Definice a užitečnost běhového výkonu

Dr. Kristine Snyder
s vědeckými poradci Shalayou Kipp, M.S.
a Prof. Wouterem Hoogkamerem

"Všechny modely jsou špatné. Některé modely jsou užitečné." - George E. P. Box

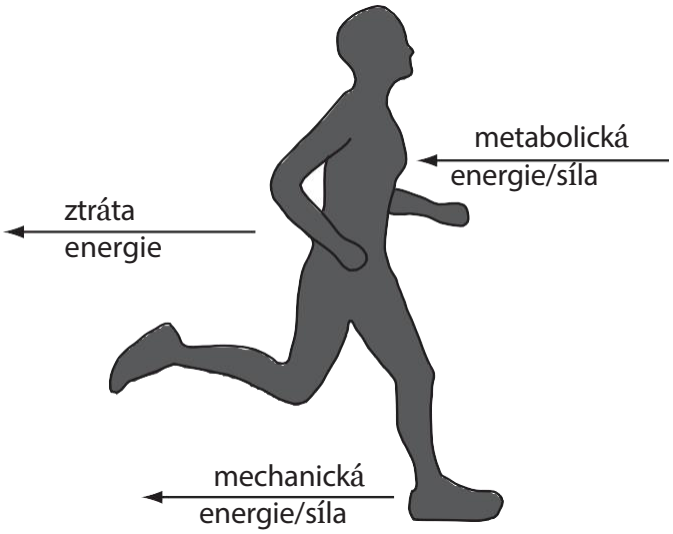
1 Motivace a organizace

V poslední době panuje značný zmatek v tom, co znamenají různé hodnoty běžeckého výkonu, jak souvisejí s hodnotami výkonu v cyklistice a jaké metriky jsou konzistentně užitečné. Jedním ze základních problémů při používání výkonu jako náhražky úsilí při běhu je, že fyzikálně definované metriky nemusí být ty, které běžec může považovat za užitečné, zatímco užitečné metriky mohou být obtížněji vypočitatelné. Účelem tohoto článku je definovat různé typy výkonu, které se při běhu používají, popsat různé modely používané k odhadu výkonu a jejich různá měřítka a poté diskutovat o potenciální užitečnosti každé z těchto měr výkonu.

Vytvoření tohoto vysvětlení bylo náročné. Cílem tohoto dokumentu bylo, aby vše bylo napsáno tak, aby člověk, který chce jen základy, dostal to, co potřebuje, aniž by byl zahlcen, a zároveň aby obsahoval takové detaily, které by akademik vyžadoval a informovaný, inteligentní běžec by je mohl opravdu chtít a ocenit. Tento první díl je tedy přehledem typů výkonu a dalších ukazatelů, které se týkají běhu,

a v případě potřeby budou následovat podrobnější informace o konkrétních tématech.

2 Co je to síla?



Obrázek 1: Přeměna metabolického výkonu na mechanický výkon se ztrátami energie.

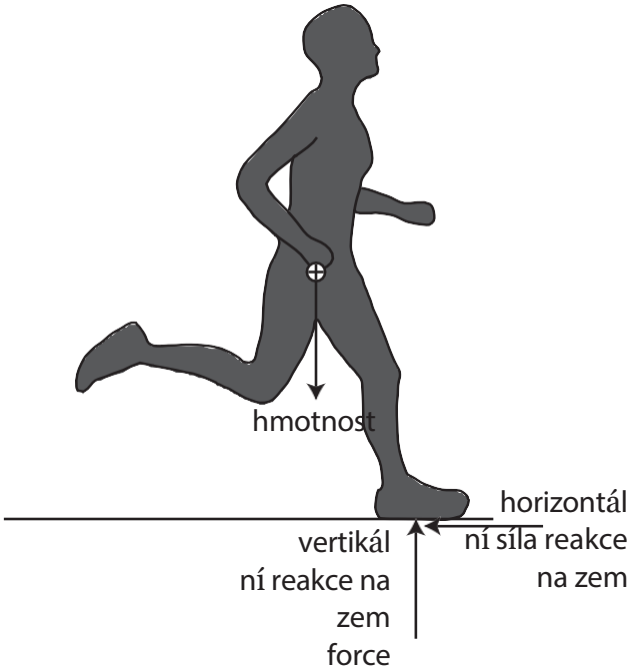
V běhu existují dvě hlavní definice výkonu:

1. **Mechanický výkon -** práce/výkon energie za sekundu. Mechanická síla, kterou tělo působí na okolní svět a pohybuje končetinami vzhledem k tělu, nebo výstupní výkon produkovaný svaly k pohybu těla při běhu. Obvykle se měří ve wattech (joulech za sekundu) a normuje se podle hmotnosti, což dává watty/kg.
2. **Metabolický výkon -** práce/energie vynaložená pohybovým svalem za sekundu. Množství metabolické energie za sekundu, které musí tělo spotřebovat na běh. Měří se také ve wattech na kilogram, často se však přepočítává na kalorie.

