



Ažbe Ribič,
Stanko Štuhec, Darjan Spudič

Veljavnost odnosa sila-hitrost-moč pri simulaciji teka na smučeh z rolkami

Izvleček

Namen študije je bil preveriti veljavnost izračuna izhodnih spremenljivk meritev odnosa *sila-hitrost-moč* ($F-v-P$) pri simulaciji teka na smučeh z rolkami. Merjenci so izvedli 30-metrski sprint s klasično tehniko na strminah z naklonoma 2 % in 6 %. Horizontalna *hitrost* sprinta in horizontalna *sila* sta bili izračunani iz podatkov, zajetih z laserskim merilnikom. Moč linearne povezanosti med *silo* in *hitrostjo* je bila izračunana s pomočjo korelacije za ponovljene meritve. Ugotovili smo, da je linearna povezanost med *silo* in *hitrostjo* statistično značilna ($p < 0,05$). S spremenljivko *hitrosti* nam je uspelo pojasniti 50 % ($r^2 = 0,497$) variance sile pri strmini z naklonom 2 % ter 56 % ($r^2 = 0,558$) variance sile pri strmini z naklonom 6 %. Rezultati testiranja odnosa $F-v-P$ v primerjavi z drugimi študijami, ki izhajajo iz atletike, kažejo manjši delež pojasnjene variance. Na podlagi rezultatov torej zaključujemo, da je verodostojnost rezultatov, pridobljenih z novouporabljenno metodo, nezanesljiva. Enostavno izvedljiv, časovno nepotraten in posledično minimalno utrujajoč protokol merjenja bi lahko v prihodnje bil orodje za podrobnejši vpogled v mehanske lastnosti mišic rok pri tekačih na smučeh – vendar so za povečanje verodostojnosti in zanesljivosti rezultatov potrebne dodatne raziskave, usmerjene v optimizacijo merilnega postopka in metod obdelave signalov.

Ključne besede: laser, startni pospešek, mehanske lastnosti mišic, vadba za moč



Validity of force-velocity-power profiling in cross-country roller skiing

Abstract

The aim of our study was to evaluate the validity of the outcome variables of the *force-velocity-power* ($F-v-P$) relationship in cross-country roller skiing. Six elite cross-country skiers completed 30-meter sprints on two hills with slopes of 2 % and 6 %. Horizontal *velocity* and horizontal *force* were calculated using data from a laser distance meter. The strength of the linear relationship between *force* and *velocity* was tested using the repeated measures correlation method. We found a statistically significant linear relationship between *force* and *velocity* ($p < 0,05$). *Velocity* accounted for 50 % ($r^2 = 0,497$) of the variance of *force* on the hill with 2 % slope and 56 % ($r^2 = 0,558$) of the variance of *force* on the hill with 6 % slope. Our results show a lower percentage of variance explained compared to other studies that have investigated the $F-v-P$ relationship in sprinting in track and field athletics. Based on our results, we can conclude that the validity of our results is questionable when using the novel method to test the $F-v-P$ relationship in cross-country skiing. The presented protocol, which is time and energy efficient, is a potentially useful tool to better understand the mechanical properties of the upper body muscles of cross-country skiers. However, for the protocol to provide valid and reliable results, future studies should focus on optimizing the measurement procedure and data analyses.

Keywords: laser, sprint acceleration, mechanical properties of muscle, resistance training

■ Uvod

Sila, ki jo lahko proizvede mišica, je omejena s *hitrostjo* krčenja mišice – in obratno. Večja je *hitrost* krčenja mišice, manjša *sila* lahko mišica proizvede. Že davnega leta 1938 je Hill (1938)p. 116 to razmerje pri izotonični mišični kontrakciji opisal s hiperbоло, ki se s kraki približuje največji *sili* oziroma na drugi strani največji *hitrosti* krčenja mišice. Gre za mehansko mišično lastnost, ki je odvisna od spleta morfoloških in fizioloških dejavnikov. *Sila* in *hitrost* pri izvedbi dinamičnega mišičnega krčenja neposredno določata tudi mehansko *moč*, ki je ena glavnih determinant uspešnosti v športih, kot so atletika, košarka, nogomet, rokomet in tek na smučeh (Alsobrook in Heil, 2009). Definirana je kot sposobnost mišice, da opravi delo v enoti časa, in je izračunana kot produkt *sile* in *hitrosti* (Haff in Nimphius, 2012).

Hillova krivulja opisuje odnos med *silo* in *hitrostjo* v obliki hiperbole in je bila prvotno opisana za izolirano mišico (Hill, 1938). Pri opazovanju večsklepnih gibanj pa odnos med *silo* in *hitrostjo* ne kaže več hiperbolične oblike, temveč stremi k linearni obliki. Z matematičnim modelom in uporabo segmentne dinamike Bobbert (2015) razlaga, da je vzrok za spremembo iz hiperbolične oblike krivulje v linearno v tem, da z večanjem *hitrosti* pri linearnem gibanju upada *sila* pri prenosu iz posameznega segmenta (enosklepnega sistema) na končni gib (večsklepni sistem). Na podlagi tega dognanja lahko mehanske lastnosti mišic pri izvedbi večsklepnega balističnega gibanja opišemo z linearno regresijsko premico.

Linearen odnos med proizvedeno *silo* in *hitrostjo* predstavlja metodološko veliko enostavnejši način za spremljanje lastnosti mišic od hiperboličnega. Izkazalo se je celo, da je za verodostojen vpogled v lastnosti mišic iztegovalk nog (skok iz polčepa, skok z nasprotnim gibanjem) in rok (horizontalni poteg in potisk) (García-Ramos in Jaric, 2018) zadostna izvedba testiranja samo v dveh pogojih (*angl.* two-point method) (García-Ramos idr., 2021; Janicijevic idr., 2020; Pérez-Castilla idr., 2018), pri čemer pa je bistvena standardizacija pogojev merjenja (Cosic idr., 2019; García-Ramos idr., 2017; Janicijevic idr., 2020).

