεις (STR)

Μετά από μια τυποποιημένη δυναμική προθέρμανση, οι συμμετέχοντες συμμετείχαν σε μια δομημένη προπονητική συνεδρία αντίστασης, η οποία αποτελούνταν από τέσσερα σετ στην πρέσα ποδιών που εκτελούνταν με φορτίο ίσο με το φορτίο που αντιστοιχούσε στις 10 ME. Το διάλειμμα μεταξύ των σετ ορίστηκε στα 90 δευτερόλεπτα. Εάν ένας συμμετέχων δεν μπορούσε να ολοκληρώσει τον προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε σετ, η ένταση ρυθμιζόταν. Αυτή η προσαρμογή κυμαινόταν από 5% έως 20% του προηγούμενου φορτίου που

χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη άσκηση. Για να διασφαλιστεί η ακρίβεια κάθε επανάληψης, ήταν απαραίτητο η κορυφή των μηρών να φτάνει σε παράλληλη θέση με την πλατφόρμα ποδιών στο κάτω μέρος κάθε κίνησης και να επεκτείνεται πλήρως κατά τη διάρκεια της σύγκεντρης φάσης. Ολόκληρη η προπονητική συνεδρία εποπτευόταν από έμπειρους προπονητές φυσικής κατάστασης για να διασφαλιστεί η σωστή μορφή και η τήρηση του πρωτοκόλλου.

Διαλειμματική Προπόνηση Υψηλής Έντασης (HIIT)

Οι συνεδρίες διαλειμματικής προπόνησης υψηλής έντασης (HIIT) διεξήχθησαν σε έναν εργομετρικό ποδήλατο (Wattbike Pro Nottingham, UK). Μετά από μια γενική προθέρμανση που περιλάμβανε 5 λεπτά ποδηλασίας με επίπεδο αντίστασης αέρα 4, οι συμμετέχοντες ολοκλήρωσαν πέντε σετ ποδηλασίας διάρκειας δύο λεπτών, με κάθε σετ να έχει ένταση ισοδύναμη με το 95% της MAP τους. Τα σετ διακόπτονταν με 1 λεπτό παθητικής ανάπαυσης. Ο καρδιακός ρυθμός (Polar Electro Oy, Kempele, Finland) και η αντίληψη του συμμετέχοντα για την προσπάθεια (RPE) καταγράφονταν σχολαστικά στο τέλος κάθε διαστήματος για να αξιολογηθούν οι φυσιολογικές τους αποκρίσεις και η αντίληψη της δυσκολίας της άσκησης. Καθ' όλη τη διάρκεια της συνεδρίας HIIT, οι συμμετέχοντες λάμβαναν ισχυρή λεκτική ενθάρρυνση για να τους κινητοποιήσουν να επιτύχουν τη μέγιστη προσπάθειά τους. Σε περιπτώσεις όπου ένας συμμετέχων δεν μπορούσε να ολοκληρώσει ένα πλήρες διάστημα δύο λεπτών, καταγραφόταν η διάρκεια που ολοκληρώθηκε και ο συμμετέχων προχωρούσε στο επόμενο σετ μετά από μια περίοδο παθητικής ανάπαυσης ενός λεπτού.