Mechanický výkon bývá užitečný pro analýzu biomechaniky, zejména mechanického výkonu v jednotlivých kloubech, zatímco metabolický výkon je často užitečnější pro hodnocení celkového úsilí.

3 Mechanická síla

3.1 Na úrovni organismu (těla)



Obrázek 2: Síly působící v mechanickém systému celého těla při běhu.

Nejjednodušší způsob, jak modelovat tělo při běhu, je modelovat ho jako bodovou hmotu, na kterou působí vnější svět a která je jím ovlivňována. Pro určení celkového mechanického výkonu těla se obvykle předpokládá, že tělo je pouze bodová hmota, potenciální a kinetická energie středu hmoty se sečtou, aby se získala celková práce, a tato hodnota se pak vydělí časem. Alternativně lze výkon určit vynásobením sil působících na střed hmotnosti rychlostí. Tento model však zohledňuje pouze interakci této předpokládané bodové hmotnosti s okolím a nezachycuje výkon potřebný k pohybu končetin vzhledem k tělu.

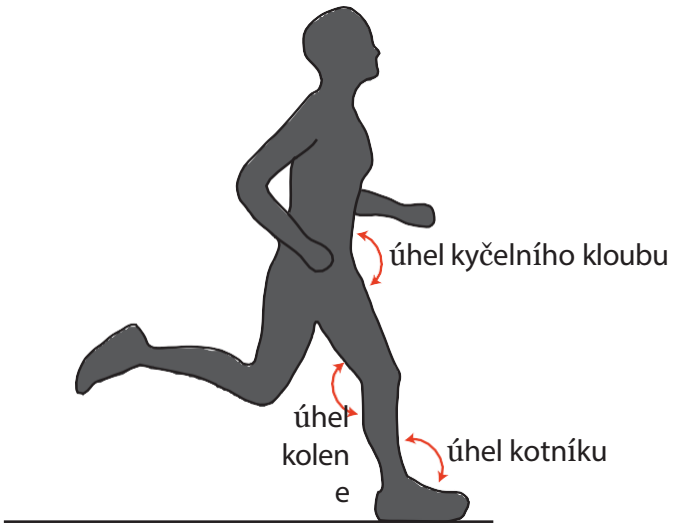
Při rovnoměrném ustáleném běhu je tato hodnota při zanedbání ztrát nulová, takže při použití tělesného me- chanického výkonu jako korelátu úsilí se často započítávají pouze kladné výkonové příspěvky, nikoliv záporné.

$$P = \frac{\Delta E_{KIN} \pm \Delta E_{GPE} \pm}{\Delta t} \tag{1}$$

Dále si uvědomte, že tato rovnice zahrnuje pouze mechanický výkon spojený s interakcí s

okolím, nikoli s pohybem končetin vzhledem k tělu.

3.2 Na úrovni jednotlivých kloubů



Obrázek 3: Definice úhlů kloubů dolních končetin při běhu. Extenze je považována za pozitivní a flexe za negativní.

Tělo není bodová hmota, ale řada propojených segmentů, proto se mechanická síla při běhu zkoumá na úrovni jednotlivých kloubů. Namísto předpokladu, že tělo je bodová hmota, zahrnuje tento způsob určení mechanického výkonu všechny klouby a vypočítává výkon v každém kloubu pomocí sil pod nohama, hmotností segmentů těla a úhlových rychlostí kloubů a tyto veličiny dohromady sčítá. To umožňuje přesněji určit, kde se síla vytváří, a také zohlednit změny, ke kterým dochází při švihu, na rozdíl od pouhého postoje. Všimněte si však, že biartikulární svaly (svaly, které se kříží se dvěma klouby) umožňují přenos síly mezi klouby.