Spremenljivke linearnega odnosa med *silo*-*hitrostjo*-*močjo* ($F-v-P$) izhajajo iz regresijske analize med *silo* in *hitrostjo* večsklepnega gibanja, pri čemer posamezen pogoj *sile* oziroma *hitrosti* predstavlja skok z določeno

velikostjo dodatnega bremena (0–100 % telesne mase) (Jarić, 2015; Pleša idr., 2021). Presečišče regresijske premice *sila*-*hitrost* z y-osjo predstavlja največjo teoretično silo (F_0) in presečišče premice z x-osjo predstavlja največjo teoretično hitrost (v_0). Točki določata naklon premice. In sicer, če je posameznik bolj učinkovit pri proizvajanju velikih sil, bo naklon premice strmejši, ter obratno, položnejši, če je posameznik bolj učinkovit pri proizvajanju velikih hitrosti. Največjo teoretično moč ($P_{\max}$) je posameznik sposoben ustvariti le v ozkem območju *hitrosti* oziroma *sile*. To območje, ki ga lahko opišemo z obrnjeno parabolo, je pri linearnem odnosu *sila*-*hitrost* točno na sredini med v_0 in F_0 . $P_{\max}$ tako ustreza 0,5-kratniku F_0 in 0,5-kratniku v_0 in jo lahko ob poznavanju teh dveh izrazimo z enačbo $P_{\max} = (F_0 \cdot v_0)/4$ (Vandewalle idr., 1987). Naklon regresijske premice *sila*-*hitrost* torej pomembno vpliva na izračunano moč, ki pa v največji meri pogojuje športno uspešnost (Harries idr., 2012; Hori idr., 2007; Markovic in Jaric, 2007) in funkcionalnost starejših pri opravljanju vsakodnevnih opravil (Gray in Paulson, 2014; Reid in Fielding, 2012).

Vrednotenje odnosa $F-v-P$ se z namenom optimizacije telesne priprave vse pogosteje uporablja v praksi. Metoda s skoki z dodatnimi bremenami je trenutno najpogostejše uporabljen način modeliranja odnosa $F-v-P$. Ta metoda zagotavlja enostaven in verodostojen vpogled v mehanske lastnosti mišic iztegovalk nog. Odnos se najpogostejše vrednoti pri različnih večsklepnih gibalnih nalogah, kot sta navpični skok iz polčepa in z nasprotnim gibanjem. S praktičnega vidika pa omenjeni način vrednotenja odnosa $F-v-P$ ne predstavlja najlažje izvedljivih meritev, saj poleg drage opreme za zajemanje podatkov potrebujemo še vrsto bremen. Ta so težava pri izvedbi terenskih meritev – zato te najpogostejše potekajo v laboratoriju. Tako se v praksi za oceno mehanskih mišičnih lastnosti skozi odnos $F-v-P$ v zadnjih letih vse pogosteje uporablja teste, pri katerih gibanje poteka v horizontalni smeri, npr. pri sprintu. Samozino idr. (2016) so razvili model za testiranje mehanskih lastnosti spodnjih ekstremitet s spremljanjem masnega središča telesa pri sprintu. V nasprotju s testiranjem odnosa $F-v-P$ v navpični smeri, kjer se najpogostejše za zajemanje *hitrosti* in *sile* pri gibanju uporabljajo pristikovne plošče, pri testiranju v horizontalni smeri podatke zajemamo s fotocelami, radarskimi merilniki in laserskimi merilniki. V nasprotju z merjenjem odnosa $F-v-P$ s skoki, kjer v regresijsko analizo vstopamo z

več pogoji (dodatnimi bremenami), pri sprintu samo iz horizontalne hitrosti teka (v_H) po Newtonovih zakonih (v literaturi poimenovani tudi inverzna dinamika) izračunamo *silo* reakcije podlage v antero-posteriorni smeri za masno središče telesa (F_H). Pri tem moramo upoštevati maso športnika in aerodinamični upor, ki deluje na telo. Izhodne spremenljivke odnosa *sila*-*hitrost* v horizontalni smeri (največja teoretična horizontalna *sila*, *hitrost* in *moč*) pridobimo z regresijsko analizo med navedenima spremenljivkama (F_H in v_H) v času izvedenega sprinta (Cross idr., 2017; Morin idr., 2011) po enakem postopku kot pri izvedbi gibanja v vertikalni smeri (Uvod, odstavek 4).

Predpostavka, da je odnos med F_H in v_H pri sprintu linearen, izhaja iz oblike krivulje *hitrost*-čas. Pri sprintu v atletiki je bilo ugotovljeno, da lahko obliko krivulje *hitrost*-čas verodostojno opišemo z eksponentno funkcijo z dvema spremenljivkama, in sicer največjo doseženo v_H sprinta in konstanto pospeška v času sprinta (Samozino idr., 2021). Na podlagi enačbe (ne surovih vrednosti *hitrosti*) sledijo koraki do izračuna F_H . Ker izračun temelji na prirejeni krivulji *hitrost*-čas, in ne na surovih podatkih *hitrosti* v času, je povezanost med spremenljivkama izračunane F_H in v_H popolna ($r = 1$) (Cross idr., 2017). Vprašanje, ki se postavlja, je, ali enake metode obdelave za vrednotenje odnosa $F-v-P$ lahko uporabimo tudi pri teku na smučeh, glede na to, da gre z vidika merjenja *hitrosti* v času sprinta za enak postopek izvedbe meritev in zajema podatkov. Po pregledu literature nam ni uspelo zaslediti podatkov, ali je oblika krivulje *hitrost*-čas pri sprintu pri teku na smučeh enaka kot pri sprintu v atletiki – torej eksponentna.

Z vidika kratkoročne in dolgoročne optimizacije trenažnega procesa se izkaže, da je bistvenega pomena pri načrtovanju vadbe za razvoj velike moči določitev deficitarne mehanske lastnosti mišic (razvoj *sile* in/ali razvoj *hitrosti*) in pozneje specifična usmeritev vadbениh metod v razvoj te. Ker so učinki vadbe za moč hitrostno specifični, je pri vadbi smiselno uporabiti metode vadbe, ki zagotavljajo razvoj deficitarne mehanske lastnosti mišic in se v največji meri približajo obremenitvenim zahtevam gibanja oziroma športa (Cormie idr., 2011). Z izračunom izhodnih spremenljivk odnosa $F-v-P$ lahko ocenimo deficit v določenem spektru odnosa *sila*-*hitrost* in na podlagi ocene določimo trening. Posamezniku, ki je hitrostno dominanten, priporočamo, da

vadi z velikimi bremenji, in obratno, posamezniku, ki je dominanten v področju velikih sil, priporočamo, da je njegov trening usmerjen v razvoj velikih hitrosti pri gibanju – z lastno telesno maso ali celo v razbremenjenih pogojih (Jiménez-Reyes idr., 2019). Z vadbo v enem ali drugem spektru odnosa *sila-hitrost* vplivamo na največjo proizvedeno mišično moč (Spudić idr., 2021).

