



Milan Čoh¹,
Matej Sečnik², Brane Širok², Jurij Gostiša²

Spremembe kinematičnih in kinetičnih parametrov tekaškega koraka v vetrovniku

Izvleček

Namen študije je bil ugotoviti spremembe biokinetičnih parametrov teka v vetrovniku pri generiranju različnega zračnega toka ob hkratni predstavitvi tehnologije kinetike v vetrovniku. Raziskava je bila izvedena v vetrovniku »Nordijskega centra Planica – NCP«. V vzorec merjencev so bili vključeni trije trenirani tekači v tekih na srednje proge. Uporabili smo tekočo preprogo (treadmill) Air Runner Assault, ki je bila pritrjena v kanal vetrovnika prek štirih senzorjev za merjenje vertikalnih in horizontalnih sil reakcije podlage. Merjenci so opravili teke v vetrovniku pri pogojih usmerjenega zračnega toka v hrbet (hitrost vetra v hrbet +3 m/s in +5 m/s) in v prsi (–5 m/s in –7 m/s). Pri tem smo merili frekvenco korakov, kontaktne in letne faze, vertikalne in horizontalne komponente sile reakcije na podlago ter vertikalne in horizontalne impulze v fazi zaviranja in fazi pospeševanja tekaškega koraka. Hitrost tekača smo merili z ultrahitro kamero Photron UX100, s frekvenco 1000 Hz, nameščeno pravokotno na meridiansko ravnino horizontalnega kanala vetrovnika. Meritve sil in posnetke hitre kamere smo obdelali v programu LabView. Rezultati kažejo na spremembe v razmerju kontaktnih in letnih faz zaradi specifičnosti teka na tekoči preprogi. Kontaktne faze tekaškega koraka so časovno daljše od letnih faz, njihovo trajanje je 0,15 do 0,20 s. Maksimalne vertikalne sile dosegajo vrednost več kot 2000 N. Vrednosti vertikalnih sil so neodvisne od smeri in jakosti zračnega toka. Horizontalne sile v fazi kontakta so v močni odvisnosti od strujanja zračnega toka. Pri vetru v hrbet (+3 m/s in +5 m/s) se podaljša faza negativne sile pri stiku stopala s tekočo preprogo (faza zaviranja). Pri vetru v prsi (–5 m/s in –7 m/s) se faza zaviranja skrajša, gradient naraščanja sile pa je večji. Maksimalne sile pri odzivu (take off) so večje kot v primeru teka s strujanjem vetra v hrbet. Za frekvenco korakov ne moremo zaključiti, da je v veliki meri odvisna od strujanja zračnega toka.

Ključne besede: tek, kinetika, tekoča preproga, zračni tok



The changes in biokinetic parameters of the running stride in a wind tunnel

Abstract

The aim of the study was to establish the changes in biokinetic parameters of running in a wind tunnel, while generating different air flows, along with a presentation of the technology of kinetics in a wind tunnel. The study was conducted in the wind tunnel of the Planica Nordic Centre, Slovenia. The sample of subjects included three trained runners who participate in middle-distance running. We used the Air Runner Assault treadmill that was fastened in the wind tunnel and included 4 sensors for measuring vertical and horizontal ground reaction forces. The subjects were running within the wind tunnel, with air flow directed towards their back (wind speed towards the back: +3 m/s and +5 m/s) and towards the chest (–5 m/s and –7 m/s). Further on, we measured stride frequency, contact and flight phases, vertical and horizontal components of ground reaction forces, and vertical and horizontal impulses in the running stride deceleration and acceleration phases. Each runner's speed was measured using the Photron UX100 high-speed camera, at a frequency of 1,000 Hz, which was fastened perpendicularly to the meridian plane of the wind tunnel horizontal channel. The measurements of forces and recordings of the high-speed camera were subsequently processed using the LabView software. The results show changes in the ratio of the contact and flight phases due to the specifics of running on a treadmill. The contact phases of the running stride lasted longer than the flight phases, i.e. from 0.15 to 0.20 s. Maximum vertical forces reached over 2,000 N. The vertical force values are independent from the direction and force of the air flow. Horizontal forces in the contact phase are strongly dependent on the air flow currents. When the wind is directed towards the back of the runner (+3 m/s and +5 m/s), the phase of negative force at the contact of the foot with the treadmill is prolonged (deceleration phase). When the wind is directed towards the chest of the runner (–5 m/s and –7 m/s), the deceleration phase becomes shorter and the gradient of the increasing force is higher. Maximum forces in the take-off are higher than in the case of running with air flow directed towards the back. It cannot be concluded that the stride frequency largely depends on the air flow currents.

Key words: running, kinetics, treadmill, air flow

¹Fakulteta za šport, Univerza v Ljubljani

²Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

■ Uvod

Proučevanja teka z vidika biomehanske in fiziološke racionalnosti in učinkovitosti ima že kar dolgo zgodovino. Tek je eden ključnih dejavnikov uspešnosti v številnih športih, zaradi tega je pogosto v središču pozornosti športne znanosti. To je naravno gibanje človeka, vendar je to kompleksna veščina, ki jo definirajo številne motorične in funkcionalne sposobnosti ter nevro-mišični mehanizmi. Metode najbolj racionalnega teka ob kar najmanjši porabi energije so imele za posledico izboljšanje rezultatov teka tako v sprintu kot v tekih na srednje in dolge proge. Te metode so bile odvisne predvsem od dostopnih tehnologij v danem času. Razlikovale so se glede na teke v olajšanih okoliščinah (assistance training) in metode teka v oteženih okoliščinah (resistance training). Z metodami teka v olajšanih okoliščinah (teki z vlečenjem, teki po klanecu navzdol, sprint akceleratorji) je mogoče izboljšati hitrost, predvsem parameter frekvence korakov (Davis, 1980; Sarasanidis, 2000). Z metodami v oteženih okoliščinah (vlečenje sani, teki v hrib, teki po mivki, teki s padalom) je mogoče razviti specifično tekaško moč. Obe metodi povečujeta tekaški potencial pri atletih in drugih športnikih. Pomanjkljivost teh metod pa je v pomanjkanju eksaktnih eksperimentalnih tehnologij spremljanja učinkov vadbe.

V vrhunskem športu so tekmovalni rezultati že skoraj na zgornji meji človekovih motoričnih, fizioloških in psiholoških sposobnosti. Proučevanje gibalne učinkovitosti človeka je nedvomno aktualen problem in izziv za športno prakso in znanost. Tek kot najbolj naravna oblika človekovega gibanja je v središču športne znanosti zlasti v vrhunskem športu. Biomehanske tehnologije nam danes omogočajo proučevanje teka z vidika večje energijske učinkovitosti in funkcionalnosti. V pričujoči študiji bomo obravnavali biomehanko teka v vetrovniku (wind tunnel) pri različnih hitrostih zračnega toka in usmeritvah strujanja zraka v prsi oziroma v hrbet tekača na tekoči preprogi v homogenem zračnem toku pri izbranih nominalnih hitrostih, ki so bile dosežene z različnimi integralnimi parametri aksialnih ventilatorjev, vgrajenih v vetrovnik.

Racionalnost teka je odvisna od različnih biomehanskih dejavnikov gibanja, fizioloških karakteristik športnika, psihološke pripravljenosti, tekmovalne opreme in zunanjih pogojev, med katere se vsekakor uvršča gibanje zračnega toka v interakciji

z gibanjem tekača. Pomembnost naštetih dejavnikov je različna in med seboj povezana. Kljub temu kaže izhajati iz dejstva, da je tek kompleksno ciklično gibanje, ki ga dominantno določata frekvenca in dolžina korakov. Oba parametra sta medsebojno odvisna in individualno pogojena s procesi centralne regulacije gibanja, biomotoričnimi sposobnostmi, energetskimi procesi in morfološki značilnostmi (Mero in Komi, 1987; Mero, 1988; Coppenolle in sod., 1990; Gambetta 1991; Mero, Komi, Gregor, 1992; Donatti, 1995; Novacheck, 1998; Cronin, Hansen 2005, Morin in sod., 2011). Tek kot gibalni stereotip je sestavljen iz repetitive korakov v časovni enoti. Dolžina koraka je odvisna predvsem od telesne višine oziroma dolžine noge ter sile, ki jo razvijejo ekstenzorji kolčnega, kolenskega in skočnega sklepa v kontaktni fazi. Izvedbo kontaktne faze uvrščamo med najpomembnejše generatorje učinkovitosti teka (Mero in Komi, 1987; Lehmann in Voss, 1997; Bret in sod., 2002). Kontaktna faza mora biti čim krajša ob optimalnem razmerju med zaviralno (angl. braking phase) in propulzivno fazo (angl. propulsion phase). Ta problem je v zadnjem obdobju eksperimentalno in analitično raziskoval Jean-Benoît Morin s soavtorji (2011), pri čemer ugotavlja, da so hitrejši sprinterji tisti, ki proizvedejo največjo količino vodoravnega neto impulza na enoto telesne mase tekača.