Στατιστική Ανάλυση

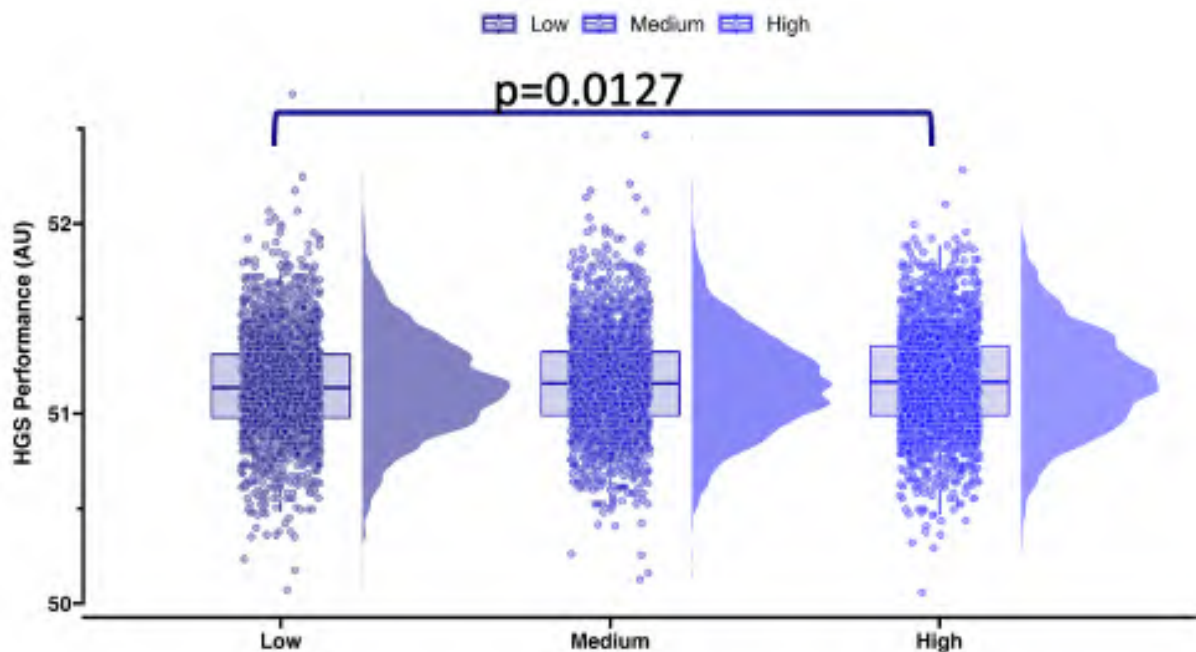
Όλες οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό στατιστικής ανάλυσης R (RStudio Team, Βοστώνη, Μασαχουσέτη, ΗΠΑ) σε συνδυασμό με το Excel (Microsoft, Redmond, Washington, USA). Για να αξιολογηθεί η επίδραση των γονοτυπικών σκορ στα κύρια αποτελέσματα (δηλ. HGS, MAP και TFS), πραγματοποιήσαμε ανάλυση ANOVA μιας κατεύθυνσης, με το φύλο και την ηλικία ως συνδεδεμένες μεταβλητές.

Για την αξιολόγηση του ρυθμού αποκατάστασης μετά τις προπονητικές μονάδες, οι τιμές Δ diff υπολογίστηκαν για κάθε χρονικό σημείο. Η κανονικότητα της κατανομής των δεδομένων αξιολογήθηκε μέσω οπτικής επιθεώρησης των διαγραμμάτων Q-Q και του τεστ Shapiro-Wilk. Οι συμμετέχοντες στη συνέχεια ομαδοποιήθηκαν σε τρίτα βάσει του γονοτυπικού τους σκορ για κάθε εξεταζόμενο όριο τιμής p (δηλαδή, $p < 5 \times 10^{-6}$ έως $p < 5 \times 10^{-2}$). Ωστόσο, λόγω του ότι χρησιμοποιήσαμε διαφορετική συστοιχία καθώς και του γεγονότος ότι ορισμένα γονοτυπικά σκορ ήταν ασύμμετρα και η ομαδοποίηση σε τρίτα δεν είχε τις ίδιες ομάδες μεγέθους δείγματος, πραγματοποιήσαμε αναλύσεις μόνο για τα ακόλουθα TGS: hgsTGS0.0005, hgsTGS0.005, hgsTGS0.05, mapTGS0.005, mapTGS0.05, tfsTGS0.005 και tfsTGS0.05. Ένα γραμμικό μικτό μοντέλο εκτελέστηκε χρησιμοποιώντας το πακέτο lme4 στο R studio για να εξεταστούν οι διαφορές στο ρυθμό αποκατάστασης μεταξύ των επιπέδων γονοτυπικών σκορ και των διαφόρων χρονικών σημείων (Williams et al., 2021). Ο χρόνος και τα επίπεδα γονοτυπικών σκορ ενσωματώθηκαν στο μοντέλο ως σταθερές μεταβλητές, ενώ το TGS και οι μεμονωμένοι συμμετέχοντες λήφθηκαν υπόψη ως τυχαίες μεταβλητές. Επιπλέον, το συνολικό προπονητικό φορτίο που πραγματοποιήθηκε συμπεριλήφθηκε στο μοντέλο ως συνδεδεμένες μεταβλητές, λαμβάνοντας υπόψη στατιστικά σημαντικές διαφορές στο φορτίο εργασίας μεταξύ των ομάδων, εκτός από το φύλο και την ηλικία.