Anaerobna zmogljivost je pomemben dejavnik pri pospeševanjih pri teku na smučeh. Mišična moč pogojuje uspešnost pri teku na smučeh, posebno v disciplinah na krajše razdalje (Alsobrook in Heil, 2009). Bortolan idr. (2008) v svoji raziskavi navajajo, da imajo hitrejši tekači na smučeh večjo maksimalno moč mišic zgornjih okončin. Prav tako je bilo ugotovljeno, da je velikost prirastka sil pri gibanjih spodnjih okončin pomemben dejavnik pri razvoju največje v_h smučarskega teka (posebno pri klasičnem koraku) (Stöggli idr., 2010). Za uspešnost v teku na smučeh je torej poleg razvoja aerobnih sposobnosti potreben športu prilagojen in predvsem v deficitarno lastnost usmerjen trening za razvoj moči. Za pripravo usmerjenih metod vadbe za moč pa je bistvenega pomena začetna ocena športnikovih sposobnosti, ki se v največji meri približajo tekmovalnim pogojem.

Standardizirana testiranja aerobnih in anaerobnih sposobnosti pri teku na smučeh najpogosteje potekajo v laboratorijih – z relativno drago opremo in z uporabo časovno potratnih in organizacijsko zahtevnih protokolov. Čeprav je moč iztegovalk rok bistvenega pomena za športno uspešnost tudi v vzdržljivostnih športih, se tej namenja premajhen poudarek in zato tudi primanjkuje protokolov merjenja moči v fazi pospeševanja pri teku na smučeh. Meritve odnosa $F-v-P$, ki jih lahko verodostojno izvedemo z uporabo laserskega merilnika *hitrosti*, so se izkazale kot zanesljive in veljavne pri sprintu v atletiki. Meritve potekajo v specifičnih tekmovalnih pogojih, poleg tega tekmovalec pri tem ni obremenjen z dodatno merilno opremo. S tega vidika je bil namen naše študije protokol meritve $F-v-P$, ki se sicer uporablja v atletiki, prenesti v pogoje teka na smučeh in pri tem preveriti veljavnost izračuna izhodnih spremenljivk. Predpostavljali smo, da bo testiranje odnosa $F-v-P$ pri 30-metrskem sprintu na smučeh predstavljalo zanesljiv način vrednotenja mehanskih lastnosti mišic iztegovalk rok pri pospeševanju pri teku na smučeh. Enostavno izvedljiv, časovno nepotraten in minimalno utrujajoč protokol

merjenja bi bil lahko v prihodnje orodje za podrobnejši vpogled v mehanske lastnosti mišic rok. Rezultati naše raziskave bi lahko bili izhodišče za usmerjeno vadbo za moč in možnost za longitudinalno spremljanje učinkov treninga moči v specifičnih pogojih teka na smučeh.

Metode

Preiskovanci

V raziskavi je sodelovalo šest vrhunsko treniranih tekačev na smučeh. Merjenci več kot 10 let trenirajo tek na smučeh ter na teden opravijo 9–14 treningov. Povprečna starost merjencev je bila 23,5 leta ($SD = 1,9$ leta), višina 178,8 cm ($SD = 8,7$ cm) in masa 71,5 kg ($SD = 9,0$ kg). Izključitveni kriteriji za sodelovanje so bile kakršnekoli poškodbe spodnjih okončin, zgornjih okončin ter trupa, ki bi lahko vplivale na maksimalno izvedbo sprinta pri teku na smučeh na 30 metrov. Pred izvedbo testiranja so merjenci odgovorili na vprašanja iz vprašalnika o pripravljenosti na vadbo (Bredin, Gledhill, Jamnik in Warburton, 2013) in se strinjali, da se meritve udeležujejo na lastno odgovornost. Seznanjeni so bili s tem, da lahko od raziskave kadarkoli odstopijo brez posledic. Merjenci so dobili navodilo, da dva dni pred meritvami ne izvajajo visoko intenzivne vadbe za moč zgornjih okončin. Celoten eksperiment je bil izveden v skladu s Helsinško deklaracijo (WHO, 2013).

Postopek meritve in pripomočki

Izvedena je bila prečno-presečna študija. Meritve so bile izvedene julija in septembra 2021 v tekaškem centru Rogla. Protokol je vključeval 30-metrski sprint pri teku na smučeh s klasično tehniko na dveh strminah z naklonom 2 % in 6 %. Na vsaki strmini sta bila izvedena dva maksimalna sprinta na prvih in drugih meritvah. Merjenje *hitrosti* teka na smučeh je potekalo z laserskim merilnikom (Astech LDM 301, Rostock, Nemčija) s karakteristikami, ki jih je podrobno opisal Planjšek s sodelavci (2013). Podatki so bili zajeti z namensko napisano programsko opremo (Planjšek idr., 2013). Poleg že omenjenih spremenljivk smo na dan meritve iz vremenske postaje na Rogli odčitati temperaturo (julij: 25 °C in september: 13 °C) ter tlak zraka (julij in september: 1015 mmHg). Pred meritvami so preiskovanci izvedli 30-minutno ogrevanje, ki je vključevalo tek na rokah v počasnem tempu na razgibanem terenu (individualna frekvenca srčnega utripa ni preseгла 60 %

maksimalne). Za vsak poskus so merjenci pristopili k startni črti in zavzeli položaj pri startu sprinta pri teku na smučeh. Dobili so navodilo, da čim hitreje startajo in pospešujejo do razdalje 30 m. Med sprinti je imel posameznik od 5 do 10 minut odmora in med strminama (2 % in 6 %) je bilo 12–17 minut odmora. Med odmorom preiskovanci niso mirovali, ampak nadaljevali tek na rokah v mešani tehniki po razgibanem terenu (frekvenca srčnega utripa ni preseгла 60 % največje).

Pred meritvijo je bil opisani sistem kalibriran. Kalibracija je bila namenjena določitvi cone merjenja razdalje od laserja do preiskovančevega ledvenega dela. Analizirani so bili podatki, ki so bili zajeti v umerjeni 30-metrski coni merjenja. Laserski merilnik je bil postavljen 5 m pred startno črto na višini, kjer je laserski žarek usmerjen vodoravno v ledveni del merjenca. Podatki *razdalja-čas* so bili zajeti s frekvenco 100 Hz. Iz spremembe poti je bila izračunana *hitrost* sprinta (v_h) v vsaki stotinki sekunde teka. Krivulja je bila poglajena s filtrom tekočega povprečja na 0,1-sekundnem intervalu ($n = 10$, frekvenca glajenja $m = 10$) (Emri in Cvelbar, 2006). Iz *hitrosti* teka je bil izračunana pospešek in nato horizontalna komponenta sile v času sprinta po enačbi $f_h = m \cdot a + m \cdot g \cdot \sin \alpha$, pri čemer kot α predstavlja naklon strmine sprinta in maso preiskovanca.