Za razumevanje pomembnosti reakcijskih sil podlage (GRF – reaction forces of the floor), ki so v neposredni povezavi s pospeševanjem atleta pri teku, je nujno vključevanje eksperimentalnih metod, ki omogočajo merjenje pospeškov na različnih časovnih in krajevnih skalah. Na tem področju želimo omeniti prispevek Morina (2010, 2011), ki je s soavtorji predstavil novo metodo, kjer simultano analizirajo osnovno kinetiko in sile sprinterja na podlago dolžine 60 m. Razviti ekspertni sistem omogoča merjenje vzdolžnih in vertikalnih reakcijskih sil, ki nastanejo v kontaktnih fazah teka. Pri tem pa je treba poudariti, da je v tesni soodvisnosti z naštetim tudi vpliv interakcijskih efektov strujanja zračnega toka ob tekaču, ki prek sil aerodinamskega upora neposredno deluje na produkcijo vzdolžne in vertikalne reakcijske sile in s tem povezane energijske učinkovitosti teka.

V pričujoči študiji se bomo poleg spremljanja sile reakcije podlage tekača na podlago v vertikalni in horizontalni smeri osredotočili še na kinematiko teka z vidika frekven- ce in dolžine korakov v daljšem časovnem

intervalu ob prisotnosti zračnega toka različne intenzitete in usmeritve. Fokus študije bo posvečen poteku kontaktnih faz teka s simultanim opazovanjem kinematike posamezne kontaktne faze za levo in desno nogo. Pri tem je bila uporabljena sinhronizirana računalniško podprta vizualizacija s silami med stopalom in tekalno površino v kontaktnih fazah noge tekača s podlago tekalne proge.

V študiji izhajamo iz dejstva, da je razmerje med dolžino korakov in frekvenco lastna posameznemu atletu, ki je genetsko močno determinirana (Mero, Komi in Gregor, 1992) in vzročno vpliva na vse druge elemente teka. Vse navedeno pa je značilno odvisno tudi od zunanjih pogojev, med katerimi je najpomembnejša hitrost strujanja zraka okoli tekača. Zaradi navedenega bodo raziskane fenomenološke relacije med hitrostjo strujanja zračnega toka in dinamskimi parametri teka. Pristop k študiji bo temeljil na predhodnih raziskavah teka v vetrovniku, ki so jih predstavili različni avtorji (Pugh, 1971; Shanebrook, Jaszezak, 1976; Kyle in sod., 1979; Ito, 2006; Hirata in sod., 2012; Tatsuya in sod, 2016). Avtorji so raziskali vplive zračnega toka na tekača na modelnem nivoju, kjer je bil poudarjen vpliv zračnega toka na parametre teka vključno z dinamiko v turbulentni mejni plasti med tekočo preprogo, tekačem in zračnim tokom v oddaljenem polju nad tekočo preprogo.

V prispevku želimo nadgraditi predstavljene študije teka v vetrovniku, kjer bo na integralnem nivoju raziskan vpliv zračnega toka na frekvenco in dolžino korakov. Na lokalno krajevno-časovni skali pa bo analiziran vpliv zračnega toka na reakcijske sile in topologijo odrivne faze v odvisnosti od intenzivnosti zračnega toka v vetrovniku.

■ Metode

Vzorec merjencev

Tabela 1

V vzorec merjencev smo vključili tri trenirane atlete

	Atlet 1	Atlet 2	Atlet 3
Starost (leta)	26	22	28
Višina [cm]	171	186	183
Masa [kg]	58	72	74
1500 m (PR)*	03.59,0	03.58,7	03.58,8

* Osební rekord v teku na 1500 metrov

Merjenci niso imeli poškodb lokomotorne sistema. Merjenci so bili seznanjeni z namenom eksperimenta in merilnimi postopki, strinjali so se z izjavo o sodelovanju v skladu s Helsinško-tokijsko deklaracijo, da sodelujejo prostovoljno in da lahko sodelovanje kadarkoli prekinajo.

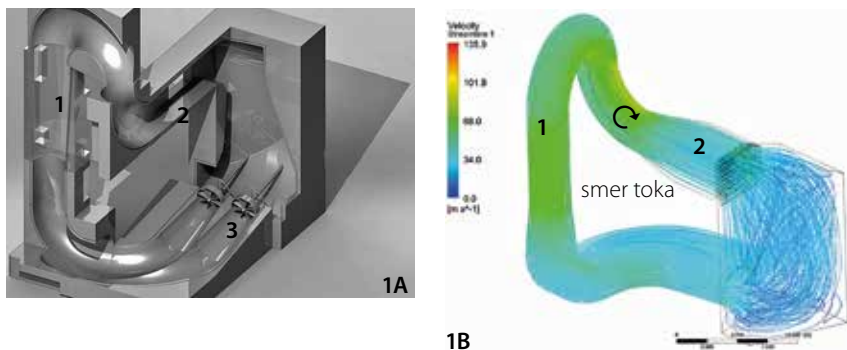
Eksperimentalni postopek

Študija teka v kontroliranem okolju zračnega toka v vetrovniku zahteva izvedbo eksperimenta na prirejeni eksperimentalni opremi, ki zagotavlja stacionarne lokalne aerodinamske karakteristike zračnega toka na mestu izvajanja teka, tertudi prirejeno eksperimentalno opremo, ki omogoča spremljanje kinetičnih karakteristik tekača na tekalni preprogi. Eksperiment mora biti izveden pri simultano nadzorovanih robnih pogojih, ki omogočajo analizo interakcijskih efektov med hitrostjo strujanja zračnega toka in dinamskimi-kinetičnimi karakteristikami tekača v času in prostoru izvajane eksperimenta. V nadaljevanju so predstavljene osnovne karakteristike eksperimentalne opreme, ki je omogočala izvedbo študije.

Predstavitev osnovnih karakteristik vetrovnika

Raziskava vpliva zračnega toka na tekače je bila izvedena v vetrovniku »Nordijskega centra Planica« (NCP). Vetrovnik je zaprtega tipa, kot je prikazano na Sliki 1. Zračni tok kroži skozi vertikalni del vetrovnika – vertikalna sekcija (1), ki je namenjena predvsem vadbi padalcev. Temu sledi horizontalni del vetrovnika – horizontalna sekcija (2), ki je namenjena vadbi smučarskih skakalcev in alpskim smučarjem. V tem delu vetrovnika se lahko izvajajo tudi študije teka, kolesarjenja in teka na smučeh. Za generiranje zračnega toka v vetrovniku sta v spodnjem delu obtočnega sistema inštalirana aksialna ventilatorja skupne moči 2,2 MW (3). Volumski pretok zraka je reguliran s frekvenčnim regulatorjem na inštaliranih ventilatorjih. Na Sliki 1A in 1B je predstavljen pretočni trakt vetrovnika z naštetimi vitalnimi segmenti vetrovnika (1–3), ki jih povezujejo optimalno oblikovani pretočni kanali. Oblika celotnega pretočnega trakta je bila določena in izbrana po predhodnih CFD-studijah (Slika 1B), ki so bile eksperimentalno preverjene na modelu vetrovnika (Slika 1A), kjer je bila zagotovljena geometrijska in kinematična podobnost med modelom in prototipom vetrovnika na objektu NCP.

Na vstopnem in izstopnem delu horizontalne sekcije so nameščena usmerjevala



Slika 1. Slika 1A predstavlja fizični model vetrovnika, ki je bil testiran z vodnim tokom v modelu z razmerjem 1 : 36 (velikost izvedbe vetrovnika : velikosti modela vetrovnika), Slika 1B pa predstavlja CFD-model tokovnega polja v pretočnem traktu vetrovnika. Funkcionalni parametri vetrovnika so podani v Tabeli 2 in 3.

