

Teksti: PEKKA MATOMÄKI

Liikkumisen taloudellisuus on monen tekijän summa

Liikkumisen taloudellisuuden mittarina käytetään energiankulutusta kuljettua matkaa kohti.

Tiedämme myös, että taloudellisuus paranee harjoittelulla. Mutta ovatko nämä asiat näin selkeitä?

Liikkumisen taloudellisuus on eräs tärkeimmistä kestävyysuorituskykyä selittävistä tekijöistä maksimaalisen hapenottokyvyn ja anaerobisen kynnyksen lisäksi. Siksi sen optimoiminen ja tutkiminen ovat olennaisia asioita urheiluharjoittelussa.

Urheilu-uorituskyvyn lisäksi taloudellisuudella voidaan verrata ihmisten (ja eläinten) erilaisia liikkumismuotoja keskenään yrittäessä selvittää eri liikkumismuotojen energiatehokkuuksia. Tämä on jo itsessään mielenkiintoista, mutta lisäksi se paljastaa ihmisen eri liikkumisten erityisominaisuuksia, kuten elastisuuden käyttöä. Tässä artikkelissa käydään läpi mekanismeja taloudellisuuden taustalla ja selvitetään, mitä tämä paljon puhuttu ja kaikkien tuntema taloudellisuus itse asiassa pitää sisällään.

”Kaikkihan” tietävät, että taloudellisuus on energiankulutusta kuljettua matkaa kohti. Mutta onko

Kuva: GORILLAWAVE BREAK MEDIA



tälle vaihtoehtoja? Ja miksi tähän määritelmään on päädytty? Edempänä nostetaan esille, ettei energiankulutus sen paremmin kuin nykyisin käytettävä taloudellisuuden määritelmäkään ole selviö, vaan ennemminkin paras olemassa olevista vaihtoehdoista.

Yleinen tieto on myös, että taloudellisuus kehittyy harjoittelulla. Ja niinhän se kehittyykin. Mutta miksi se kehittyy? Paraneeko se itsestään (itseoptimoituminen) suljetussa kopissa harjoitellessa vai pitääkö turvautua valmentajan neuvoihin? Tullaan näkemään, että harjoittelun seurauksena keho pyrkii itsenäisesti itseoptimoimaan liikkumista. Ja tässä optimoinnissa se yhdistelee yksilöllisessä suhteessa muun muassa energiankulutuksen, vammriskin ja lihasväsymyksen minimointia. Itseoptimoituminen toimii tiettyyn pisteeseen saakka, mutta parhaimpaan lopputulokseen päästäkseen voidaan tarvita ulkopuolistakin apua.

Mitä on energiankulutus?

Taloudellisuus on liikkumisen energiankulutus kuljettua matkaa kohti. Sehän on selvä. Vai onko? Ensimmäinen ongelma kohdataan jo siinä mitä tarkoi-

tetaan liikkumisen energiankulutuksella. Useimmiten se mielletään kehon ruoasta saaduksi, liikkumisen aikaiseksi kokonaisenergiankulutukseksi. Mutta tätä tulkintaa käytettäessä voitaisiin kysyä tulisiko kulutettuun kokonaisenergiaan laskea mukaan myös se energiankulutus, joka on käytettykun ruoka on pureskeltu, nielty, pilkottu ja kuljetettu energiavaraostoihin? Ilman näitä ”esitoimenpiteitä” kun ei liikkumisessa voitaisi energiaa tuottaa. Näitä ei yleensä kuitenkaan oteta huomioon; tuntuisihan se hieman erikoiselta, jos juoksijan taloudellisuus paranisi sillä, että hän opettelisi tehokkaamman tavan pureskella makaronia.