Statistična analiza

Izračunana je bila opisna statistika za lastnosti vzorca preiskovancev in rezultate sprinta na 30 m. Pred izvedbo analiz je bila prisotnost osamelcev preverjena z razsevnim grafikonom in normalnost porazdelitve spremenljivk s Shapiro-Wilkovim testom. Podatki sile in *hitrosti* so bili z vidika grafičnega prikaza in statističnih analiz časovno normalizirani na 1000 časovnih točk. Časovna normalizacija nam daje bolj neposreden vpogled v obliko krivulj *hitrosti* in sile, obenem pa ne ogroža verodostojnosti statističnih rezultatov. Namen naše študije je bil namreč preveriti odnos oziroma povezanost med odvisno spremenljivko (*silo*) in neodvisno spremenljivko (*hitrostjo*), ne glede na njune absolutne vrednosti. Moč linearne povezanosti med *silo* in *hitrostjo* je bila pozneje izračunana s pomočjo korelacije za ponovljene meritve (*angl.* Repeated measures correlation – RStudio, paket *rmcorr*) (Bakdash in Marusich, 2017). Analiza vzame v obzir dejstvo, da v izračun skupnega koeficienta korelacije in posledično determinacijskega koeficienta regresije



Slika 1. Prikaz izvedbe sprinta – pogled merilca

za vzorec preiskovancev vstopamo z več rezultati istega posameznika. Podrobneje, z dvema krivuljama *sila-hitrost* (1000 točk za vsako spremenljivko) na preiskovanca. Vrednosti korelacijskega koeficienta bi bile preценjene, če bi regresijsko analizo izvedli na predhodno povprečnih vrednostih vseh posameznikov ali če bi za vsakega posameznika izvedli regresijo posebej ter naknadno povprečili individualne rezultate korelacijskih in determinacijskih koeficientov. V preteklih študijah je bilo namreč ugotovljeno, da razporeditev korelacijskih koeficientov in posledično determinacijskih koeficientov ni normalna in tovrsten način poročanja rezultatov ni verodostojen (Bakdash in Marusich, 2017; Spudić, Cvitković in Šarabon, 2021). Vrednosti $R^2 \geq 0,81$ predstavljajo zelo visok, $0,81 > \text{visok} \geq 0,49$, $0,49 > \text{srednji} \geq 0,25$, $0,25 \geq \text{nizek} > 0,09$, in zanemarljiv $< 0,09$ delež pojasnjene variance (Hinkle, Wiersma in Jurs, 2003). Grafični prikazi so bili pripravljeni v programu GraphPad Prism (v8, GraphPad, San Diego, California, ZDA). Za obdelavo podatkov so bili uporabljeni statistični programi SPSS za Windows 25.0 (IBM Corporation, New York, ZDA), RStudio (verzija 1.3.1073; RStudio, Inc., Boston, MA, ZDA) in pripravljene skripte v programu Excel (Microsoft Office Excel 2019, Microsoft, Washington, ZDA). Statistična značilnost je bila sprejeta z dvostransko 5-odstotno napako alfa.

Rezultati

Tabela 1

Vmesni časi sprinta in največja dosežena hitrost pri 30-metrskem sprintu na rokah

Spremenljivka/ Naklon	2 %	6 %
5 m (s)	1,58 (0,13)	1,72 (0,13)
10 m (s)	2,68 (0,22)	2,9 (0,24)
15 m (s)	3,65 (0,29)	3,98 (0,35)
20 m (s)	4,56 (0,37)	4,99 (0,45)
25 m (s)	5,17 (1,18)	5,98 (0,55)
30 m (s)	5,98 (1,36)	6,96 (0,66)
$v_{\max}$ (m/s)	6,08 (0,51)	5,27 (0,56)

Opombe. $v_{\max}$ – največja hitrost teka. Rezultati so prikazani kot aritmetična sredina (standardni odklon).

Tabela 1 prikazuje opisno statistiko rezultatov sprinta na rokah na manjši strmini (z naklonom 2 %) in na večji strmini (z naklonom 6 %). Preiskovanci so pri večji strmini za opravljeno razdaljo pri sprintu porabili več časa ($t_{30m} = 6,96$ s) in razvili manjšo največjo hitrost sprinta ($v_{\max} = 5,27$ m/s).

Slika 2 prikazuje povprečno vrednost in standardni odklon rezultatov v_h pri sprintu na klancu z naklonom 2 % in 6 %. Preiskovanci so na klancu z naklonom 2 % dosegli večjo končno v_h sprinta ($v_{h(30m)} = 5,01$ m/s). Krivulja je časovno normalizirana (na 1000 točk) z namenom verodostojnega vpogleda v njeno obliko pri povprečenju rezultatov več sprintov, ki so trajali različno dolgo.

Slika 3 prikazuje povprečno vrednost in standardni odklon odnosa med F_h in v_h sprinta na klancu z naklonom 2 % in naklonom 6 %. Preiskovanci so na klancu z naklonom 2 % dosegli večjo končno v_h sprinta (slika zgoraj). Povprečna največja vrednost proizvedene F_h se med pogoje ne razlikuje bistveno (3,14 N/kg pri klancu z naklonom 2 % in 3,51 N/kg pri klancu z naklonom 6 %). Na klancu z naklonom 2 % je upad F_h v času teka večji kot pri klancu z naklonom 6 % (−0,61 N/kg/s pri klancu z naklonom 2 % in −0,46 N/kg/s pri klancu z naklonom 6 %).

Slika 4 grafično prikazuje rezultate korelacije za ponovljene meritve med F_h in v_h pri sprintu na klancu z naklonom 2 %. Vsaki krivulji v ozadju, ki prikazuje rezultate F_h in v_h za sprint vsakega posameznika, je bila prirejena linearna regresijska premica. Druga ponovitev sprinta na prvotnih meritvah (julij) pri preiskovancu 4 je bila iz analize izvzeta zaradi napake v zajemu podatkov.