Tabela 2

Nominalni parametri vetrovnika

nominalni volumski pretok zraka v vetrovniku	510 m ³ /s
prečni presek vertikalne sekcije	Φ 3,6 m
maksimalna hitrost zračnega toka v vertikalni sekciji vetrovnika	61 m/s
nominalna diferenca totalnega tlaka na inštaliranih ventilatorjih	4300 Pa
gostota zraka v vetrovniku je v mejah	1,1–1,2 kg/m ³
nominalna el. moč na ventilatorjih	2,2 MW

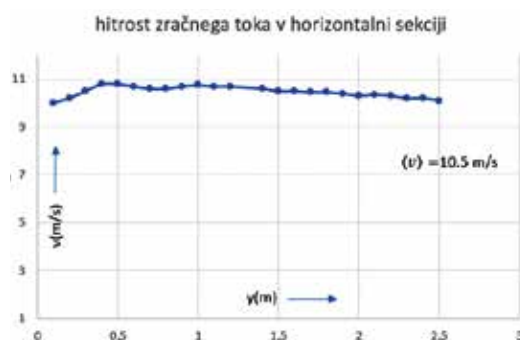
Tabela 3

Nominalni parametri vetrovnika – horizontalna sekcija

nominalni volumski pretok zraka v vetrovniku	124 m ³ /s
prečni presek horizontalne sekcije A	10,5 m ²
maksimalna hitrost zračnega toka v vertikalni sekciji vetrovnika	45 m/s

zračnega toka, ki zagotavljajo homogeno pretočno polje. Na desni strani Slike 2 je predstavljen diagram hitrostnega polja v horizontalni sekciji vetrovnika, izmerjen z namenom predstavitve hitrostnega profila v ravnini, v kateri se je pri izvedbi eksperimenta gibal tekač na tekalni preprogi. Povprečna hitrost zračnega toka v merilni

ravnini pri izvedbi kontrolne meritve porazdelitve hitrosti je znašala (v) = 10,5 m/s. Ta vrednost je bila kontrolirana z integralno merilno vrednostjo vetrovnika $v = f(n)$, ki je bila predhodno določena za potrebe regulacije hitrosti zračnega toka v vertikalni sekciji vetrovnika v odvisnosti od vrtilne frekvence inštaliranih aksialnih ventilatorjev.



Slika 2. Postavitev tekalne traku (levo) z robnimi pogoji – hitrostni profil zračnega toka v merilni ravnini (desno).

Na levi fotografiji Slike 2 je predstavljena postavitev tekalnega traku s tekačem v horizontalno sekcijo vetrovnika. Na desni strani Slike 2 pa je predstavljen diagram lokalnih hitrosti na lokaciji (NCP) v horizontalni smeri vetrovnika na lokaciji postavitve tekalnega traku v odvisnosti od vertikalne pozicije y . Hitrost je bila izmerjena z anemometrom proizvajalca Schiltknecht, tipa MiniAir 20. Hitrost je bila izmerjena v oddaljenosti 1 m od vstopa na tekalni trak v smeri zračnega toka v meridianski ravnini, ki leži v vzdolžni osi tekalnega traku.

Meritve hitrosti so bile izvedene pri integralnih parametrih vetrovnika : volumnski pretok $V = 110 \text{ m}^3/\text{s}$ z nominalno povprečno hitrostjo, izračunano iz volumnskega pretoka (v_{nom}) (m^3/s) in površine pretočnega kanala $A = 10,5 \text{ m}^2$; (v_{nom}) = V/A . Hitrost je bila izmerjena v oddaljenosti 1 m od vstopa na tekalni trak v smeri zračnega toka v meridianski ravnini, ki leži v vzdolžni osi tekalnega traku. Merilna negotovost izmerjene in nominalne hitrosti je v mejah $\pm 2 \%$.

Eksperiment v vetrovniku

V horizontalni sekciji vetrovnika smo za potrebe eksperimenta postavili tekočo preprogo (Air Runner Assault) ameriškega proizvajalca Assault Fitness USA. Tekoča preproga je bila pritrjena v kanal vetrovnika prek merilnih konzol za merjenje vertikalnih in vzdolžnih sil, kot je prikazano na Slikah 3 in 4. Merilne konzole so bile pritrjene z vijaknimi spoji tako, da je bilo mogoče merjenje vzdolžne reakcijske sile F_x na dveh podpornih točkah in štirih vertikalnih reakcijskih sil F_y na vseh podpornih točkah tekalnega traku na spodnji horizontalni platformi vetrovnika. Vgradnja v kanal je omogočala zasuk traku za 180° okoli vertikalne osi tekalnega traku, tako da so bile izvedene meritve reakcijskih sil na merilnih konzolah pri teku tekača z zračnim tokom – vetrom v hrbet, kot je prikazano na levi Sliki 3, in vetrom v prsi, kot je prikazano na Sliki 3B.

Kot je razvidno iz Slike 3, je bila hitra kamera PHOTRON mini UX100 nameščena pravokotno na meridiansko ravnino horizontalnega kanala vetrovnika v oddaljenosti 3 m od tekača na tekoči preprogi. V drugem primeru je bila kamera nameščena v meridianski ravnini na razdalji cca 3 m in usmerjena proti tekaču z namenom analize kontaktne faze – čelni pogled. Frekvenca zajemanja slik je znašala 1000 Hz. Kamera je bila sinhronizirana z računalniškim sistemom zajemanja časovnih signalov sil na



Slika 3. Levo – smer zračnega toka v hrbet (A3), desno – smer zračnega toka v prsi (B3).

inštaliranih senzorjih tekalnega traku, kot je prikazano na Sliki 4.

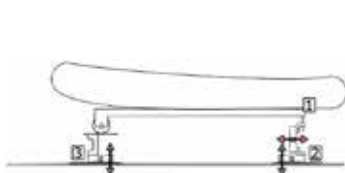
Merilne celice oziroma senzorji sil omogočajo zaznavo ekscentrične obremenitve. Uporabili smo senzorje sil proizvajalca XNQ Electric Company z nosilnostjo 60 in 100 kg in razredom točnosti C2/C3. Senzorje sil z nosilnostjo 100 kg smo uporabili za zaznavo sil v horizontalni smeri, senzorje z nosilnostjo 60 kg pa za zaznavo sil v vertikalni smeri. Horizontalne komponente sil smo merili na štirih točkah. Horizontalni senzorji so bili na spodnji strani pritrjeni na kovinsko ploščo, ki je omogočala boljšo stabilnost. Vertikalne senzorje smo namestili na sprednji merilni mesti in jih fiksno vgradili v spodnji del tekaške steze (Slika 4, desno). Zadnji del tekaške steze je bil v horizontalni smeri prosto vpet (Slika 4). Merilni senzorji so bili prek žične povezave povezani s sistemom za zajem podatkov, ki je bil razvit na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani. Sistem omogoča simultani zajem posameznih obremenitev merilnih senzorjev. Zajem sil na posameznih senzorjih je potekal s frekvenco 1200 Hz.

Hitrost teka smo določili z markerjem, nameščenim na tekalno površino. Iz znanih predpostavk, kot sta dolžina tekaškega tra-

ku in števila sličic kamere na sekundo, smo lahko izračunali hitrost tekača. Za določitev hitrosti tekoče preproge (treadmill) smo uporabili fotoaparati Nikon D 3000, s katerim smo snemali markerje na tekalni površini s frekvenco 60 Hz. Meritve sil in posnetke s hitre kamere smo obdelali v programu LabView. Izdelali smo programsko opremo, ki omogoča sinhronizacijo kamere in sistema za zajem podatkov sil.

Rezultati in razprava

Pri analizi rezultatov meritev kinematike in dinamike tekača na tekalnem traku ob stacionarnih aerodinamskih karakteristikah zračnega toka – hitrosti (v_{nom}) v vetrovniku so v nadaljevanju predstavljene kvalitativne in kvantitativne analize teka. V uvodnem delu analize so podani osnovni parametri teka. Opis metodologije vrednotenja časovnega poteka horizontalnih in vertikalnih obremenitev senzorjev na tekalnem traku v odvisnosti od časovnega poteka obremenitev stopal tekača na površino traku. Rezultati so podani s časovnima vrstama $F_{vert}(t)$ in $F_{vert}(t)$, ki sta dobljeni kot vsoti obremenitev zaznaval vertikalne sile na štirih zaznavalnih in horizontalne sile na dveh zaznavalnih:



Slika 4: Senzorji sil v horizontalni smeri x in vertikalni smeri y – shematski prikaz levo in desno fotografiji senzorjev v smeri x (A) ter smeri y (B).

$$F_{vert} = \sum_{i=1}^N F_{vert,i} \quad (1)$$

$$F_{hor} = \sum_{i=1}^N F_{hor,i} \quad (2)$$

Obe časovni vrsti, izračunani z izrazoma (1) in (2), predstavljajo kvazi periodično ponavljajoče se obremenitve senzorjev sil ob dotiku (kontakta med stopalom leve oziroma desne noge tekača s trakom). Analiza temelji na predpostavki, da so izmerjene vrednosti na senzorjih enake vrednostim sil – obremenitve stopal na površino traku.

Kot tipičen primer obremenitve tekača na tekalni trak je predstavljen diagram – časovni izsek iz izmerjene časovne vrste na Sliki 5, ki obsega obremenitve leve (L) in desne (D) noge na dolžini poljubno izbrane koraka t_{0D} .

na podlago tekalnega traku. Prav tako je iz Slike 5B razviden pojav »zakasnitve« signala horizontalne sile za vertikalno silo v točkah prehoda iz pozitivne v negativno vrednost. V prispevku ta pojav pripisujemo lastnostim prenosa sile s traku ob kontaktu z nogo na senzorje horizontalnih sil, kot posledico deformabilnih efektov na traku, mehanskih prenosov med trakom in podpornimi valjčki ter ne nazadnje na zaznavala sil. Predvidevamo, da je časovna zakasnitev funkcija mehanskih lastnosti sklopa posameznih elementov in zračnosti med posameznimi med njimi, ki rezultirajo v časovnem zamiku izmerjenega signala.