Vaikeampi kysymys on, tulisiko kokonaisenergiankulutuksessa huomioida myös potentiaalisesti hyvinkin kuormittavan liikkumisen jälkeinen ylimääräinen, takaisin lepotilaan pääsemiseen tarvittava energiankulutus, niin sanottu EPOC eli *excess post exercis eoxygen consumption*? Voitaisiinkin nähdä, että etenkin raskas liikkuminen käyttäisi hieman lainaenergiaa, jota maksetaan takaisin EPOC-muodossa liikkumisen jälkeen. Toinen perustelu EPOCin huomioimiselle on se, että palautuminen urheilusuorituksesta on hyvin olennainen osa liikuntaa ja liikkumista ja se potentiaalisesti paranee harjoittelulla. Varhaisissa tutkimuksissa EPOC laskettiin

TAULUKKO 1. Eri liikkumismuotojen kokonaisenergiankulutuksia liikuteltavaan massa suhteutettuna kilometriä kohti.

Liikkumismuoto	Nopeus (km/h)	Kuvaus	Energiankulutus (kcal/kg/km)
Konttaus	2,3		2,9
Uinti	3,6	Krooli, kokeneet uimarit	1,6
Uinti	3,6	Rintauinti, kokeneet uimarit	3,9
Juoksu	8 – 16		1,0
Kävely	4 – 5		0,7
Luistelu	20	Jäähallissa	0,6
Hiihto	7	Hiihtopotkessa, suksimalli vuodelta 1300, kuntoilijat	0,9
Hiihto	16	Perinteinen tyyli, hiihtopotkessa, suksimalli vuodelta 2004, kuntoilijat	0,5
Hiihto	16	Vapaahiihto, hiihtopotkessa, suksimalli vuodelta 2004, kuntoilijat	0,45
Pyörätuoli	5	Koripallokentällä	0,4
Pyöräily	21	”HighWheeler”-pyörä vuodelta 1870	0,25
Pyöräily	21	Kilpapyörä vuodelta 1980	0,17
Moottoroituja			
Farmariauto	80	2000 -luvulta	0,3
Suihkulentokone	950	Boieng777-200-IGW vuodelta 1997	0,4
Juna	110	Pendolino ja dieselveturi	0,06

Lähteet: (Wilson 1973; Sparrow & Newell 1994; Sparrow ym. 2000; Minetti ym. 2001; Hall ym. 2004; Ardigo ym. 2005; Formenti ym. 2005; Barbosa ym. 2006). Muunnoksissa on käytetty ekvivalenttia, jossa 1 L/min hapenkulutus vastaa 4,92 kcal/min energiankulutusta. Autolla on oletettu 1 kg polttoainetta vastaavan 10300 kcal/min energiankulutusta ja auton painoksi on otettu 1500 kg ja matkakulutukseksi 6,0 l/100 km.

mukaan taloudellisuutta selvitettyä. Nykyään tätä lähestymistä ei kuitenkaan enää suosita. Tuntuishan se jälleen hieman erikoiselta, jos juoksijan taloudellisuus parani sillä, että juoksun aiheuttamat lihasvauriot korjautuisivat tehokkaammin.

Kokonaisenergiankulutus liikkumisessa ei ole kovin yksiselitteistä, koska ihmiskeho ei ole suljettu systeemi vaan sen energiakierto on riippuvainen niin menneisyydestä kuin tulevaisuudestakin. Kuitenkin, niin tässä artikkelissa kuin useimmissa muissakin, liikkumisen kokonaisenergiankulutusta tarkasteltaessa huomioidaan vain akuutti nykytilan energiankulutus.

Taloudellisuuden mittarina energiankulutus

Seuraava pohdittava asia on, miten energiankulutus ja kuljettu matka otetaan huomioon. Käytännössä nykyään käytetään kokonaisenergiankulutusta minuuttia tai kuljettua kilometriä kohti. Yleensä tämä vielä kirjataan painokiloon suhteutettuna (joko kcal/kg/km tai kcal/kg/min). Näistä perustelluin taloudellisuuden mittari, etenkin eri liikkumismuotoja vertailtaessa, lienee painoon ja matkaan suhteutettu energiankulutus (kcal/kg/km), varsinkin jos ajatellaan liikkumista päämääräkohtaisena (Sparrow & Newell 1998): paljonko yksilö joutuu kuluttamaan energiaa liikuttamaansa massaa kohden päästäkseen määränpäähänsä. Maltillisissa kuormituksissa energiankulutus voidaan korvata hapenkulutuksella, koska lähes kaikki energia tuotetaan hapen avulla.