Výpočet síly v jednotlivých kloubech začíná u chodidla. K výpočtu výkonu kotníku se použije moment (točivý moment) kolem kotníku způsobený silou země na chodidlo, pohyb na chodidle a hmotnost chodidla spolu s úhlovou rychlostí kotníku. Podobné výpočty se provádějí i v koleni a kyčli. Tyto hodnoty se sečtou a získá se mechanická práce, přičemž výkon se vypočítá jako práce/čas. K výpočtu výkonu kloubů v laboratoři se používá optické snímání pohybu ke sledování pohybu končetin a silové desky ke stanovení sil pod chodidly.

4 Metabolický výkon

V laboratoři se metabolický výkon (P_{MET}) obvykle vypočítává pomocí nepřímé kalorimetrie, která využívá měření vydechovaných plynů, předpoklady nebo znalosti o využití substrátů a vzorec(e) pro stanovení spotřeby energie v ustáleném stavu. Při běhu se měří množství spotřebovaného kyslíku a množství vyprodukovaného oxidu uhličitého pomocí masky umístěné na nose a ústech. Metabolický výkon se pak vypočítá z těchto hodnot kyslíku a oxidu uhličitého v **ustáleném stavu.** Následující běžně používaná rovnice pochází z (P´eronnet a Massicotte, 1991).

$$P_{MET} = 16{,}89V\ O_2 + 4{,}84V\ CO_2 \qquad (2)$$

Nepřímá kalorimetrie zohledňuje pouze aerobní procesy. Proto sama o sobě není přesná, pokud lidé pracují natolik intenzivně, že využívají i anaerobní metabolické procesy. Skutečným zlatým standardem by byla dvojnásobně značená voda, při níž se subjektům podává voda značená deuteriem (^2H) a ^{18}O, které se pak používají ke stanovení rychlosti vylučování CO_2 , nebo přímá kalorimetrie, při níž se energetický výdej určuje měřením, kolik tepla vyprodukuje jedinec v těsně uzavřené měřicí komoře, ale tato měření by byla neúměrně náročnější.

Odhad metabolického výkonu bez nepřímé kalorimetrie zahrnuje využití poznatků o běžeckých podmínkách, podmínkách prostředí a anatomických, biomechanických a fyziologických údajích uživatele k co nejpřesnějšímu a nejpřesnějšímu odhadu laboratorních hodnot.

5 Vztah mechanického a metabolického výkonu

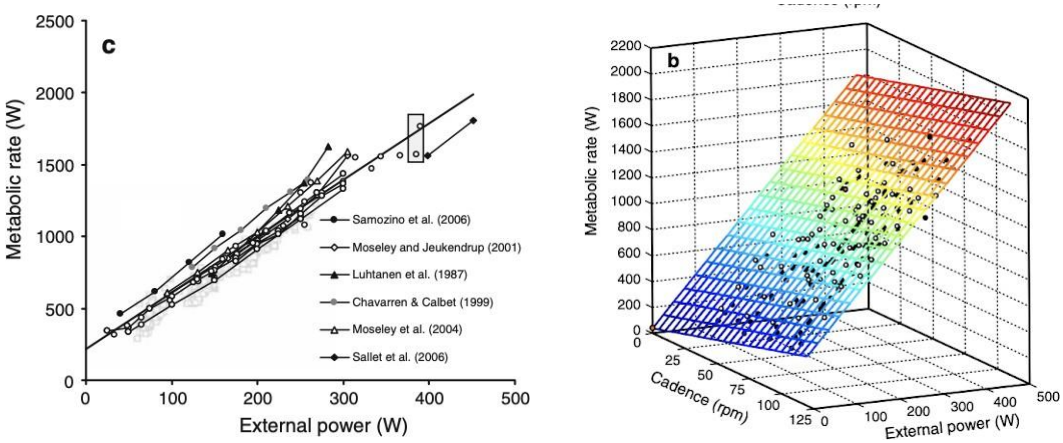
5.1 Efektivita

Účinnost je poměr mechanické produkce energie a metabolické spotřeby energie. Na první pohled to vypadá jednoduše, ale při běhu to není tak jednoduché, jak by se mohlo zdát.
se věnovat jiným činnostem. Při pozitivní produkci síly, kdy svaly produkují sílu soustředěnou kontrakcí (zkrácením), je účinnost *~25 %*. Poznámka: slovo kontrakce pouze naznačuje, že svaly jsou aktivní. Mohou se kontrahovat koncentricky (při zkracování), izo-
metricky (při zachování stejné délky) nebo excentricky (při prodlužování), Hodnoty účinnosti mohou být výrazně vyšší u pohybů, které zahrnují negativní sílu (prostřednictvím excentrických kontrakcí) nebo recyklaci energie, ale mohou se lišit, zejména s rostoucím sklonem.