Οι μετα-αναλύσεις διορθώθηκαν για πολλαπλές συγκρίσεις χρησιμοποιώντας τη διαδοχική διόρθωση Holm-Bonferroni.

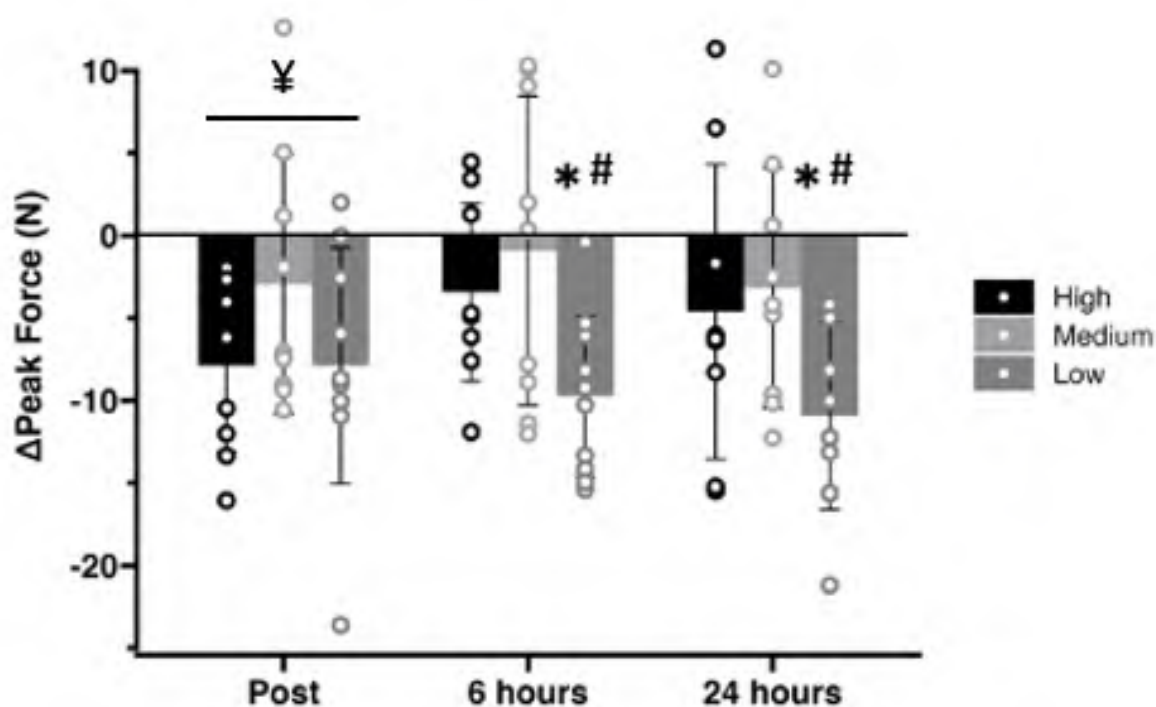
Αποτελέσματα

Με βάση τα αποτελέσματα των μελετών που παρουσιάστηκαν φαίνεται ότι η δημιουργία γονοτυπικών σκορ μπορεί να έχει χρησιμότητα στην πρόβλεψη των φυσικών ικανοτήτων. Συγκεκριμένα φαίνεται ότι στο δείγμα των ανδρών, οι συμμετέχοντες με υψηλότερο γονοτυπικό σκορ ($hgsTGS_{0.00005}$) φαίνεται ότι έχουν υψηλότερα επίπεδα δύναμης στα άνω άκρα (Σχήμα 2) όπου η ομάδα με υψηλό γονοτυπικό σκορ, έδειξε να έχει υψηλότερα επίπεδα δύναμης των άνω άκρων σε σύγκριση με την ομάδα χαμηλού γονοτυπικού σκορ ($p=0,00127$).



Σχήμα 2. Επίδραση $hgsTGS_{0.00005}$ στη δύναμη των άνω άκρων.