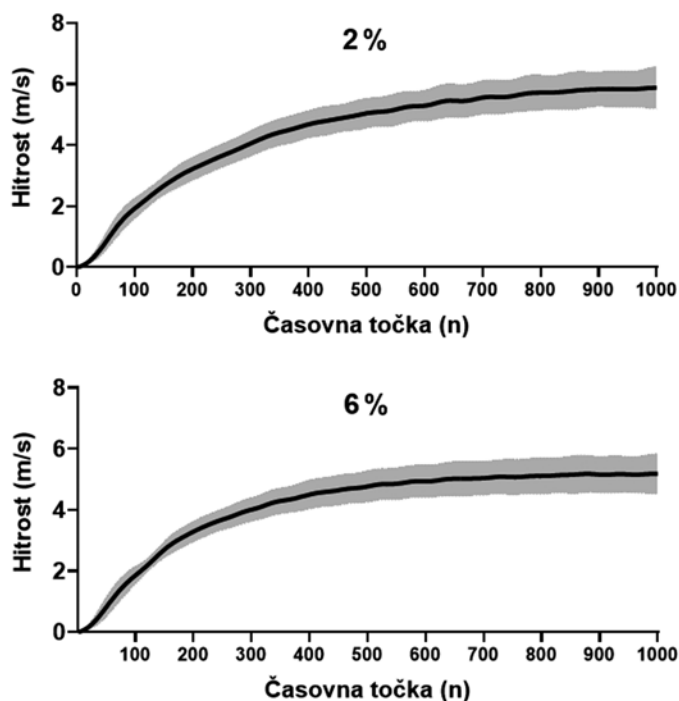
Determinacijski koeficient, izražen iz rezultatov korelacije za ponovljene meritve ($r = 0,705$; 95 % IZ: 0,689–0,712; $p < 0,001$), kaže visok delež pojasnjene variance odnosa med F_h in v_h z linearno krivuljo ($r^2 = 0,497$; 95 % IZ: 0,475–0,507).

Slika 5 grafično prikazuje rezultate korelacije za ponovljene meritve med F_h in v_h pri sprintu na klancu z naklonom 6 %. Vsaki krivulji v ozadju, ki prikazuje rezultate F_h in v_h za sprint vsakega posameznika, je bila prirejena linearna regresijska krivulja. Druga ponovitev sprinta na prvotnih meritvah (julij) pri preiskovancu 4 je bila iz analize izvzeta zaradi napake v zajemu podatkov. Determinacijski koeficient, izražen iz rezultatov korelacije za ponovljene meritve ($r = 0,747$; 95 % IZ: 0,741–0,753; $p < 0,001$), kaže visok delež pojasnjene variance odnosa med F_h in v_h z linearno krivuljo ($r^2 = 0,558$; 95 % IZ: 0,549–0,567).

Razprava

Da bi lahko trdili, da je F - v - P pri teku na smučeh zanesljivo vodilo za oceno mehaničnih lastnosti mišic, smo morali potrditi, da linearni odnos med F_h in v_h , ki ga dobimo s testiranjem sprintov v atletiki, velja tudi v pogojih teka na smučeh s klasično tehniko. Iz podatkov, ki so prikazani na Sliki 3 in 4, vidimo, da je odnos statistično značilno linearen ($p < 0,05$). Pri strmini z naklonom 2 % znaša determinacijski koeficient 0,50 in pri strmini z naklonom 6 % znaša 0,56. To pomeni, da nam je s podatki v_h uspelo pojasniti 50 % oz. 56 % variance podatkov F_h , kar je glede na literaturo velik delež pojasnjene variance. Kljub temu 50 % oz. 44-odstotni delež variance ostaja nepojasnen, kar pomeni, da je pri računanju izhodnih spremenljivk odnosa F - v - P na podlagi izvedenega protokola meritev in načina obdelave podatkov v naši študiji prisotna sistematična napaka, ki zmanjšuje verodostojnost rezultatov.

Po pregledu literature nam ni uspelo najti podobnih raziskav, ki bi vrednotile F - v - P pri sprintu pri teku na smučeh na podlagi rezultatov, pridobljenih z laserskim merilnikom. Večina študij, ki so uporabljale podobne postopke testiranja F - v - P , je bila na-rejena v atletiki, in sicer pri sprintu na krajše razdalje. Rezultati naše študije se ujemajo z rezultati, do katerih so prišli Rabita idr. (2015) na vzorcu profesionalnih atletov. V študiji navajajo, da je odnos med F_h in v_h pri pospeševanju na 40 metrov linearen ter da lahko 89 % variance podatkov F_h pojasnimo

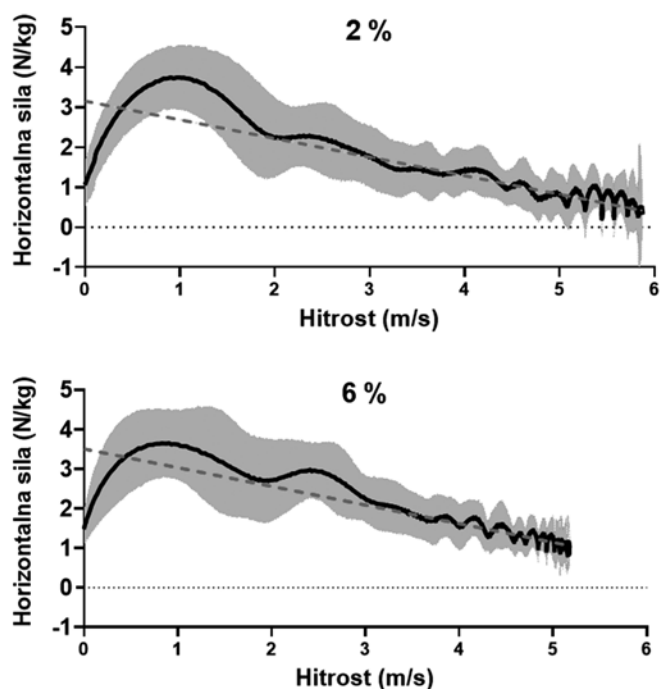


Slika 2. Oblika krivulje hitrosti pri sprintu na klancu z naklonom 2 % in naklonom 6 %

Opombe. Črna črta prikazuje povprečje rezultatov vseh meritev. Sivo obarvano območje prikazuje standardni odklon rezultatov vseh meritev.

s v_h . Morin idr. (2010) so v svoji študiji merili hitrost sprinta in silo na posebej prilagojeni tekalni stezi, s katero lahko spremljamo

sile pri tekalnem koraku. Avtorji poročajo o podobnih vrednostih, in sicer jim je uspelo pojasniti 92 % variance F_h s podatki v_h .



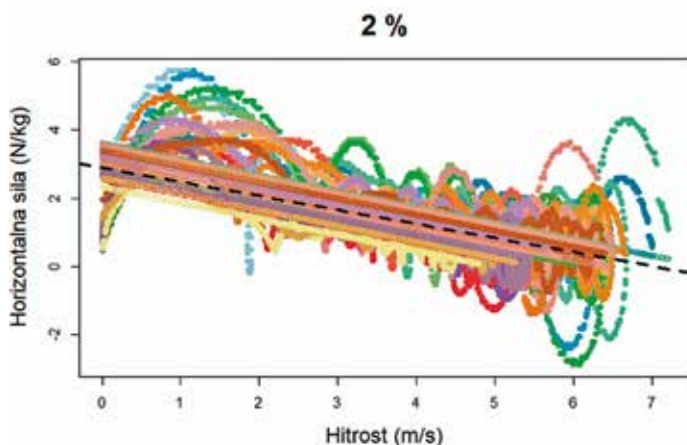
Slika 3. Oblika odnosa med horizontalno silo in hitrostjo pri sprintu na klancu z naklonom 2 % in naklonom 6 %

Opombe. Črna črta prikazuje povprečje rezultatov vseh meritev. Sivo obarvano območje prikazuje standardni odklon rezultatov vseh meritev. Črtkana siva črta prikazuje linearno regresijsko premico, ki se v največji meri prilaga podatkom.