5.2 Efektivita je v cyklistice jednoduchá

Při jízdě na kole je mechanický systém omezen, protože 1) síla se vytváří, nikoliv

absorbuje (zkrácením svalů při koncentrické kontrakci), a 2) nedochází k recyklaci mechanické energie. Omezený mechanický systém při jízdě na kole umožňuje silnou



Obrázek 4: Srovnání mechanického (vnějšího) výkonu a rychlosti metabolismu (výkonu) při jízdě na kole. Obrázky převzaty z přehledového článku autorů (Etterna a Loras, 2009).

korelace mezi mechanickým a metabolickým výkonem. Protože kladný svalový výkon má účinnost *~25 %,* je metabolický výkon v podstatě jen čtyřnásobkem mechanického výkonu. Korelace mezi oběma hodnotami výkonu je 0,97, tedy velmi vysoká (Ettema a Loras, 2009). Protože cyklistika je vysoce omezený systém se známou, konzistentní trajektorií nohou, je snadné měřit mechanickou sílu. V důsledku toho je běžné měřit mechanický výkon a přesně jej používat jako korelát metabolického výkonu.

5.3 Proč je vztah mezi mechanickým a metabolickým výkonem při běhu složitější?

V běhu existuje řada rozdílů, které činí vztah mezi mechanickým a metabolickým výkonem složitějším než u cyklistiky.

1. **Mechanický systém je méně omezený.** Velikost vyprodukované síly a metabolická energie potřebná k jejímu vyprodukování závisí především na dvou věcech: délce a rychlosti svalového vlákna, které tuto sílu produkuje. Když je systém méně omezený, mohou se tyto faktory více měnit a mají větší vliv na změnu potřebné metabolické energie.

2. **Tělo síly vytváří i absorbuje.** Protože účinnost absorpce síly je vyšší než *~25 %*

   pro pozitivní produkci síly, je celková účinnost absorpce síly vyšší než *~25 %* pro pozitivní produkci síly.
   účinnost již není *~25 %*. Skutečná účinnost se však liší v závislosti na tom, kolik každé síly.

3. **Energii lze recyklovat.** Při běhu se elastická energie může ukládat ve šlachách a dalších elastických tkáních a následně se vracet zpět. Kromě toho je zde i metabolický

přínos

zkrácení svalu po jeho natažení. Tyto změny rovněž zvyšují účinnost nad 25 %, ale může být obtížné určit, jak významnou roli tyto faktory hrají.

Kvůli těmto rozdílům nejsou mechanický výkon a/nebo účinnost trvale nejlepšími ukazateli úsilí při běhu v různých podmínkách, takže se často používá alternativní metrika, která lépe koreluje s úsilím.

5.4 Alternativa k efektivitě pro složitější systém: hospodárnost/náklady na dopravu

Ekonomika běhu není totéž co efektivita běhu, i když spolu souvisí. Ekonomika běhu se tradičně určuje měřením míry spotřeby kyslíku nebo energie při dané rychlosti. Pokud je vyjádřena ve vztahu k tělesné hmotnosti, může mít ekonomie běhu jednotky kyslíku (mlO2/kg/min) nebo energie (J/kg/min nebo W/kg). Vaše ekonomika běhu může být lepší, protože při běhu danou rychlostí vykonáte méně mechanické práce, ale máte typickou účinnost mechanické práce vůči metabolické. Mohla by být také lepší, protože jste efektivnější v tom smyslu, že vykonáváte typickou mechanickou práci, ale vynakládáte méně metabolické práce díky jiným faktorům, jako je účinnější elastické ukládání a návrat energie.