Τα αποτελέσματα της πρώτης μελέτης ήταν σε ένα βαθμό έγκυρα στη δεύτερη μελέτη όπου εξετάστηκε εάν η χρήση των πολυμορφισμών που εξετάστηκαν στην πρώτη μελέτη μπορούσαν να επαληθευθούν σε ένα ανεξάρτητο δείγμα. Η χρήση του γονοτυπικού σκορ που δημιουργήθηκε από πολυμορφισμούς που συσχετίζονται με τη δύναμη των άνω άκρων είχε επίδραση στο ρυθμό αποκατάστασης της μέγιστης δύναμης που παράχθηκε κατά τη διάρκεια μιας δοκιμασίας IMTP. Συγκεκριμένα, η μέγιστη δύναμη αμέσως μετά την προπονητική μονάδα είχε σημαντική μείωση από την αρχική τιμή (Σχήμα 3). Παρόλα αυτά η ομάδα με το χαμηλότερο γονοτυπικό σκορ είχε μειωμένη παραγωγή δύναμης ακόμη και μετά από 6 ή 24 ώρες μετά την προπονητική μονάδα. Καμία άλλη διαφορά δεν παρατηρήθηκε μεταξύ των διαφορετικών γκρουπ.



Σχήμα 3. Μείωση της μέγιστης δύναμης μετά την προπονητική μονάδα.

Συζήτηση

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης φαίνεται ότι οι μελέτες GWAS μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για τη σχέση μεταξύ μεμονωμένων γονιδιακών πολυμορφισμών και φαινοτύπων όπως η δύναμη των άνω άκρων, η μέγιστη αερόβια ισχύς κ.λπ. Συγκεκριμένα βρήκαμε 35 πολυμορφισμούς που σχετίζονται με τη δύναμη των άνω άκρων στο δείγμα των αντρών. Το πλεονέκτημα των μελετών GWAS είναι η ικανότητα που δίνουν στους ερευνητές να ανακαλύπτουν συσχετισμούς με αμερόληπτο τρόπο, αφού οι συγκεκριμένες μελέτες χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι δεν υπάρχει υπόθεση (Semenova et al., 2023).

Αξιοσημείωτο ήταν το γεγονός ότι οι κάποιοι πολυμορφισμοί που είχαν προηγουμένως συσχετιστεί με δείκτες δύναμης, δεν επαληθεύτηκαν στην τρέχουσα μελέτη. Συγκεκριμένα, δεν υπήρχε κάποια συσχέτιση μεταξύ *ACTN3* ή *ACE* και της δύναμης των άνω άκρων στους άνδρες σε οποιοδήποτε από τα κατώφλια τιμών *p* που εξετάστηκαν στην τρέχουσα μελέτη. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να σχετίζεται με τον πληθυσμό των συμμετεχόντων στην παρούσα μελέτη, καθώς τα *ACTN3* και *ACE* έχουν κυρίως ταυτοποιηθεί ως πιθανοί δείκτες δύναμης/ισχύος και απόδοσης αντοχής αντίστοιχα στους αθλητικούς πληθυσμούς και όχι στους κλινικούς πληθυσμούς (Semenova et al., 2023).

Επιπλέον, τα αποτελέσματα των μελετών που εξετάζουν την επίδραση των *ACTN3* και *ACE* στη δύναμη/ισχύ και την αντοχή αντίστοιχα εξακολουθούν να είναι ασαφή, καθώς κάθε πολυμορφισμός φαίνεται να εμφανίζει διαφορετικές συχνότητες σε διαφορετικούς πληθυσμούς και επομένως το μέγεθος του δείγματος που απαιτείται για την ανίχνευση σημαντικών διαφορών μπορεί να ποικίλει

ανάλογα με τον πληθυσμό της εκάστοτε μελέτης (Ahmad et al., 2020; Ahmad & Che, 2021). Εναλλακτικά, πρέπει να αναγνωριστεί ότι δείκτες όπως η δύναμη χειρολαβής (HGS), μπορεί να μην είναι οι καλύτεροι δείκτης δύναμης, και εναλλακτικοί δείκτες μπορεί να αποδώσουν διαφορετικά αποτελέσματα και αυτή η υπόθεση απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση. Παρά τους περιορισμούς, φάνηκε ότι μπορεί να υποτεθεί ότι ένα γονοτυπικό, αποτελούμενο από πολυμορφισμούς που σχετίζονται με τη δύναμη των άνω άκρων, μπορεί και είναι ικανό να διακρίνει αθλητές μεταξύ υψηλών και χαμηλών επιδόσεων όσον αφορά την απόδοση της δύναμης των άνω άκρων.