Iz navedenih podatkov lahko vidimo, da je vrednotenje odnosa $F-v-P$ precej bolj verodostojno pri sprintu v atletiki kot pri teku na smučeh s klasično tehniko. Če uporabljamo omenjene metode vrednotenja odnosa $F-v-P$ pri teku na smučeh, je potrebna previdnost ob interpretaciji izhodnih spremenljivk, saj je velika verjetnost za napako veljavnosti, ko izhodne spremenljivke izhajajo iz regresijske analize. Sklepamo lahko, da bi imela obdelava podatkov, ki so jo opisali Samozino idr. (2016), kjer v prvem koraku podatkom *hitrost-čas* priredimo enačbo in nato na podlagi enačbe po korakih izračunamo še F_h in horizontalno moč pri sprintu, večjo znotrajposlovno in medobiskovno zanesljivost spremenljivk, zaradi manj manipuliranja s podatki v omejenih fazah obdelave. Po drugi strani pa se glede na majhen delež pojasnjene variance s surovimi podatki F_h in v_h postavlja vprašanje o dejanski verodostojnosti izhodnih spremenljivk.

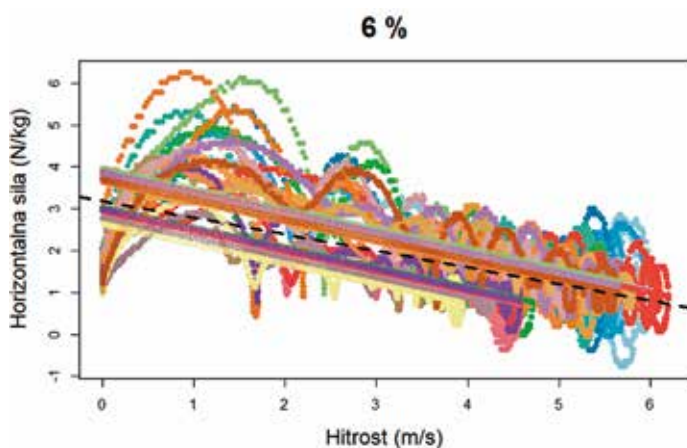
Kolikor nam je znano, je to prva študija, ki opisuje testiranje mehanskih lastnosti mišic pri teku na smučeh s klasično tehniko z merjenjem *hitrosti* z laserjem. Model testiranja odnosa $F-v-P$, ki smo ga preverjali v naši študiji, bi na področju teka na smučeh lahko predstavljal način za podrobnejšo oceno mehanskih lastnosti mišic iztegovalk rok, kar bi omogočilo bolj individualno prilagojeno vadbo moči, ki močno pogojuje uspešnost pri teku na smučeh (Bortolan idr., 2008). Drugače od metode testiranja odnosa $F-v-P$ s skoki z dodatnimi bremenami, ki je podrobneje opisana v Jiménez-Reyes idr. (2017), predlagana metoda v študiji ne zahteva drage opreme in je lahko uporabljena v specifičnih tekmovalnih pogojih, npr. tekaška steza pri teku na smučeh. Prednost naše študije je bila torej uporaba tehnike merjenja *hitrosti* z laserskim merilnikom, katere veljavnost so v preteklosti že potrdili Planjšek in sodelavci (2013). Z omenjeno metodo merjenja športnik ni opremljen z dodatno merilno opremo (npr. senzorji in kabli, markerji), ki bi lahko otežila pravilno tehnično izvedbo gibanja in posledično vplivala na rezultate. Metoda predstavlja novejši način testiranja odnosa $F-v-P$, ki je lahko prenesen iz laboratorija v specifične tekmovalne pogoje.

Raziskava je imela tudi nekaj omejitev, na katere je treba opozoriti. Največja omejitev je majhen vzorec, ki se kaže v majhni moči raziskave. Vse meritve so potekale v času trenajžno-tekmovalnega procesa naših merjencev, tako je lahko prisotna tudi



Slika 4. Grafični prikaz korelacije za ponovljene meritve med horizontalno silo in hitrostjo pri sprintu na klancu z naklonom 2 %

Opombe. Vsaka barva prikazuje rezultate enega sprinta za posameznika. Krivulje v ozadju prikazuje surove podatke *sila-hitrost* in premice v ospredju prikazuje prirejeno linearno krivuljo odnosa med *silo* in *hitrostjo* teka za vsakega posameznika posebej. Črtkana črna črta prikazuje linearno regresijsko premico za ponovljene meritve, ki se v največji meri prilega podatkom. L (število parnih povezav oz. število vrstic) = 21955. L/N (število parnih povezav na posameznika) = 3659.



Slika 5. Grafični prikaz korelacije za ponovljene meritve med horizontalno silo in hitrostjo pri sprintu na klancu z naklonom 6 %

Opombe. Vsaka barva prikazuje rezultate enega sprinta za posameznika. Krivulje v ozadju prikazuje surove podatke *sila-hitrost* in premice v ospredju prikazuje prirejeno linearno krivuljo odnosa med *silo* in *hitrostjo* za vsakega posameznika posebej. Črtkana črna črta prikazuje linearno regresijsko premico za ponovljene meritve, ki se v največji meri prilega podatkom. L (število parnih povezav oz. število vrstic) = 21955. L/N (število parnih povezav na posameznika) = 3659.

zmerna utrujenost, ki je lahko vplivala na rezultate. Preiskovanci so teste izvajali v naključnem vrstnem redu, s čimer smo minimizirali vpliv utrujenosti na rezultate in sočasno zmanjšali sistematično napako zaradi učinka učenja izvedbe testov. Meritve *hitrosti* so potekale v dveh pogojih, in sicer na strmini z naklonom 2 % in 6 %. Po pregledu sorodnih raziskav z veljavnimi in zanesljivimi postopki merjenja so merjenja v_h potekala na ravnini oz. na stezi z 0 % naklona (Rabita idr., 2015; Morin idr., 2010). Pri potiskanju na strmini z naklonom pri teku na smučeh je prišlo do izrazitega zmanjšanja

v_h med dvema vbodoma palic. To trditev lahko potrdimo z obliko krivulje *hitrost-čas*, kjer je opaziti večje nihanje v_h med dvema potiskoma s palicami kot med korakoma pri sprintu (Planjšek idr., 2013). Posledica tega je lahko manjši delež pojasnjene variance modela v primerjavi z ostalimi študijami, ki so analizirale sprint v atletiki.