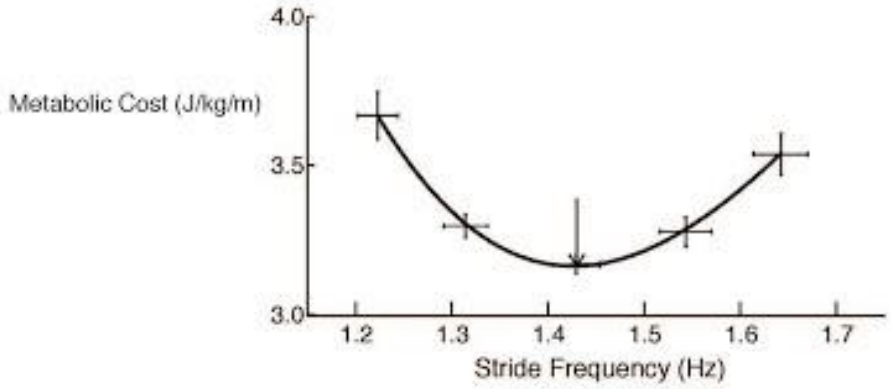
Jedním z nejběžnějších způsobů vyjádření hospodárnosti jsou náklady na dopravu neboli energetické náklady na jednotku vzdálenosti. Náklady na dopravu se vypočítají tak, že se vezmou náklady na energii specifické pro danou hmotnost za sekundu (jak je popsáno v předchozím odstavci) a vydělí se rychlostí a měří se v J/kg/m. Náklady na dopravu si můžete představit jako energii, kterou stojí uběhnutí jednoho metru nebo míle při dané rychlosti; je to v podstatě obrácená hodnota kilometrů na galon u automobilu.

6 Jaký ukazatel je pro běžce nejvýznamnější?

6.1 Metabolický význam

Lidé se většinou podvědomě rozhodnou pohybovat tak, aby minimalizovali spotřebu metabolické energie. Lidé používají délku kroku (Hogberg, 1952; Snyder a Farley, 2011), šířku kroku (Donelan, 2001; Arellano a Kram, 2011), frekvenci kroku (Hogberg, 1952; Snyder a Farley, 2011), rychlost (Inman et al., 1981) a chůzi (Cavagna et al., 1987), které minimalizují metabolické proměnné, i když někdy záleží na rychlosti metabolismu (energie/čas) a někdy na nákladech (energie/vzdálenost).

Metabolický energetický výdej je také dominantním faktorem určujícím výkonnost ve vytrvalostních běžeckých závodech a kritickým prvkem optimalizace tréninku (Noakes, 2003; Daniels, 2013). Při závodech je cílem mít v cíli minimum energie, předtím nevyhořet a po doběhu jí nezbývat mnoho. Abyste toho dosáhli efektivně, chcete mít co nejvíce



Obrázek 5: Graf závislosti frekvence kroku na metabolických nákladech převzatý z (Snyder a Farley, 2011) ukazuje, jak lidé využívají metabolickou rychlost/náklady k optimalizaci své běžecké formy. Všimněte si, že vzhledem k tomu, že všechna tato data byla shromážděna při rychlosti 2,8 m/s, je přibližně parabolický tvar stejný pro frekvenci kroku v závislosti na rychlosti/výkonu metabolismu.

co nejlépe odhadnout, kolik metabolické energie vaše tělo spotřebuje v každém bodě závodu. Většina běžců v podstatě od výkonového čísla požaduje lepší odhad úsilí, než mohou určit sami, a způsob, jak tuto hodnotu zaznamenávat v průběhu času. Díky co nejlepšímu odhadu metabolického výkonu se běžci mohou vědomě rozhodovat na základě údajů, které jejich tělo již podvědomě používá.

6.2 Využitelnost dalších metrik

Ačkoli se metabolický výkon za daných podmínek blíží, neexistuje jediná stříbrná kulka pro měření efektivity běhu. Cyklisté používají rychlejší než metabolicky optimální kadenci a platí malou metabolickou cenu, aby se vyhnuli velkým svalovým a šlachovým silám (Etterna a Lornas, 2009). Při některých sjezdech a dalších činnostech pohlcujících energii se zdá, že svalové momenty nebo jiné míry jsou také více určujícím faktorem pro to, jaký způsob je optimální použít, než metabolická síla (Dean, 2013). Vyhnutí se zranění může převážit nad minimalizací úsilí.

6.3 Jaké je řešení?

Protože žádná metrika zcela nevystihuje efektivitu běhu za všech podmínek, je důležité shromáždit během tréninku co nejvíce přesných, správných a užitečných biomechanických a fyziologických údajů, jak je to jen možné. Pak je nutné sdílet pro běžce nejužitečnější metriku (metriky) téměř v reálném čase a také stanovit hodnoty dalších užitečných metrik pro pozdější použití spolu s návody na interpretaci jejich významu. Bylo by ideální mít možnost měřit spotřebu kyslíku přímo během tréninku, ale v