Λαμβάνοντας υπόψιν τη σχέση μεταξύ φυσικής κατάστασης, γενετική προδιάθεσης και ρυθμού αποκατάστασης μετά από μία προπονητική μονάδα, ήταν σημαντικό να εξεταστεί το κατά πόσο τα γονοτυπικά σκορ τα οποία δημιουργήθηκαν στην πρώτη μελέτη θα μπορούσαν να δώσουν πληροφορίες για το ρυθμό αποκατάστασης μετά από μία προπονητική ομάδα σε ένα ξεχωριστό δείγμα. Το πιο αξιοσημείωτο εύρημα ήταν ότι το γονοτυπικό σκορ το οποίο δημιουργήθηκε συμπεριλαμβάνοντας πολυμορφισμούς συσχετισμένους με την δύναμη των άνω άκρων, ήταν ευαίσθητο στην ανίχνευση διαφορών στο ρυθμό αποκατάστασης μεταξύ των γκρουπ.

Βάσει των ευρημάτων, όταν αναλύονται οι αποκρίσεις της μέγιστης δύναμης, τα αποτελέσματα υποστηρίζουν τα προηγούμενα ευρήματα των Johnston και συνεργατών (Johnston et al., 2015), οι οποίοι ανέφεραν ότι τα άτομα με υψηλότερα επίπεδα δύναμης ήταν ικανά να ανακτήσουν την απόδοση με ταχύτερο ρυθμό σε σύγκριση με άτομα τα οποία είχαν χαμηλότερα επίπεδα δύναμης. Στη μελέτη μας, τα άτομα με υψηλό και μέτριο επίπεδο hgsTGS εμφάνισαν μικρότερες μειώσεις στη μέγιστη δύναμη κατά τη διάρκεια του IMTP στις 6 και 24 ώρες μετά τη προπόνηση αντιστάσεων, ενώ η ομάδα με χαμηλό hgsTGS έδειξε σημαντικά μεγαλύτερη μείωση στη μέγιστη δύναμη.

Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, μπορεί να υποτεθεί ότι μια πλήρως βασισμένη στα δεδομένα προσέγγιση ενδέχεται να είναι μια βιώσιμη προσέγγιση για τους ερευνητές να διερευνήσουν περαιτέρω τις σχέσεις μεταξύ γενετικών πολυμορφισμών και αθλητικής απόδοσης και ενδεχομένως να οδηγήσει σε μια πιο εξατομικευμένη προσέγγιση στην προπόνηση (Pickering & Kiely, 2017).

Παρόλα αυτά, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι η επιστήμη της γενετικής αποτελεί μόνο ένα μέρος των βιολογικών δεικτών που μπορεί να επηρεάσουν τις προπονητικές αποκρίσεις. Τα τελευταία χρόνια, οι τεχνολογικές εξελίξεις, επιτρέπουν στους ερευνητές να εξετάσουν και άλλες ωμικές προσεγγίσεις. Συγκεκριμένα έχει προταθεί ότι μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση θα ήταν η χρήση πολλαπλών πεδίων μελέτης όπως η γενετική, η επιγενετική, η πρωτεομική, η μεταβολομική κλπ (Pitsiladis et al., 2016).

Παράλληλα, η ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης και της επιστήμης δεδομένων μπορεί να βοηθήσει την επιστημονική κοινότητα να δημιουργήσει πολύπλοκους δείκτες αθλητικής απόδοσης και δυνητικά να προβλέψει την αθλητική απόδοση, το ρυθμό αποκατάστασης κ.λπ. Επίσης στο μέλλον, είναι πολύ πιθανό με τη χρήση φορητής τεχνολογία, όπως «smartwatches» κλπ, να είναι δυνατή η παρακολούθηση των αθλητών σε 24ωρη βάση. Ωστόσο, για να μπορεί να συμβεί κάτι τέτοιο είναι σημαντική η συνεργασία για τη συλλογή δεδομένων πολλών ερευνητικών κέντρων και η αποθήκευση των δεδομένων σε μία κοινή βάση δεδομένων.