V študiji opisujemo nov način vrednotenja anaerobnih sposobnosti mišic iztegovalk rok pri teku na smučeh. Metoda predstavlja način vrednotenja odnosa $F-v-P$ v tekmovalno specifičnih pogojih. Zaradi majhnega vzorca bi bilo v prihodnje smi-

selno raziskavo ponoviti na velikem vzorcu. S tem bi zagotovili večjo moč raziskave. Glede na dobljeni odnos $F-v-P$ bi bilo nato smiselno tekače na smučeh razdeliti glede na mehanske mišične lastnosti ter glede na njihove lastnosti ciljno usmeriti metode vadbe za moč – s ciljem optimizacije odnosa $F-v-P$. V študiji navajamo testiranje pri dveh pogojih, in sicer strmini z naklonom 2 % in strmini z naklonom 6 %. Smiselno bi bilo uporabiti še testiranje na ravnini, saj so avtorji v študijah z že veljavnimi metodami merjenja (Rabita idr., 2015) meritve izvedli po ravnini, npr. sprint na 30 metrov. S tem, ko bi dodali opisanemu protokolu še tek na smučeh na strmini z naklonom 0 %, bi preprečili upad *hitrosti* med dvema potiskoma s palicami in s tem morebiti izboljšali delež pojasnjene variance. Rabita idr. (2015) v svoji študiji navajajo, da je največja variabilnost rezultatov med F_h in v_h prav na začetku sprinta, kar lahko nakazuje različno tehnično izvedbo starta – ne dejanske razlike v proizvodnji F_h . Avtorji so v omenjeni študiji izvzeli *silo*, proizvedeno iz startnega bloka, ter jo analizirali posebej in ne skupaj s podatki celotnega sprinta. Za nadaljnje študije merjenja odnosa $F-v-P$ pri teku na smučeh predlagamo, da se iz analize izvzame prvi korak in izvede regresijsko analizo na preostalih podatkih. S tem bi zmanjšali variabilnost podatkov ter verjetno pojasnili večji delež variance. Za izboljšanje rezultatov prihodnjih študij predlagamo tudi uporabo bolj specifičnih filtrov obdelave signalov, s katerimi v večji meri lahko odstranimo oscilacije v_h , ki so posledica posameznih vbodov palice v podlago. Kljub obetavnim teoretičnim izhodiščem smo ugotovili preveč omejitev, da bi metodo z izbranim načinom zajema in obdelave podatkov lahko zanesljivo uporabljali v praksi. Kljub temu je naša raziskava temelj za nadaljnje raziskovanje odnosa $F-v-P$ pri sprintu pri teku na smučeh.

Ugotovili smo, da je odnos med F_h in v_h linearen. S tem smo potrdili, kar že velja v sprintu pri atletiki, in sicer da F_h z večanjem v_h linearno upada. V našem primeru to pomeni, da *sila* odziva ob vbodu palic pri teku na smučeh sorazmerno upada z večanjem *hitrosti* sprinta. S spreminjanjem v_h nam je uspelo pojasniti 50 % variance F_h . Metoda, ki smo jo uporabili za testiranje odnosa $F-v-P$, je tako manj zanesljiva kot metoda pri sprintu v atletiki. Obstaja znaten delež nepojasnjene variance, ki lahko izhaja iz drugih vzrokov, in sicer metod obdelave podatkov in protokolov merjenja – izbor strmin, variabilnost tehnike vbadanja palic

od začetka do konca sprinta (0–30 m) ter variabilnost podatkov F_h in v_h neposredno na startu). Enostavno izvedljiv, časovno nepotraten in posledično minimalno utrujajoč način merjenja odnosa $F-v-P$ bi lahko v prihodnje predstavljal orodje za podrobnejši vpogled v mehanske lastnosti mišic rok pri tekačih na smučeh – vendar so za povečanje verodostojnosti in zanesljivosti rezultatov potrebne dodatne raziskave, usmerjene v optimizacijo merilnega postopka in metod obdelave signalov.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo preiskovancem, ki so sodelovali v študiji, in Inštitutu za šport Fakultete za šport, ki je omogočil izvedbo meritev na terenu.