Podroben opis poteka časovnih signalov sil bo podan v nadaljevanju prispevka skupaj

$$(f_i) = 1/N \sum f_i \quad (9)$$

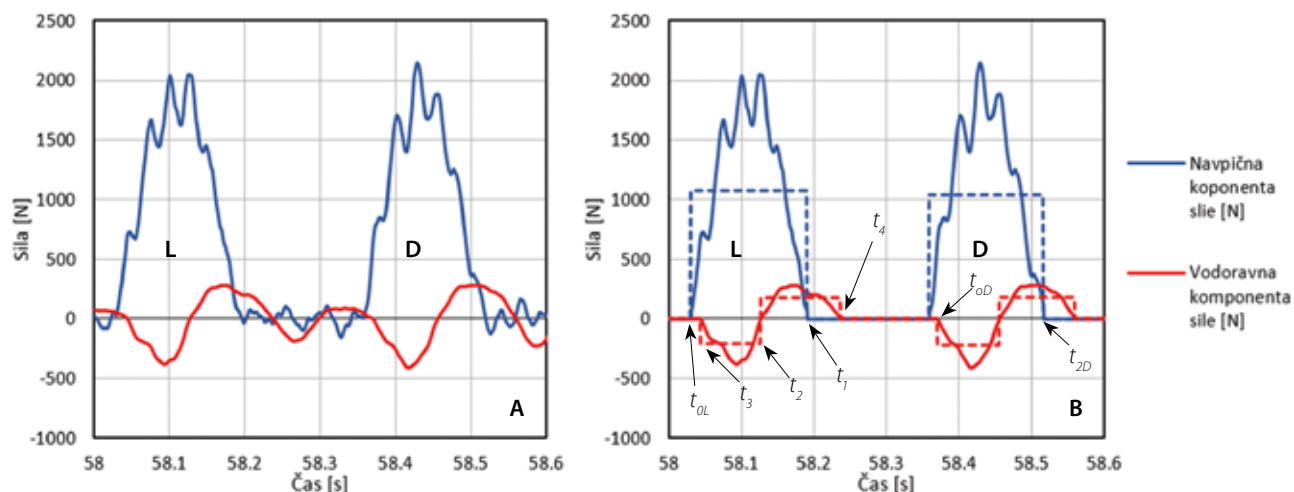
dolžine korakov

$$L_i = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{V_i}{t_{2D,i} - t_{0L,i}}}{N} \quad (10)$$

in časovno povprečna dolžina koraka

$$(L_i) = 1/N \sum_{i=1}^N L_i \quad (11)$$

Navedeni algoritmi bodo omogočili analizo teka na integralni in diferencialni skali, ki jo določa pogostost merjenja sil na eksperimentalnem sistemu v časovnih intervalih teka, ki so bili določeni s programom izvedbe eksperimenta.



Slika 5. Izsek časovne vrste obremenitve tekača v koraku, ki je sestavljen iz obremenitve leve (L) in desne (D) noge na tekalni preprogi. Diagram A – izvorni signal, diagram B – izsek časovne vrste, ki določa časovne meje kontakta stopala s površino tekalne preproge.

Iz časovnega poteka vertikalne sile na traku (modra barva) je razviden tipičen potek sile $F_{vert}(t)$ leve (L) in desne (D) noge, ki se ponavlja skozi celoten potek eksperimenta v navidezno stacionarnem časovnem zaporedju. Ugotovimo lahko manjše razlike med obremenitvama leve in desne noge. To je pričakovano glede na vzorec treniranih oseb. Po nekaterih študijah imajo trenirani tekači praviloma zelo majhno asimetrijo razvoja sile z levo in desno nogo; ta je manjša od 1,5 % (Mann, Sprague, 1980; Mero, 1988; Novatchek, 1988). Potek rdeče krivulje pa predstavlja zaviralno in pospeševalno fazo odziva tekača od traku. Časovni signal od t_0 do t_2 predstavlja zaviralno fazo, interval od t_2 do t_3 pa fazo pospeševanja. Na tem mestu kaže poudariti, da smo se pri analizi dinamike, ki je razvidna iz Slike 5 (prehod iz A v B), odločili za analizo, kjer smo izbrali časovne segmente, ko leva oziroma desna noga tekača generira vertikalno silo

s kineziološkimi rezultati gibanja tekača na preprogi. Poleg tega so za potrebe analize teka podani algoritmi za izračun navpičnih reakcijskih impulzov J_{vert} , impulzov upočasnitve J_{dec} , pospeševalnih impulzov J_{acc}

$$J_{vert} = \int_{t_0}^{t_1} F_{vert} dt \quad (3)$$

$$J_{dec} = \int_{t_3}^{t_2} F_{hor} dt \quad (4)$$

$$J_{acc} = \int_{t_2}^{t_3} F_{hor} dt \quad (5)$$

algoritmi kontaktnih časov,

$$t_k(i) = t_{2L}(i) - t_{0L}(i) + t_{2D}(i) - t_{0D}(i), \quad (6)$$

$$t_{kD}(i) = t_{2D}(i) - t_{0D}(i), \quad t_{kL}(i) = t_{2L}(i) - t_{0L}(i)$$

$$časovno\ povprečenega\ kontaktnega\ časa, \quad (7)$$

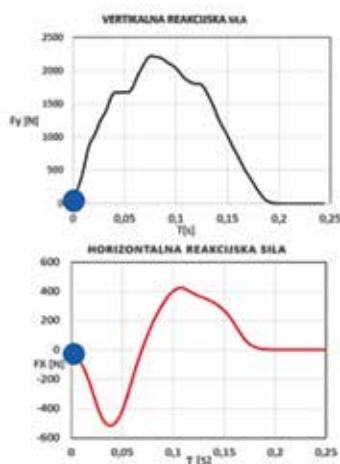
$$(t_k) = \sum t_{k,i} / N$$

$$f(i) = \frac{1}{(t_{0D,i+1}) - (t_{0D,i})} \cong \frac{1}{(t_{0L,i+1}) - (t_{0L,i})} \quad (8)$$

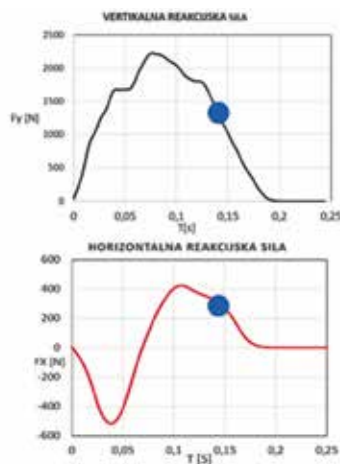
časovno povprečna frekvenca,

Simultana analiza kinematike teka in izmerjenih sil atleta na podlago

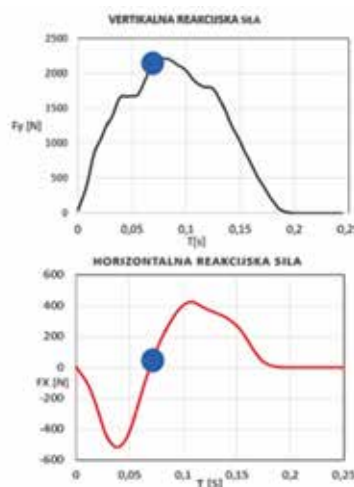
Glede na analizo Slik od 6 do 10 je mogoče ugotoviti kinematiko stopala tekača v kontaktni fazi desne noge v čelnem pogledu. Obravnavana kontaktna faza je bila poljubno izbrana iz zajetega segmenta teka v vetrovniku enaka $v = 0$. Vsaka izmed slik je sestavljena iz trenutnega posnetka stopala na tekalnem traku in pripadajoče vrednosti vertikalne sile F_y ter horizontalne sile F_x , ki je označena za dano sliko v časovni vrsti s točko na diagramu sil $F_x(t)$ in $F_y(t)$. V tem delu analize se osredotočimo na trenutne postavitev stopala na trak in pripadajoče vrednosti sil, ki predstavljajo reakcijske sile stopala na trak. Krivulji na vsaki od slik



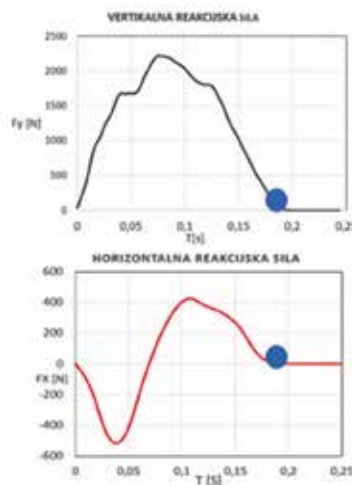
Slika 6. Začetni kontakt desnega stopala na zunanji strani stopala.