Βιβλιογραφία

- Ahmad, Y. H., & Che, M. A. (2021). Angiotensin-converting enzyme (ACE) insertion/deletion gene polymorphism across ethnicity: A narrative review of performance gene. *Sport Sciences for Health*, 17, 57–77.
- Ahmad, Y. H., Nasaruddin, & Che, M. A. (2020). ACTN3 R/X gene polymorphism across ethnicity: A brief review of performance gene. *Sport Sciences for Health*, 16, 13–24.
- Brady, C. J., Harrison, A. J., & Comyns, T. M. (2020). A review of the reliability of biomechanical variables produced during the isometric mid-thigh pull and isometric squat and the reporting of normative data. *Sports Biomechanics*, 19(1), 1–25.
- Bycroft, C., Freeman, C., Petkova, D., Band, G., Elliott, L. T., Sharp, K., Motyer, A., Vukcevic, D., Delaneau, O., O'Connell, J., Cortes, A., Welsh, S., Young, A., Effingham, M., McVean, G., Leslie, S., Allen, N., Donnelly, P., & Marchini, J. (2018). The UK Biobank resource with deep phenotyping and genomic data. *Nature*, 562(7726), 203–209.
- Calabrese, L. H., & Rooney, T. W. (1986). The use of nonsteroidal anti-inflammatory drugs in sports. *The Physician and Sportsmedicine*, 14(2), 89–97.
- Chang, C. C., Chow, C. C., Tellier, L. C., Vattikuti, S., Purcell, S. M., & Lee, J. J. (2015). Second-generation PLINK: Rising to the challenge of larger and richer datasets. *GigaScience*, 4, 7.
- Chavda, S., Bromley, T., Jarvis, P., Williams, S., Bishop, C., Turner, A. N., Lake, J. P., & Mundy, P. D. (2018). Force-time characteristics of the countermovement jump: Analyzing the curve in Excel. *Strength & Conditioning Journal*, 40(2), 67–77.
- Chavda, S., Turner, A. N., Comfort, P., Haff, G. G., Williams, S., Bishop, C., & Lake, J. P. (2020). A practical guide to analyzing the force-time curve of isometric tasks in Excel. *Strength & Conditioning Journal*, 42(2), 26–37.
- Churchward-Venne, T. A., Tieland, M., Verdijk, L. B., Leenders, M., Dirks, M. L., De Groot, L. C., & Van Loon, L. J. (2015). There are no nonresponders to resistance-type exercise training in older men and women. *Journal of the American Medical Directors Association*, 16(5), 400–411.
- Claudino, J. G., Cronin, J., Mezêncio, B., McMaster, D. T., McGuigan, M., Tricoli, V., Amadio, A. C., & Serrão, J. C. (2017). The countermovement jump to monitor neuromuscular status: A meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(4), 397–402.
- Comfort, P., Dos'Santos, T., Beckham, G. K., Stone, M. H., Guppy, S. N., & Haff, G. G. (2019). Standardization and methodological considerations for the isometric midthigh pull. *Strength & Conditioning Journal*, 41(2), 57–79.
- Comfort, P., Jones, P. A., Thomas, C., Dos'Santos, T., McMahon, J. J., & Suchomel, T. J. (2022). Changes in early and maximal isometric force production in response to moderate- and high-load strength and power training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(3), 593–599.
- Crossland, H., Piasecki, J., McCormick, D., Phillips, B. E., Wilkinson, D. J., Smith, K., McPhee, J. S., Piasecki, M., & Atherton, P. J. (2020). Targeted genotype analyses of GWAS-derived lean body mass and handgrip strength-associated single-nucleotide polymorphisms in elite master athletes. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 319(2), R184–R194.
- Dos'Santos, T., Thomas, C., Jones, P. A., McMahon, J. J., & Comfort, P. (2017). The effect of hip joint angle on isometric midthigh pull kinetics. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(10), 2748–2757.
- Gore, C., Tanner, R., Fuller, K., & Staneff, T. (2013). Determination of maximal oxygen consumption (VO₂max). In R. K. Tanner & C. J. Gore (Eds.), *Physiological tests for elite athletes* (pp. 103–122). Human Kinetics.