Literatura

1. Alsobrook, N. G. in Heil, D. P. (2009). Upper body power as a determinant of classical cross-country ski performance. *European journal of applied physiology*, 105(4), 633–641.
2. Baena-Raya, A., Rodríguez-Pérez, M. A., Jiménez-Reyes, P. in Soriano-Maldonado, A. (2021). Maximizing acceleration and change of direction in sport: A case series to illustrate how the force-velocity profile provides additional information to that derived from linear sprint time. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(11), 6140.
3. Bakdash, J. Z. in Marusich, L. R. (2019). Corrigendum: Repeated Measures Correlation. *Frontiers in psychology*, 10, 1201. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01201>
4. Bobbert, M. F. (2012). Why is the force-velocity relationship in leg press tasks quasi-linear rather than hyperbolic?. *Journal of Applied Physiology*, 112(12), 1975–1983.
5. Bortolan, L., Pellegrini, B., Finizia, G. in Scheina, F. (2008). Assessment of the reliability of a custom built Nordic Ski Ergometer for cross-country skiing power test. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 48(2), 177–182.
6. Bredin, S. S. D., Gledhill, N., Jamnik, V. K. in Warburton, D. E. R. (2013). PAR-Q+ and ePARmed-X+ New risk stratification and physical activity clearance strategy for physicians and patients alike. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 59(3), 273–277.
7. Cormie, P., McGuigan, M. in Newton, R. (2011). Developing Maximal Neuromuscular Power, Part 2. *Sports Medicine*, 41(2), 125–146.
8. Cosic, M., Djuric, S., Zivkovic, M. Z., Nedeljko-vic, A., Leontijevic, B. in Jaric, S. (2019). Is Test Standardization Important when Arm and Leg Muscle Mechanical Properties are Assessed Through the Force-Velocity Relationship?. *Journal of Human Kinetics*, 69(1), 47–58.
9. Cross, M. R., Brughelli, M., Samozino, P. in Morin, J. B. (2017). Methods of power-force-velocity profiling during sprint running: a narrative review. *Sports Medicine*, 47(7), 1255–1269.
10. Emri, I. in Cvelbar, R. (2006). Uporaba gladičnih funkcij za glajenje podatkov, podanih v diskretni obliki. *Strojniški vestnik*, 52(3), 181–194.
11. García-Ramos, A., Feriche, B., Pérez-Castilla, A., Padial, P. in Jaric, S. (2017). Assessment of leg muscles mechanical capacities: Which jump, loading, and variable type provide the most reliable outcomes? *European Journal of Sport Science*, 17(6), 690–698. <https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1304999>
12. García-Ramos, A., Pérez-Castilla, A. in Jaric, S. (2018). Optimisation of applied loads when using the two-point method for assessing the force-velocity relationship during vertical jumps. *Sports biomechanics*.
13. Gray, M. in Paulson, S. (2014). Developing a measure of muscular power during a functional task for older adults. *BMC Geriatrics*, 14(1), 4–9.
14. Haff, G. G. in Nimphius, S. (2012). Training principles for power. *Strength and conditioning research*, 34(6), 2–12.
15. Harries, S. K., Lubans, D. R. in Callister, R. (2012). Resistance training to improve power and sports performance in adolescent athletes: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 15(6), 532–540. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2012.02.005>
16. Hill, A. V. (1938). The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, 126(843), 136–195. <https://doi.org/10.1098/rspb.1938.0050>
17. Hill, A. V. (1938). The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, 126(843), 136–195. <https://doi.org/10.1098/rspb.1938.0050>
18. Hinkle, D. E., Wiersma, W. in Jurs, S. G. (2003). Applied statistics for the behavioral sciences (5th Edition). Houghton Mifflin.
19. Hori, N., Newton, R. U., Andrews, W. A., Kawamori, N., McGuigan, M. R. in Nosaka, K. (2007). Comparison of four different methods to measure power output during the hang power clean and the weighted jump squat. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(2), 314–320.
20. Janicijevic, D., Knezevic, O. M., Mirkov, D. M., Pérez-Castilla, A., Petrovic, M., Samozino, P. in García-Ramos, A. (2020). Assessment of the force-velocity relationship during vertical jumps: influence of the starting position, analysis procedures and number of loads. *European Journal of Sport Science*, 20(5), 614–623.
21. Jaric, S. (2015). Force-velocity Relationship of Muscles Performing Multi-joint Maximum Performance Tasks. *International journal of sports medicine*, 36(9), 699–704.
22. Jiménez-Reyes, P., Samozino, P. in Morin, J. B. (2019). Optimized training for jumping performance using the force-velocity imbalance: Individual adaptation kinetics. *PLoS one*, 14(5), e0216681. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216681>
23. Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Brughelli, M. in Morin, J. B. (2017). Effectiveness of an individualized training based on force-velocity profiling during jumping. *Frontiers in physiology*, 677. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00677>
24. Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., García-Ramos, A., Cuadrado-Peñañiel, V., Brughelli, M. in Morin, J. B. (2018). Relationship between vertical and horizontal force-velocity-power profiles in various sports and levels of practice. *PeerJ*, 6, e5937.
25. Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Pareja-Blanco, F., Conceição, F., Cuadrado-Peñañiel, V., González-Badillo, J. J. in Morin, J. B. (2017). Validity of a simple method for measuring force-velocity-power profile in countermovement jump. *International journal of sports physiology and performance*, 12(1), 36–43.
26. Markovic, G. in Jaric, S. (2007). Positive and negative loading and mechanical output in maximum vertical jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(10), 1757–1764. DOI: 10.1249/mss.0b013e31811ece35
27. Morin, J. B., Edouard, P. in Samozino, P. (2011). Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 43(9), 1680–1688. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318216ea37>
28. Morin, J. B., Samozino, P., Bonnefoy, R., Edouard, P. in Belli, A. (2010). Direct measurement of power during one single sprint on treadmill. *Journal of biomechanics*, 43(10), 1970–1975. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.03.012>
29. Pérez-Castilla, A., Jaric, S., Feriche, B., Padial, P. in García-Ramos, A. (2018). Evaluation of muscle mechanical capacities through the two-load method: optimization of the load selection. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(5), 1245–1253.
30. Planjšek, P., Čoh, M., Štuhec, S. in Vertič, R. (2013). Diagnostika hitrosti sprinterskega teka z laserskim merilnikom. *Šport: revija za teoretična in praktična vprašanja športa*, 61(3/4), 60–68.
31. Pleša, J., Kozinc, Ž. in Šarabon, N. (2021). Povezanost odnosa sila-hitrost med nalogama navpičnega skoka in sprinta pri odbojkarjih. *Šport: revija za teoretična in praktična vprašanja športa*, 69.

32. Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Sàez-de-Villarreal, E., Couturier, A., Samozino, P. in Morin, J. B. (2015). Sprint mechanics in world-class athletes: a new insight into the limits of human locomotion. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 25(5), 583–594.
33. Reid, K. F. in Fielding, R. A. (2012). Skeletal Muscle Power. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 40(1), 4–12. <https://doi.org/10.1097/jes.0b013e31823b5f13>
34. Samozino, P., Peyrot, N., Edouard, P., Nagahara, R., Jimenez-Reyes, P., Vanwanseele, B. in Morin, J. B. (2021). Optimal mechanical force-velocity profile for sprint acceleration performance. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 32(3), 559–575. <https://doi.org/10.1111/sms.14097>
35. Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E. in Morin, J. B. (2016). A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 26(6), 648–658.
36. Samozino, P., Rejc, E., Di Prampero, P. E., Belli, A. in Morin, J. B. (2012). Optimal force-velocity profile in ballistic movements—Altius. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(2), 313–322. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31822d757a>
37. Spudić, D., Cvitković, R. in Šarabon, N. (2021). Assessment and Evaluation of Force – Velocity Variables in Flywheel Squats: Validity and Reliability of Force Plates, A Linear Encoder Sensor, and A Rotary Encoder Sensor. *Appl. Sci.*, 11(22), 10541.
38. Spudić, D., Markič, A., Lužnik, I. in Rauter, S. (2021). Vrednotenje odnosa sila-hitrost-moč s skoki z dodatnimi bremen pri kolesarjih. *Šport: revija za teoretična in praktična vprašanja športa*.
39. Stöggl, T., Mueller, E., Ainegren, M. in Holmberg, H. C. (2011). General strength and kinetics: fundamental to sprinting faster in cross country skiing?. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 21(6), 791–803.
40. Vandewalle, H., Peres, G., Heller, J., Panel, J. in Monod, H. (1987). Force-velocity relationship and maximal power on a cycle ergometer. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 56(6), 650–656. <https://doi.org/10.1007/BF00424805>
41. WHO. (2013). Declaration of Helsinki Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. *JAMA*, 310(20), 2191–2194. <https://doi.org/doi:10.1001/jama.2013.281053>

Darjan Spudić, mag. kin.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za šport
darjan.spudic@fsp.uni-lj.si