Taulukkoon 1 on merkitty eri liikkumismuotojen taloudellisuuksia. Vaihteluväli on suhteellisen suurta – pyöräilyn noin 0,2 kcal/kg/km arvosta konttaamisen 2,9 kcal/kg/km arvoon. Lisäksi näemme, että pyöräily on ollut jo 1800-luvulta saakka energiatehokkain tapa liikkua omin voimin, ja että uinti ei ole ihmisille kovin energiatehokas liikkumismuoto. Lisäksi uinti on vahvasti tekniikkalaji; eri yksilöiden välinen ero taloudellisuudessa voi olla yli 200 prosenttia (Sparrow 2000). Juoksu on taas siitä mielenkiintoinen tapaus, että sen taloudellisuus pysyy jotakuinkin muuttumattomana eri nopeuksilla; 9 km/h nopeudella juoksun energiankulutus kilometriä kohti on sama kuin 14 km/h nopeudella. Hiihto taas on vahvasti välinelaji. Ladulla hiihdettyä historiallisilla, 700 vuotta sitten käytetyillä, suksilla energiankulutus oli noin kaksinkertainen nykypäivän suksiin verrattuna. Tosin tämä ei anna

oikeutta historiallisille suksille, joiden optimaalisen toimintaympäristö lienee umpihanki. Lopuksi huomautettakoon, että junan pienen kulutuksen selittää sen suuri massa ja pieni liikkumiskitka.

Vaihtoehtoja taloudellisuudelle?

Vaikka edellä esitelty energiankulutuksellinen tapa ilmoittaa taloudellisuus on yleisesti käytetty, se ei tarkoita, etteikö vaihtoehtoisia tapoja olisi.

Taloudellisuuden monimuotoisuutta ja sopimuksellisuutta voi esitellä nostamalla tarkasteluun vaihtoehto nimeltään kokonaishyötysuhde, joka laskeaan kaavalla W/E_{kok} , jossa tehty mekaaninen työ W jaetaan kokonaisenergiankulutuksella E_{kok} . Tämä on puhdas prosenttiluku ja se kertoo periaatteessa kuinka hyvällä hyötysuhteella ihminen muuntaa käyttämänsä energian liikkumiseen, vastaavalla tavalla kuin auton hyötysuhde kertoo kuinka hyvin moottori muuttaa bensa energianauton liikkumisenergiaksi. Se kuulostaa hyvältä, helpolta ja ilmeiseltä tavalta arvioida liikkumisen tehokkuutta, muttasesisältää monin paikoin vaikeita ongelmia.

Kaksi seikkaa puhuu hyötysuhdetta vastaan. Ensinnäkin, hyötysuhteen mekaaninen työ on vaikea laskea tarkasti monissa liikkumisen muodoissa. Esimerkiksi juoksussa tarvitaan hidasliikekamera, jolla mekaanista työtä laskettaessa rekisteröidään jokaisella juoksuaskeleella painonpisteen vertikaaliheilauksesta seuraava niin sanotun ulkoisen työn määrä ja lisäksi raajojen liikkumisesta aiheutuva niin sanotun sisäisen työn määrä. Käytännössä sisäisen työn määrittäminen jätetään toisinaan kokonaan laskematta.