- Guilherme, J. P. L. F., & Lancha, A. H., Jr. (2020). Total genotype score and athletic status: An exploratory cross-sectional study of a Brazilian athlete cohort. *Annals of Human Genetics*, 84(2), 141–150.
- Guppy, S. N., Brady, C. J., Kotani, Y., Stone, M. H., Medic, N., & Haff, G. G. (2019). Effect of altering body posture and barbell position on the within-session reliability and magnitude of force-time curve characteristics in the isometric midthigh pull. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(12), 3252–3262.
- Halson, S. L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Medicine*, 44(Suppl 2), S139–S147.
- Harre, D. (1982). *Principle of sports training*. Berlin, Germany: Sportverlag.
- Harry, J. R., Barker, L. A., & Paquette, M. R. (2020). A joint power approach to define countermovement jump phases using force platforms. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 52(4), 993–1000.
- Johnston, R. D., Gabbett, T. J., Jenkins, D. G., & Hulin, B. T. (2015). Influence of physical qualities on post-match fatigue in rugby league players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18(2), 209–213.
- Jones, N., Kiely, J., Suraci, B., Collins, D., De Lorenzo, D., Pickering, C., & Grimaldi, K. (2016). A genetic-based algorithm for personalized resistance training. *Biology of Sport*, 33(2), 117–123.
- Kotikangas, J., Walker, S., Peltonen, H., & Häkkinen, K. (2024). Time course of neuromuscular fatigue during different resistance exercise loadings in power athletes, strength athletes, and nonathletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 38(7), 1231–1242.
- Kraemer, W. J., Fry, A. C., Ratamess, N., & French, D. (1995). Strength testing: Development and evaluation of methodology. In *Physiological assessment of human fitness* (2nd ed., pp. 119–150).
- Kraska, J. M., Ramsey, M. W., Haff, G. G., Fethke, N., Sands, W. A., Stone, M. E., & Stone, M. H. (2009). Relationship between strength characteristics and unweighted and weighted vertical jump height. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 4(4), 461–473.
- Lievens, E., Klass, M., Bex, T., & Derave, W. (2020). Muscle fiber typology substantially influences time to recover from high-intensity exercise. *Journal of Applied Physiology*, 128(3), 648–659.
- Marsh, C. E., Thomas, H. J., Naylor, L. H., Scurrah, K. J., & Green, D. J. (2020). Fitness and strength responses to distinct exercise modes in twins: Studies of Twin Responses to Understand Exercise as a Therapy (STRUETH) study. *The Journal of Physiology*, 598(18), 3845–3858.
- McLaren, S., Coutts, A., & Impellizzeri, F. (2021). Perception of effort and subjective monitoring. In *Human Kinetics* (pp. 231–252).
- Moir, G. L. (2008). Three different methods of calculating vertical jump height from force platform data in men and women. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 12(4), 207–218.
- Norman, B., Esbjörnsson, M., Rundqvist, H., Österlund, T., von Walden, F., & Tesch, P. A. (2009). Strength, power, fiber types, and mRNA expression in trained men and women with different ACTN3 R577X genotypes. *Journal of Applied Physiology*, 106(3), 959–965.
- Owen, N. J., Watkins, J., Kilduff, L. P., Bevan, H. R., & Bennett, M. A. (2014). Development of a criterion method to determine peak mechanical power output in a countermovement jump. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(6), 1552–1558. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000300>
- Page, W. W. (2016). *Guides and manuals*. Wattbike. <https://wattbike.com/gb/downloads>
- Pickering, C., & Kiely, J. (2017). Understanding personalized training responses: Can genetic assessment help? *Open Sports Sciences Journal*, 10(1), 191–213. <https://doi.org/10.2174/1875399X01710010191>
- Pickering, C., Kiely, J., Grgic, J., Lucia, A., & Del Coso, J. (2019). Can genetic testing identify talent for sport? *Genes (Basel)*, 10(12), 972. <https://doi.org/10.3390/genes10120972>
- Pickering, C., Kiely, J., Suraci, B., & Collins, D. (2018). The magnitude of Yo-Yo test improvements following an aerobic training intervention are associated with total genotype score. *PLoS ONE*, 13(11), e0207597. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207597>