Slika 8. Prehod v odzivno fazo na zunanji strani stopala sile F_y .



Slika 7. Doseganje lokalnega ekstrema sile F_y , obremenitev na notranji strani stopala.



Slika 9. Zmanjševanje vertikalne sile F_y na 0 stopala obremenitev na notranji strani stopala.

predstavljata potek reakcijskih sil F_x in F_y na podlago, izmerjenih na vgrajenih senzorjih v časovnem intervalu koraka, ki je sestavljen iz odziva desne noge na traku. Rdeča krivulja prikazuje potek reakcijske sile F_y v vertikalni smeri, modra krivulja pa potek horizontalne reakcijske sile F_x . Vsaka od krivulj predstavlja trenutno vsoto izmerjenih vrednosti: rdeča krivulja – vsoto štirih vrednosti v vertikalni smeri, izračunano po enačbi (1), modra krivulja – vsoto sil, izračunano po enačbi (2) v horizontalni smeri vetrovnika. Točke na diagramih so trenutne vrednosti sil, ki pripadajo prikazani fotografiji ob diagramih.

V nadaljevanju je prikazana analiza poteka kontaktne faze za slike, ki so izbrane iz serije zaporednih fotografij opazovane kontaktne faze. Slika 6 pripada trenutku, ko se stopalo tekača dotakne tekalne preproge. Ta trenutek pripada začetni fazi kontakta. Pri tem se pojavi vertikalna sila na senzorjih,

ki se prek ekstrema sile F_x na Sliki 7 zmanjša na vrednost 0 na Sliki 9, ko je zaključena faza kontakta.

Iz slik, ki sledijo poteku diagramov, je razvidno, da se položaj stopala tekača spreminja glede na podlago traku z zunanje strani stopala, označeno z rdečim krogom na Sliki 6 v začetni fazi kontakta do prehoda, na notranjo stran stopala, označeno z rdečim krogom na Sliki 8, in do zaključne kontaktne faze na konici prsta, prikazano na Sliki 9.

Integralna analiza kinematičnih in dinamičnih karakteristik teka ob vplivu zračnega toka v vetrovniku

V nadaljevanju študije analiziramo signale sil $F_x(t)$ in $F_y(t)$, pri čemer se osredotočamo

na zaporedne časovne segmente, ki so sestavljeni iz parcialnih izsekov po vzorcu na Sliki 5B. Obdelani so časovni segmenti v celotnem merilnem intervalu pri izvedbi posameznih eksperimentov.

V Tabeli 4 so podane izbrane povprečne hitrosti v merni ravnini, ki se nahaja v meridianski ravnini, v kateri leži vzdolžna os – srednica tekalnega traku na višini 1,5 m od spodnje horizontalne stene vetrovnika.

Smer vetra je določena s predznakom (+ veter v hrbet) in (– veter v prsi tekača). Iz Tabele 4 je razvidno, da je posamezni tekač opravil le določeno število testov, ki bodo v nadaljevanju predstavljeni v analizi. Na diagramih Slike 10 so predstavljene porazdelitve vertikalnih obremenitev – reakcijske sile F_y v časovnih intervalih stika tekača s tekalnim trakom. Krivulje predstavljajo povprečne vrednosti sil v časovnih intervalih skozi celoten čas teka pri posameznih izbranih hitrostih zračnega toka v vetrovniku.

Tabela 4

Povprečne hitrosti vetra v meridianski ravnini v vetrovniku

	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	V5 (m/s)
Atlet 1	5	3	0	-5	-7
Atlet 2	5	3	0	-5	-7
Atlet 3		3	0	-5	-7

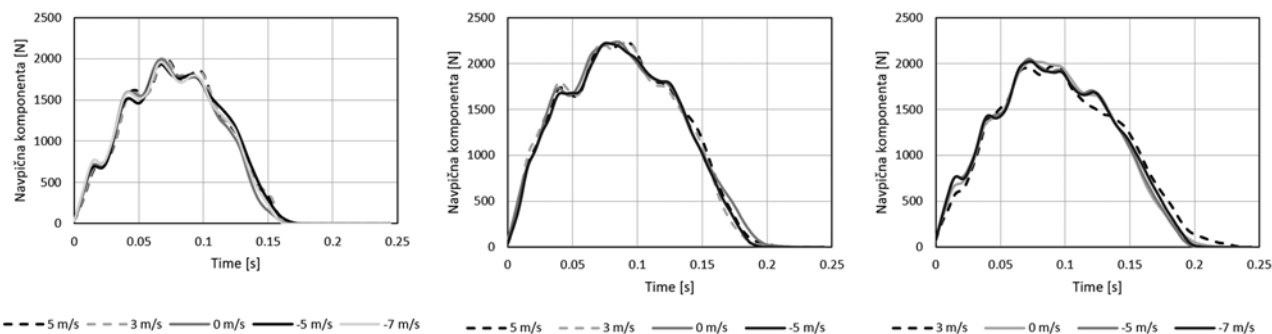
Iz diagramov vertikalne obremenitve tekalnega traku je razvidno, da so te med posameznimi atleti tako po amplitudah kot po kontaktnem času tekača s tekalno površino podobne. Kontaktni čas atleta 1 je nekoliko krajši (0,15 s) od kontaktnega časa atletov 2 in 3 (0,20 s). Kontaktni časi na tekalni preprogi so očitno bistveno daljši kot pri teku v običajnih okoliščinah na atletski tartanski stezi. Povprečen kontaktni čas tekačev srednjeprogašev na standardni tartanski stezi je 112 milisekund, pri sprinterjih pa 80 milisekund (Mero, Komi in Gregor, 1992; Hay, 1993; Donatti, 1995; Bret in sod., 2002). Na osnovi diagramov (Slika 10) lahko ugotovimo, da imajo naši atleti v povprečju kontaktno čas daljše od 0,15 sekunde.

Prav tako je tudi maksimalna vrednost vertikalne komponente sile na podlago F_y nekoliko manjša pri atletu 1. Največjo verikalno silo razvije atlet 2, ta je večja od 2000 N. V povprečju so vrednosti maksimalnih vertikalnih sil tekačev manjše od verikalnih

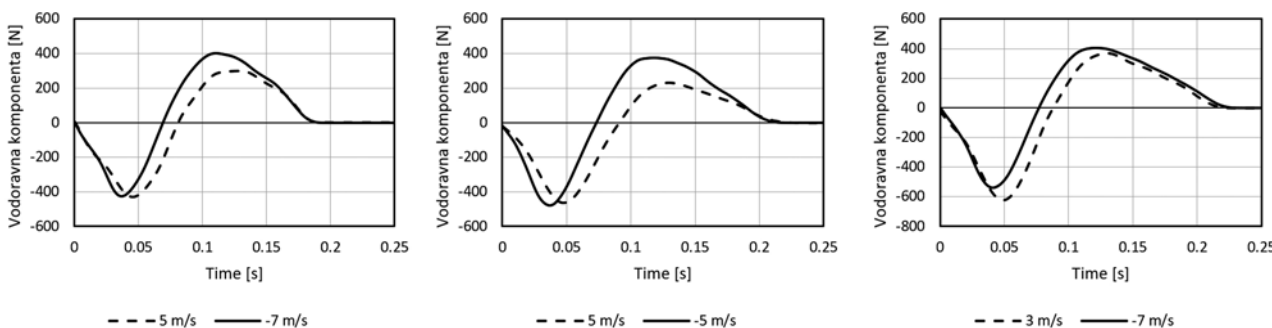
sil, ki jih razvijejo tekači na klasični tartanski atletski stezi. Tekachi na srednje proge razvijejo verikalno silo reakcije podlage velikosti 2300 do 2700 N (Luhtanen, Komi, 1980; Young, 1995; Novacheck, 1998; Nicol s sod., 2006). Treba je tudi poudariti, da je potek sil značilno neodvisen od velikosti in smeri hitrosti zračnega toka. Iz navedenega lahko sklenemo, da na vrednost vertikalne sile na podlago ne vpliva hitrost zračnega toka in da je amplituda vertikalne sile povezana z maso (težo) tekača. Prav tako je pričakovano manjši kontaktni čas pri atletu 1, ki je verjetno povezan z njegovimi longitudinalnimi merami. Atlet 1 je visok 171 cm, tekač 2 je visok 186 cm in tekač 3 je visok 183 cm. Vsa navedena opažanja so neizrazita in ne predstavljajo ugotovitev, ki bi lahko značilno navajale na vpliv zračnega toka in smeri strujanja zraka na porazdelitev sile tekača na podlago tekalne površine. Sklenemo lahko, da strujanje zraka zaradi tipične horizontalne usmeritve ne vpliva na verikalno komponento reakcijske sile

Fy. Je pa treba poudariti, da se v poteku sil vertikalne komponente F_y opazi asimetrično distribucijo amplitude sile, ki se kaže v intenzivnejšem pospeševanju v odzivni fazi in položnejši krivulji v fazi dotika na tekalno progo. Prav tako ima vsak tekač specifične, lastne fluktuacije vertikalne sile, ki so verjetno posledica gibanja stopala v odzivni fazi, ko se obremenitev na stopalu prenaša z zunanega prstnega dela stopala na notranji del stopala.