současné době, i kdyby to bylo af-

broditelný, je nepraktické, ne-li nemožné, běhat s přenosným metabolickým systémem každý den. Navíc, i kdyby to bylo praktické, rychlost metabolismu by se aktualizovala pouze při každém nádechu plus doba zpracování a nezachycovala by anaerobní metabolismus. Zařízení pro měření srdeční frekvence jsou nositelná a nabízejí běžně používanou metriku, ale srdeční frekvence pomalu odráží změnu metabolických požadavků a může být také ovlivněna stresem, imunitní reakcí a dalšími faktory, které nesouvisejí s okamžitou metabolickou potřebou. Všimněte si, že okamžitou metabolickou potřebu definujeme jako metabolický výkon způsobený aerobními a anaerobními zdroji, podobně jako potřebu kyslíku v (Gløersen, 2019). V současné době je nejlepší možností mít k dispozici nositelný de- vič, který nabízí přesný a přesný korelát okamžité metabolické spotřeby v čase blízkém reálnému, ale také určuje další metriky, biomechanické a fyziologické, pro analýzu po běhu.

7 Závěr

Základním účelem tohoto dokumentu je definovat různé typy běžícího výkonu, modely používané k jejich odhadu a diskutovat o užitečnosti jednotlivých měr výkonu. Při běhu existují dva základní typy výkonu: mechanický výkon (energie, kterou tělo vynakládá na okolí a na pohyb končetin za sekundu) a metabolický výkon (energie spotřebovaná tělem za sekundu). Každý z nich lze modelovat s různou mírou přesnosti/přesnosti v závislosti na údajích a předpokladech použitých k sestavení modelu. Otázka, kterou hodnotu použít, se v zásadě odvíjí od užitečnosti. Který ukazatel je nejužitečnější pro běžecký výkon u různých lidí, běžeckých podmínek a podmínek prostředí? Pokud chcete použít jedno číslo výkonu k odhadu námahy a určení tempa, existuje převaha důkazů, které ukazují, že vaše tělo již v základu používá metabolický výkon/náklad, přesněji řečeno okamžitou metabolickou potřebu, která postrádá časové zpoždění metabolického výkonu. Vědomé uvědomění si metriky, kterou vaše tělo podvědomě používá, vám může pomoci při rozhodování o optimalizaci tréninku a výkonu.

Odkazy

[1] P´eronnet, F. a Massicotte, D. (1991). Tabulka neproteinového respiračního kvocientu: aktualizace. *Canadian Journal of Sport Sciences = Journal Canadien des Sciences du Sport,*, *16 1*, 23-9.

[2] Ettema, G., a Lor˚as, H. W. (2009). Efektivita v cyklistice: pˇrehled. *European Journal of Applied Physiology, 106* (1), 1-14.

[3] Hogberg, P. (1952). Jak délka kroku a frekvence kroku ovlivňují energetický výdej při běhu?. *Arbeitsphysiologie 14*, 437-441.

[4] Snyder, K. L. a Farley, C. T. (2011). Energeticky optimální frekvence kroků při běhu: vliv sklonu a poklesu. *Journal of Experimental Biology, 214* (12) 2089-2095.

[5] Donelan, J. M., Kram, R., and Kuo, A. D. (2001) Mechanické a metabolické determinanty preferované šířky kroku při lidské chůzi. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 268* (1480), 1985-1992.

[6] Arellano, C. J. a Kram, R. (2011). Vliv šířky kroku a švihu paží na energetické náklady a boční rovnováhu při běhu. *Journal of Biomechanics, 44* (7), 1291-1295.

[7] Inman, V.E., Ralston a Todd. (1981). Human Walking. Williams and Wilkins, Baltimore.

[8] Cavagna, G. A., a Kaneko, M. (1977) Mechanická práce a efektivita při chůzi a běhu po rovině. *The Journal of Physiology, 268* (2), 467-481.

[9] Dean, J. C. (2013). Proprioceptivní zpětná vazba a preferované vzorce lidského pohybu. *Exercise and Sport Sciences Reviews, 41* (1), 36.

[10] Tim Noakes. (2003) The Lore of Running. Human Kinetics, Champaign, IL.

[11] Jack Daniels (2013) Daniels' Running Formula Human Kinetics, Champaign, IL.

[12]Gløersen, O. N. Gilgien, M. Dysthe, D.K. Malthe-Sørenssen, A. Losnegard, T. J. Oxygen Demand, Uptake, and Deficits in Elite Cross-country Skiiers during a 15 km Race *Medicine and Science in Sports and Exercise (Lékařství a věda ve sportu a cvičení)*