- Pitsiladis, Y. P., Tanaka, M., Eynon, N., Bouchard, C., North, K. N., Williams, A. G., Collins, M., Moran, C. N., Britton, S. L., Fuku, N., Ashley, E. A., Klissouras, V., Lucia, A., Ahmetov, I. I., de Geus, E., & Alsayrafi, M. (2016). Athlome Project Consortium: A concerted effort to discover genomic and other "omic" markers of athletic performance. *Physiological Genomics*, 48(3), 183–190. <https://doi.org/10.1152/physiolgenomics.00105.2015>
- Ruiz, J. R., Arteta, D., Buxens, A., Artieda, M., Gómez-Gallego, F., Santiago, C., Yvert, T., Morán, M., & Lucia, A. (2010). Can we identify a power-oriented polygenic profile? *Journal of Applied Physiology*, 108(3), 561–566. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01242.2009>
- Ruiz, J. R., Gómez-Gallego, F., Santiago, C., González-Freire, M., Verde, Z., Foster, C., & Lucia, A. (2009). Is there an optimum endurance polygenic profile? *Journal of Applied Physiology*, 587(7), 1527–1534. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2008.166645>
- Semenova, E., Hall, E., & Ahmetov, I. I. (2023). Genes and athletic performance: The 2023 update. *Genes (Basel)*, 14(6), 1235. <https://doi.org/10.3390/genes14061235>
- Silveira, P. P., Pokhvisneva, I., Howard, D. M., & Meaney, M. J. (2023). A sex-specific genome-wide association study of depression phenotypes in UK Biobank. *Molecular Psychiatry*, 28(6), 2469–2479. <https://doi.org/10.1038/s41380-023-02034-6>
- Thorpe, R. T., Atkinson, G., Drust, B., & Gregson, W. (2017). Monitoring fatigue status in elite team-sport athletes: Implications for practice. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(Suppl 2), S227–S234. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0434>
- Thorpe, R. T., Strudwick, A. J., Buchheit, M., Atkinson, G., Drust, B., & Gregson, W. (2016). Tracking morning fatigue status across in-season training weeks in elite soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(7), 947–952. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0410>
- Tomlin, D. L., & Wenger, H. A. (2001). The relationship between aerobic fitness and recovery from high intensity intermittent exercise. *Sports Medicine*, 31(1), 1–11. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131010-00001>
- Tucker, R., & Collins, M. (2012). What makes champions? A review of the relative contribution of genes and training to sporting success. *British Journal of Sports Medicine*, 46(8), 555–561. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2011-090548>
- Turner, A. N., Jones, B., Stewart, P., Bishop, C., Parmar, N., Chavda, S., & Read, P. (2019). Total score of athleticism: Holistic athlete profiling to enhance decision-making. *Strength & Conditioning Journal*, 41(6), 91–101. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000477>
- Wilkinson, S. B., Phillips, S. M., Atherton, P. J., Patel, R., Yarasheski, K. E., Tarnopolsky, M. A., & Rennie, M. J. (2008). Differential effects of resistance and endurance exercise in the fed state on signalling molecule phosphorylation and protein synthesis in human muscle. *The Journal of Physiology*, 586(15), 3701–3717. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2008.153916>
- Williams, A. G., & Folland, J. P. (2008). Similarity of polygenic profiles limits the potential for elite human physical performance. *The Journal of Physiology*, 586(1), 113–121. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.141887>
- Williams, C. J., Li, Z., Harvey, N., Lea, R. A., Gurd, B. J., Bonafiglia, J. T., Papadimitriou, I., Jacques, M., Croci, I., Stensvold, D., Wisloff, U., Taylor, J. L., Gajanand, T., Cox, E. R., Ramos, J. S., Fassett, R. G., Little, J. P., Francois, M. E., Hearon, C. M., Jr., ... Coombes, J. S. (2021). Genome wide association study of response to interval and continuous exercise training: The Predict-HIIT study. *Journal of Biomedical Science*, 28(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s12929-021-00769-5>
- Yang, N., MacArthur, D. G., Gulbin, J. P., Hahn, A. G., Beggs, A. H., Eastale, S., & North, K. (2003). ACTN3 genotype is associated with human elite athletic performance. *American Journal of Human Genetics*, 73(3), 627–631. <https://doi.org/10.1086/377590>



Precision training: unlocking the power of data-driven approaches

Grammenou Maria

Lecturer, Coordinator of the PhD Programme "Science and Health in Football" Institute for Sports and Preventive Medicine, Saarland University, Saarbrücken, Germany

ABSTRACT

The presence of inter-individual variability in acute and chronic training responses among individuals is widely acknowledged within the scientific community. While the sources of this variability are yet to be fully understood the development of technologies and data science allows researchers and practitioners to make informed decisions. Data-driven approaches utilized real-time data analytics and biomarkers can potentially be used to fully understand the sources of variability and build predictive models of training adaptation. These methodologies can be particularly important for high-performance sport practitioners, as they can leverage the data to effectively manage fatigue and optimize training interventions, thereby enhancing athlete's performance outcomes.

Key words: genetics, bioinformatics, time-course of recovery

Corresponding address:

Grammenou Maria
Lecturer, Coordinator of the PhD Programme "Science and Health in Football"
Institute for Sports and Preventive Medicine ,
Saarland University, Saarbrücken, Germany

E-mail:

maria.grammenou@uni-saarland.de