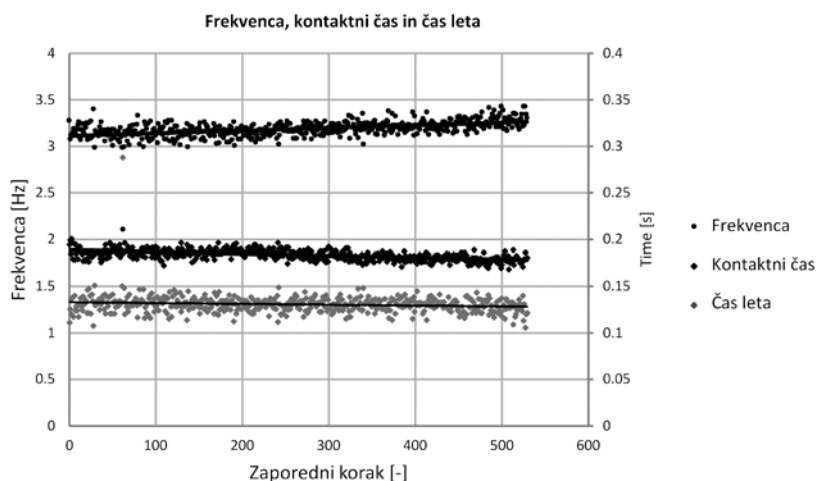
Pri poteku horizontalne sile v fazi kontakta lahko v nasprotju s potekom vertikalnih sil na Sliki 11 opazimo značilen vpliv hitrosti strujanja zračnega toka v vetrovniku na dinamiko teka. Pri vetru v hrbet (pozitivna vrednost $+$) je zaznati podaljšano fazo negativne sile, ki nastane pri stiku stopala s trakom v fazi zaviranja, ter položnejši prehod krivulje v območje pospeševanja ob zmanjšani vrednosti maksimalne sile v fazi odziva tekača od traku – faza pospeševanja. V primeru strujanja zračnega toka v tekačeve prsi je faza zaviranja krajša. Gradient naraščanja horizontalne sile pa je večji. Maksimalne sile pri odzivu so večje kot v primeru teka z vetrom v hrbet. Površine pod krivuljami sile F_x v fazi odziva, ki so proporcionalne mehanski energiji, sproščeni v kontaktu stopala tekača s trakom, so v primeru vetra v hrbet manjše kot v primeru teka z vetrom v prsi. To lahko povežemo z



Slika 10. Vertikalna komponenta sile na podlago tekalnega traku F_y (N).



Slika 10. Vertikalna komponenta sile na podlago tekalnega traku F_y (N).



Slika 12. Frekvenca korakov, kontaktni časi in faze leta v odvisnosti od časovne sekvence teka pri eksperimentu.

vplivom aerodinamskih sil, ki nastajajo kot interakcija med strujanjem zračnega toka v vetrovniku in tekačem pri teku. Z vetrom v hrbet se zmanjša sila v horizontalni smeri, nasprotno pa se zaradi povečanega aerodinamskega upora pri teku proti toku zraka v vetrovniku aerodinamski upor zaradi povečane relativne hitrosti poveča, kar rezultira v povečani kontaktni sili pri odzivu tekača.

V okviru analize kinematičnih lastnosti teka sta v nadaljevanju predstavljeni pomembni lastnosti teka – frekvenca in kontaktni čas. Oba kinematična parametra sta pri analizi teka v vetrovniku obravnavana v odvisnosti od hitrosti strujanja zračnega toka v vetrovniku. Prav tako je predstavljen tipičen časovni potek obeh spremenljivk z namenom ocene časovnega poteka teh. Za izračun kontaktnega časa je bil uporabljen algoritem (6), za izračun frekvence korakov pa algoritem (8).

Tipičen potek frekvence korakov v času trajanja eksperimenta – teka pri izbranih rob-

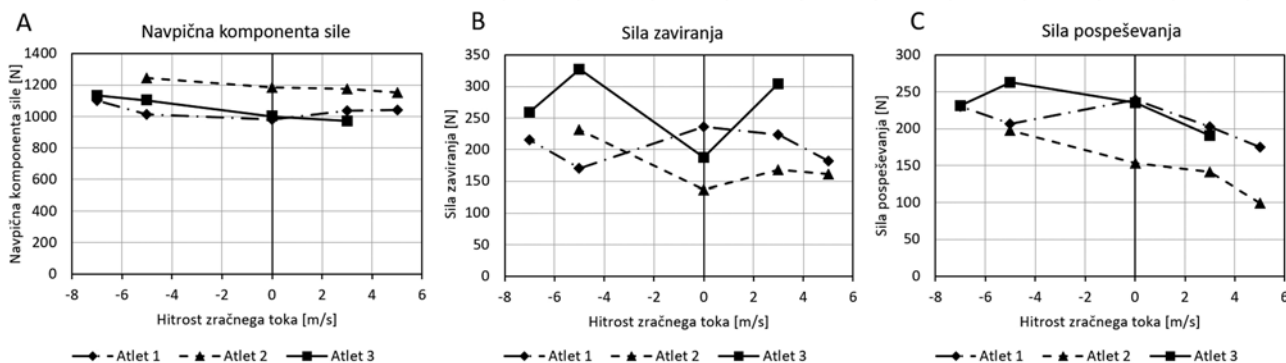
nih pogojih strujanja zraka v vetrovniku – je predstavljen na Sliki 12. Iz časovnega poteka frekvence lahko sklepamo na približno kvazi stacionaren proces z rahlim zviševanjem povprečne vrednosti frekvence. Prav tako je zaznati naključno fluktuiranje vrednosti frekvence, katere intenziteta fluktuacije prav tako narašča od začetka do konca eksperimenta. Ne glede na navedeno lahko sklenemo, da je dopustno uporabiti pri integralni analizi posameznih izvajanj teka pri različnih aerodinamskih robnih pogojih časovno povprečene vrednosti frekvence za posamezni eksperiment.

Na Sliki 12 je predstavljena tudi časovna vrsta izmerjenih kontaktnih časov in časov »letak« v odvisnosti od časa oziroma števila korakov v izbranem mernem intervalu za izbranega atleta in izbrano hitrost zračnega toka v vetrovniku. S točkami so podane posamezne vrednosti kontaktnih časov. Opazna je deloma razslojena distribucija realno izmerjenih vrednosti okoli trendne

črte. Prisoten je simetričen raztros vrednosti okoli trendne črte, ki se s časom eksperimenta povečuje. Razlago za ta pojav lahko pripisujemo periodičnemu pojavu teka, ki vključuje tako korak z levo kot tudi z desno nogo in je znan kot asimetrija teka. Očitno bi lahko sklepali na oceno, da se kontaktni časi leve oziroma desne noge nekoliko razlikujejo. Pomembno je tudi dejstvo, da se tako pri frekvenci kot pri kontaktnem času fluktuiranje s časom eksperimenta povečuje in da se ob povečevanju frekvence teka zmanjšuje kontaktni čas, kot je razvidno iz Slike 12. Časi letnih faz so daljši od kontaktnih faz, kar je posledica specifičnosti teka na tekoči preprogi. To razmerje je v standardnih pogojih teka na tartanski atletski stezi ravno obratno. Razmerje kontaktnih in letnih časov je 1 : 2 (Novacheck, 1998; Saralaidis, 1998; Čoh, 2005). V celotnem časovnem intervalu lahko ugotovimo veliko stabilnosti tako frekvence, kontaktnih časov kot letnih faz.