Toisekseen, hyötysuhde saattaa vääristää liikkumiseen käytettävää energiankulutusta. Esimerkiksi kokonaishyötysuhde pyöräilylle on 20–30 prosenttia (Tokui & Hirakoba 2007), kävelyllä 30–40 prosenttia (Cavagna & Kaneko 1977) ja juoksulle 40–50 prosenttia (Cavagna ym. 1964). Näistä luvuista voitaisiin päätellä juoksun olevan kolmesta luetelluista etenemistavoista energiatehokkain pyöräilyn ollessa tehottomin. Kuitenkin, järjestys näiden liikkumismuotojen energiankulutuksissa matkaan suhteutettuna (Taulukko 1) onkin päinvastainen. Kumpi mittari on oikeassa?

Eräs selitys tälle näennäiselle ristiriidalle on se, että hyötysuhdetarkastelu ei ota huomioon varsinaisesti etenemiseen vaikuttavia komponentteja, vaan

Harjoitus hioo tekniikkaa. Tuloksena on itselle räätälöitynyt oma yksilöllinen liikkumistapa, jonka optimoinnissa on painotettu mm. energiankulutusta, vammautumisariskia ja lihasväsymystä.

Kävely vaihtuu juoksuksi siinä vauhdissa, jossa kävelyn energiankulutus kasvaa yhtä suureksi kuin juoksun.

siinä tarkastellaan yksinomaan mekaanista työtä. Esimerkiksi paikallaan hyppelyn hyötösuhde voi olla yli 40 prosenttia (Kyröläinen ym. 2004), koska siinä, kuten juostessakin, lihasten sisäiset elastiset komponentit varastoivat alas tultaessa energiaa antaakseen sitä jälleen käyttöön hypyn ylösnousuvaiheessa. Siitä huolimatta paikallaan hyppely ei ole ymmärrettävästi kovin energiatehokas tapa etenemiseen kauppatkoille. Edelleen, pyöräilyn kokonaishyötösuhde itsessään on pieni verrattuna juoksun vastaavaan, koska polkemistyössä ei lihasten elastisia komponentteja juurikaan hyödynnetä. Toisaalta siinä lähes kaikki tuotettu mekaaninen energia suuntautuu pyörän ketjujen välityksellä etenemisliikkeeksi ja on siten kauppatkalle hyvin energiatehokas vaihtoehto. Kun lisäksi polkupyöräilyssä ulkoinen työ on helppo mitata poljetusta tehosta, on kokonaishyötösuhde itse asiassa hyvinkin mielekäs käytettävä polkupyöräilytyössä. Ja tosiaan, useimmissa polkupyöräilytutkimuksissa hyötösuhdetta käytetäänkin huomattavasti enemmän kuin energiankulutusta minuuttia kohti. Nähdään siis, että vaikka energiankulutuksellinen tapa on hyväksi todettu yleisenä mittarina, lajikohtaisesti voidaan löytää muitakin vähintään yhtä perusteltuja tapoja.

Miksi taloudellisuus paranee harjoittelulla?

Useat tutkimukset ovat osoittaneet sen intuitiivisesti selvän asian, että harjoittelu parantaa liikkumisen taloudellisuutta. Mutta voidaan sanoa mitkä mekanismit johtavat tähän?

Erityisesti harjoittelun alkuvaiheessa taloudellisuuden kehitys on korostunut. Lajia ennen harrastamattomille onkin havaittu huomattavia parannuksia taloudellisuudessa pienessä ajassa: soudussa kymmenen harjoituskerran jälkeen +9 prosenttia (Lay ym. 2002), juoksussa noin 20 harjoituskerran jälkeen +8 prosenttia (Moore ym. 2012), konttaamisessa 18 harjoituskerran jälkeen +13 prosenttia (Sparrow & Newell 1994) ja pyöräilyssä 18 harjoituskerran jälkeen +11 prosenttia (Hintzy ym. 2005).