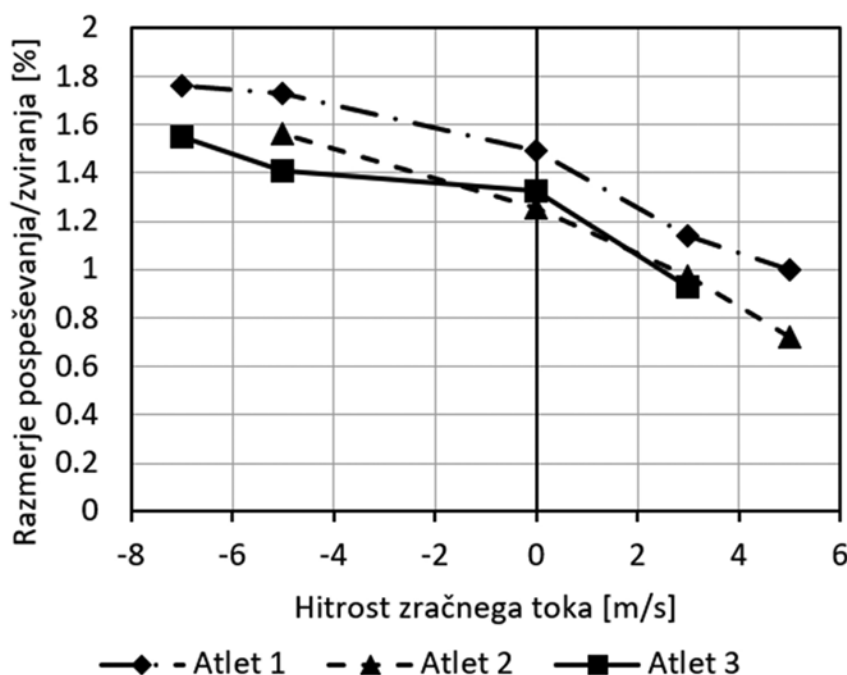
Parametrična analiza teka

Na osnovi Slike 13 (A, B in C) lahko ugotovimo nekatere parametre teka pri različnih – izbranih aerodinamskih karakteristikah strujanja zračnega toka v časovnih intervalih eksperimentov. Pogoji teka so se spreminjali samo z nastavitvijo obtočnih ventilatorjev vetrovnika na način, ki je zagotavljal z eksperimentalnim protokolom podane nominalne hitrosti, določene v Tabeli 2 za posameznega atleta (1, 2 in 3). Analize slik nam kažejo časovno povprečene vertikalne sile F_y in horizontalne sile F_x . Na osnovi teh je mogoče ugotoviti tudi normirano razmerje med silo pospeševanja in silo zaviranja. Podani so še parametri, povezani s kinematiko teka, ki jih definirajo



Slika 13. Časovno povprečene sile v vertikalni in horizontalni smeri: A – F_y , B – sila F_x v fazi zaviranja, C – sila F_x v fazi pospeševanja, pri različnih hitrostih zračnega toka in teku atletov 1, 2 in 3.

Razmerje pospeševanja/zviranja



Slika 14. Razmerje sile pospeševanja in sile zviranja za posamezne atlete in različne aerodinamske pogoje.

povprečne vrednosti frekvence, dolžine in hitrosti teka

Iz vrednosti povprečne vertikalne sile F_y na Sliki 13A se vidi, da so sile na podlago značilno odvisne od mase atletov. Prisoten pa je tudi vpliv sil, povezanih z usmerjenostjo in intenziteto zaviralnih oziroma pospeševalnih sil atletov. Pri analizi vertikalne sile za vse atlete je treba poudariti, da hitrost vetra značilno ne vpliva na iznos sile F_y .

Nasprotno pa je pri vplivu strujanja zračnega toka na potek horizontalnih sil značilno prisoten, kot je razvidno na Slikah 13B in 13C. V fazi dotika stopala s podlago – zviranje (Slika 13B) se pojavi šibko izraženo povečevanje sile v nasprotni smeri gibanja tekača (veter v prsi →), ki je najmanjša pri večji hitrosti vetra v prsi in se povečuje z intenzivnostjo vetra v hrbet (veter v hrbet →).

Največji vpliv strujanja zračnega toka je pri horizontalni sili F_x v območju pospeševanja v fazi odziva s tekalne površine, ki je predstavljen na Sliki 13C. Največje odrivne sile so pri velikih hitrostih strujanja zračnega toka v prsi (veter v prsi →). Nasprotno temu pa je odrivna sila najmanjša pri veliki hitrosti zračnega toka v hrbet tekača (veter v hrbet →). Ta pojav je zaznati pri vseh tekačih.

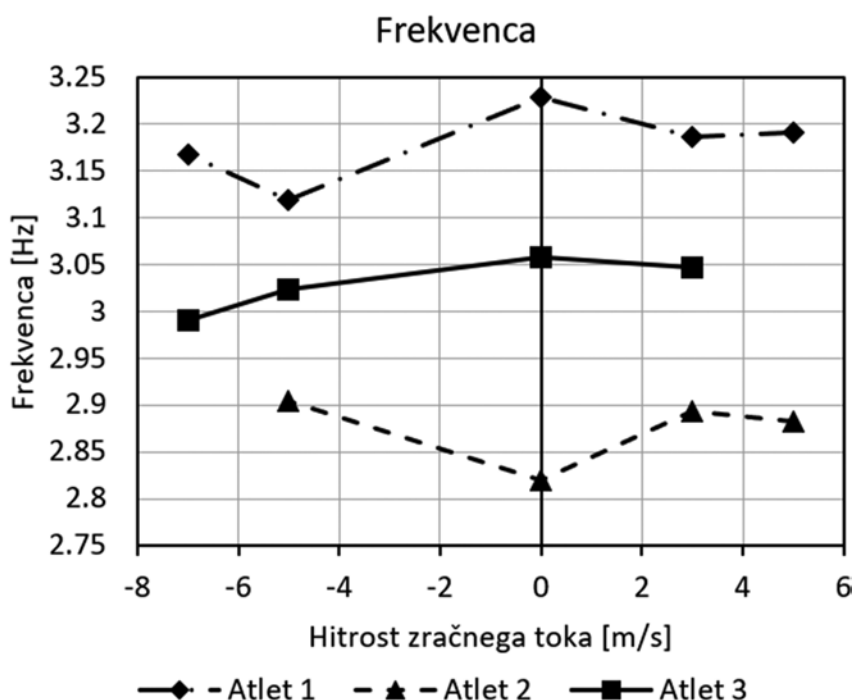
Pomemben kriterij učinkovitosti teka je razmerje sile pospeševanja in sile zviranja

za posamezne atlete pri različnih aerodinamskih pogojih. Razmerje sil predstavlja Slika 14. Za vse tekače je značilna padajoča krivulja v smeri od velike hitrosti vetra v prsi pri vrednosti 8 m/s do najnižjih vrednosti

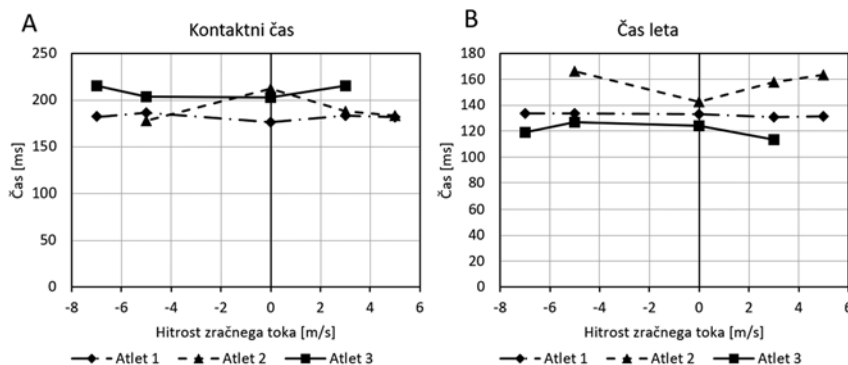
razmerja v območju velike hitrosti vetra v hrbet pri -5 m/s. Iz poteka diagramov na Sliki 14 vidimo, da se razmerje »koristne sile«, ki jo predstavlja sila pospeševanja, glede na zaviralno silo manjša, kar si lahko razlagamo s tem, da se z vetrom v hrbet v skladu s pričakovanji potrebna energija, ki je proporcionalna s predstavljenim razmerjem, manjša. Manjši je potreben napor tekača za izvedbo teka. Kontaktna faza je nedvomno ključni kinematični faktor, ki definira ekonomičnost šprinterskega teka z vidika razmerja med zaviralno in propulzivno – koristno fazo. To razmerje naj bi bilo 40 % : 60 % (Luhtanen in Komi, 1980; Morin, 2011; Morin, 2020). Čim krajša je zaviralna faza, tem manjša je redukcija horizontalne hitrosti tekača.

Ob tem pa je treba poudariti, da se z manjšanjem razmerja manjša izplen energije, ki jo lahko tekač vloži v realizacijo teka. Racionalizacija teka v specifičnih okoliščinah (tek v vodi, tek po klancu navzdol, tek s partnerjem) je trend v sodobnem procesu treniranja tekačev, da bi se izognili preobremenitvam mišično-vezivnega sistema, kolenskega in skočnega sklepa ter stopala (Ito, 2006; Hirata in sod., 2014; Tatsuya in sod., 2016).

Na Sliki 15 so predstavljene časovno povprečne frekvence posameznih atletov pri različnih aerodinamskih karakteristikah strujanja zračnega toka v vetrovniku. Iz



Slika 15. Frekvenca teka posameznih atletov v odvisnosti od aerodinamskih karakteristik.