Eri lajeissa voidaan aina löytää yksityiskohtaisia syitä siitä, mikä lajispesifisessä tekniikassa ja fysiologiassa on muuttunut harjoittelun myötä. Niiden lisäksi voidaan pohtia myös laajempia syitä sille miksi

harjoittelu johtaa parempaan taloudellisuuteen. Eräs tällainen on *minimiperiaate*, jonka mukaan harjoittellessaan yksilö pyrkii nimenomaisesti pääsemään liikkeissään minimaaliseen energiankulutukseen. Tai ehkä ennemminkin keho, yksilön tietoisuudesta riippumatta, pyrkii tähän. Toinen teoria on stabiilisuusajattelu; harjoittellessa opitaan liikkeeseen stabiilimpi liikerata, joka johtaa parempaan taloudellisuuteen. Eli tämän ajatuksen mukaan harjoittellessa motorinen taito liikkeessä kehittyy, jolloin parempi taloudellisuus tulisi ikään kuin sivutuotteena. Muitakin ehdotettuja teorioita on, ja ne pohjautuvat esimerkiksi mukavuuden maksimointiin (tai mielletyn ponnistelun, *rated perceived exertion* RPE, minimoimiseen) ja minimaaliseen nivelten vääntömomenttien muutokseen. (Sparrow & Newell 1998).

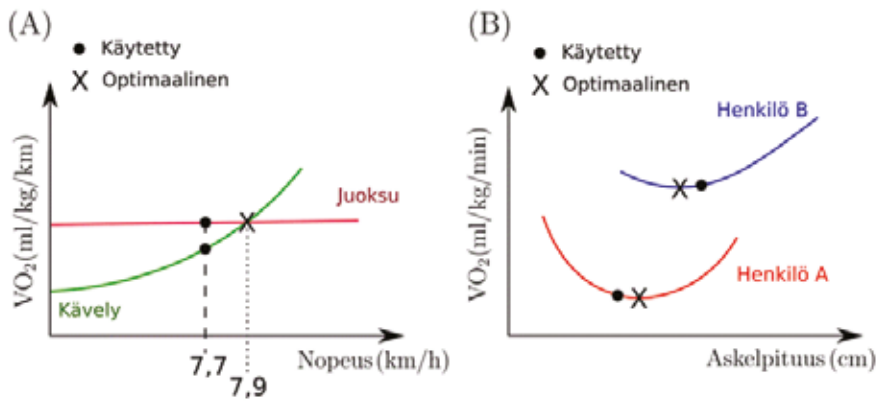
Näistä teorioista minimiperiaate ja stabiilisuusajattelu näkyvät korostuneimmin tutkimuksissa. Esimerkiksi Lay ym. (2002) näyttivät miten kymmenen harjoituskertaa riitti tuottamaan muutoksia soutamistekniikassa lajia ennen harjoittamattomille: tuotettu huippuvoima pysyi tasaisempaan vedosta toiseen, soudun koordinaatio oli hallitumpaa ja lihasten aktivaatio (EMG) oli pienempää ollen merkkinä tehokkaammasta lihasrekrytoitavasta. Sanalla sanoen, soutuliike oli harjoittelun jälkeen stabiilimpaa ja taloudellisempaa – kumpi onkaan sitten seurausta kummasta.

Minimiperiaate ja stabiilisuusajattelu antavat myös selitysmalleja muuhinkin käytännön kysymyksiin. Esimerkkinä tästä on liikkumisen koordinaation muutos vauhdin kasvaessa (Sparrow ym. 2000). Ihmiset (ja eläimet) vaihtavat luonnostaan kävelystä juoksuksi hyvinkin tarkkaan siinä vauhdissa, jossa kävelyn energiankulutus (kcal/kg/km) kasvaa yhtä suureksi kuin juoksun, ks. kuva 1(A). Minimiperiaate ennustaisikin näin tapahtuvan, koska keho haluaa minimoida energiankulutuksen. Myös stabiilisuusajattelu sopii selitykseksi liikkumistavan vaihdolle: kävelyssä koettu stabiilisuus heikkenee nopeuden kasvaessa liian suureksi ja ihminen siirtyy juoksuun, jossa hän tuntee stabiilisuuden olevan parempi.