Slika 16. Kontaktni časi in letne faze posameznih atletov v odvisnosti od aerodinamskih karakteristik.

poteka diagramov za posamezne atlete je razvidna signifikantna razlika med frekvencami korakov pri posameznih atletih. Iz poteke diagramov pa ne moremo sklepati, da hitrost strujanja zračnega teka značilno vpliva na frekvenco. Pri atletih 1 in 2 je opazno majhno povečanje frekvence s prehodom z območja strujanja zraka v prsi na območje strujanja zraka v hrbet. Iz navedenega lahko sklenemo, da je frekvenca odvisna predvsem od genetike tekača, manj pa od robnih pogojev strujanja zraka, pri katerih se tek odvija. V veliki meri je frekvenca odvisna od dolžine koraka, ko se poveča dolžina koraka, se kompenzatorno zmanjša frekvenca. Ta princip ureja »gibalni program« v centralnem živčnem sistemu (Young, 1995; Morin 2020).

Izvedba kontaktne faze je eden najpomembnejših generatorjev učinkovitosti tekaške hitrosti (Mero in Komi, 1987; Delecluse in sod., 1992; Prampero in sod., 2005; Cronin, Hansen, 2005; Nicol in sod., 2006). Kontaktna faza mora biti čim krajša ob optimalnem razmerju med zaviralno (angl. braking phase) in propulzivno fazo (angl. propulsion phase). Razmerje med kontaktnim časom in fazo leta pri posameznem tekaču je individualno definirano in avtomatizirano. Tekoč mora v čim krajšem kontaktnem času razviti čim večjo silo reakcije podlage. Od sile reakcije podlage je neposredno odvisna letna faza (Cronin, Hansen, 2005). Hitrost teka je optimalno razmerje med kontaktnim časom in fazo leta. Oba parametra sta predstavljena na Sliki 16. Ob primerjavi časov kontakta in leta lahko opazimo, da je faza kontakta značilno večja od faze leta pri vseh atletih. Opazen je tudi recipročen potek vrednosti, to pomeni, da so krivulje potekov navedenih spremenljivk glede na hitrost vetra zrcalno oblikovane. Najbolj je ta značilnost izražena pri atletih 2 in 3. Očitno imajo tekači zaradi specifičnih

pogojev tekoče preproge generalno daljše kontaktne faze in krajše letne faze ne glede na aerodinamične pogoje v vetrovniku.

Zaključek

Razumevanje biomehanike teka zanesljivo lahko prispeva pomemben delež pri oblikovanju treninga tako z vidika učinkovitosti kot preventive pred poškodbami. Tek je ključni element v motoričnem prostoru številnih športnih panog, zato je v središču zanimanja športne prakse in teorije. Področje športne biomehanike ter tudi nekatera druga področja športne znanosti so odvisna od napredka tehnologij, ki so na voljo za raziskovanje človekovega gibanja. Pričujoča študija je ena prvih v slovenskem nacionalnem prostoru. Namen eksperimentalne študije je bil ugotoviti biokinetični model teka v vetrovniku z vidika spremenjenih biomehanskih parametrov glede na tek v klasičnih pogojih. Hkrati pa je bil namen študije predstaviti tehnologijo merjenja kinetike in kinetike teka v vetrovniku. Izbrani merjenci so tekli na tekoči preprogi (treadmill) v vetrovniku pri pogojih usmerjenega zračnega toka v hrbet (hitrost vetra v hrbet +3 m/s in +5 m/s) in v prsi (-5 m/s in -7 m/s). Pri tem smo z uporabo merilnih senzorjev, pritrjenih na podnožje tekalne preproge (Air Runner), registrirali frekvenco korakov, kontaktne in letne faze, vertikalne in horizontalne komponente sile reakcije podlage ter vertikalne in horizontalne impulze v fazi zaviranja in fazi pospeševanja tekaškega koraka. Rezultati so pokazali spremembe v razmerju kontaktnih in letnih faz ter manjše obremenitve tekačev v vertikalni smeri. V prihodnosti bi kazalo raziskovanje nadaljevati, ga nadgraditi z vidika sinhronizacije kinetike in kinematike in boljše kontrole strujanja zračnega toka ter povečati vzorec merjencev v smislu večje generalizacije rezultatov raziskave.

Literatura

1. Bret, C., Rahmani, A., Dufour, A., Messonnier, L. in Lacour, J. (2002). Leg strength and stiffness as ability factors in 100 m sprint running. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 42, 274–281.
2. Cronin, J. in Hansen, T. (2005). Strength and power predictors of sports speed. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(2), 349–357.
3. Čoh, M. (2008). Biomechanical diagnostic methods in athletic training. Institute of Kinesiology, Faculty of sport, Ljubljana.
4. Davis, C. T. (1980). Effects of wind assistance and resistance on the forward motion of a runner. *Journal of Applied Physiology*, 48, 702–709.
5. Delecluse, C., Coppenolle, H. in Goris, M. (1992). A model for the scientific preparation of high level sprinters. *New Studies in Athletics*, 7(4), 57–64.
6. Donatti, A. (1995). The development of stride length and frequency in sprinting. *New Studies in Athletics*, 10(1), 51–66.
7. Hirata, K., Okayama, T., Teraoka, T. in Funaki, J. (2012). Precise aerodynamic measurement of track runner using a wind-tunnel moving-belt system. *Procedia Engineering* 34, 32–37.
8. Hay, J. (1993). The biomechanics of sports techniques (4ed): Prentice Hall.
9. Ito, S. (2006). Aerodynamic effects by marathon pacemakers on a main runner, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 73, 734, 1975–1980.
10. Kyle, C. (1979). Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners travelling in groups. *Ergonomics*, 22, 387–397.
11. Luhtanen, P. in Komi, P. (1980). Force-, power- and elasticity-velocity relationship in walking, running and jumping. *European Journal of Applied Physiology* 44(3), 79–289.
12. Mackala, K., Stodolka, J., Siemienski, A. in Čoh, M. (2012). Biomechanical analysis of starting long jump from varying starting position. *J. Strength Cond Res*, 27(10), 2674–2684.
13. Morin, J. B., Samozino, P., Bonnefoy, R., Edouard, P. in Belli, A. (2010). Direct measurement of power during one single sprint on treadmill. *Journal Biomechanics*, 43, 1970–1975.
14. Morin, J. B., Dalleau, G., Kyrolainen, H., Jeanin, T. in Belli, A. (2011). A simple method for measuring stiffness during running. *J Appl Biomech*, 21, 167–180.
15. Morin, J. B. in Sève, P. (2011). Sprint running performance: comparison between treadmill and field conditions. *Eur J Appl Physiol*, 111, 1695–1703.
16. Morin, J. B. (2020). Sprint Running Mechanics New technology, new concepts, new per-

- spectives. *Aspetar Sports Medicine Journal*, 2(3), 326–332.
17. Mann, R. in Sprague, P. (1980). A kinetic analysis of the ground leg during sprint running. *Research Quarterly for exercise and sport*, 51, 334–348.
 18. Mero, A. (1988). Force-Time Characteristics and Running Velocity of Male Sprinters During the Acceleration Phase of Sprinting. *Research Quarterly*, 59(2), 94–98.
 19. Mero, A., Komi, P. in Gregor, R. (1992). Biomechanics of Sprint Running. *Sport Medicine* 13, 6, 376–392.
 20. Novacheck, T. (1998). The biomechanics of running. *Gait and Posture*, 7, 77–95.
 21. Nicol, C., Avela, J. in Komi, P. (2006). The Stretch-Shortening Cycle. *Sports Medicine*, 36(11), 977–999.
 22. Pugh, L. (1970). Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance, *The Journal of Physiology*, 207, 823–835.
 23. Pugh, L. (1971). The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. *The Journal of Physiology*, 213, 255–276.
 24. Prampero, P., Fusi, S., Sepulcri, J., Morin, B., Belli, A. in Antonutto, G. (2005) Sprint running: a new energetic approach. *Journal of Experimental Biology*, 208, 2809–2816.
 25. Shanebrook, J. R. in Jaszczak, R. D. (1976). Aerodynamic drag analysis of runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 8, 43–45.
 26. Sarasilanidis, P. (2000). Training for the improvement of maximum speed: flat running or resistance training? *New Studies in Athletic*, 15 (3–4), 45–51.
 27. Tatsuya, I., Takafumi, O., Takahiro, T., Satoshi, M. in Hirata, K. (2016). Wind-tunnel experiment on aerodynamic characteristics of a runner using a moving-belt system. *Cogent Engineering*, 3, 1231–1389.
 28. Young, W. (1995). Laboratory strength assessment of athletes. *New Studies in Athletics*, 10 (1), 89–96.

Prof. dr. Milan Čoh

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za šport
milan.coh@fsp.uni.lj.si