Itseoptimoitumalla parasta taloudellisuutta?

Yleisesti sanotaan, että juoksun taloudellisuus paranee juoksemalla. Minimiperiaatekin tukee tätä ho-

**Pyöräily on ollut jo 1800-luvulta saakka
energiatehokkain tapa liikkua omin voimin.**



KUVA 1. (A) Kävelyn ja juoksun hapenkulutuskäyrät sekä vaihtonopeus jolloin vaihdetaan kävelystä juoksuun: minimiperiaatteen ennustama nopeus (X) ja tutkittavien suosima nopeus (•). Mukailten artikkelista (Brisswalter & Mottet 1996). (B) Askelpituuden vaikutus juoksun hapenkulutukseen kahdella henkilöllä, sekä taloudellisesti optimaalinen (X) ja henkilön suosima (•) askelpituus. Nähdään, että luonnollisesti käytetty askelpituus on hyvin lähellä taloudellisinta. Mukailten artikkelista (Cavanagh & Williams 1982).

kemaa; keho pyrkii minimoimaan energiankulutuksen harjoittelun seurauksena. Tähän liittyy vahvasti niin sanottu *itseoptimoituminen*. Tällä viitataan siihen kuinka yksilöt hienosäätävät ja muokkaavat liikumisensa mekaniikkaa harjoittelun edetessä optimoidumpaan suuntaan ilman ulkopuolisia ohjeita tai mallioppimista (Sparrow & Newell 1998). Ei tiedetä loppuuko tällainen prosessi tietyn harjoittelumäärän jälkeen vai jatkuuko se määrättömän kauan. Esimerkiksi Nummela (2017) argumentoi aikuisurheilijoiden tulosparannuksen kestävyysjuoksussa tulevan lähes yksinomaan taloudellisuuden paranemisesta, minkä valossa taloudellisuuden kehittymisen voidaan nähdä olevan jopa päättymätön prosessi.

Itseoptimoituminen ei kuitenkaan tarkoita välttämättä yksinomaan taloudellisuuden optimoimista, vaan mukana voi olla muitakin tekijöitä. Onkin esitetty esimerkiksi, että juoksussa vertikaalisten reaktivoimien väheneminen harjoittelun edetessä voisi johtua vammariikin minimoimisesta ennemmin kuin taloudellisuuden maksimoimisesta (Sparrow & Newell 1998). Pienemmät voimat kun aiheuttavat pienempiä rasituksia niveliin. Edelleen, toisena esimerkkinä, ammattipyöräilijät käyttävät pyöräillessään huomattavasti suurempaa pyöritysnopeutta kuin kuntoilijat. Itse asiassa, he saattavat käyttää jopa 40 prosenttia suurempaa pyöritysnopeutta kuin mikä olisi energiankulutuksellisesti edullisin. Tämä korkea pyöritysnopeus kuitenkin minimoii lihasväsymystä (Tietsuo ym. 1996), ja antaa esimerkin itseoptimoitumisen väsymisen minimoivasta komponentista. Voidaan sanoa, että itseoptimoitumisen tuloksena saadaan itselle räätälöitynyt oma yksilöllinen liikkumistapa, jonka optimoinnissa on painotettu yksilöllisessä suhteessa ainakin energiankulutusta, vammautumiseriskistä ja lihasväsymystä.

Itseoptimoitumisen yhteydessä voitaisiin myös kyseenalaistaa sitä, johtaako se aina parhaimpaan mahdolliseen lopputulokseen. Yleisenä huomiona

tiedetään, että ihminen juoksee ja kävelee sillä askel­tiheydellä ja askelpituudella, joka on hänelle taloudellisin (Cavanagh & Williams 1982), ks. kuva 1(B). Edelleen, taloudellisuus on altis harjoittelun spesifisyydelle siinä missä mikä tahansa muukin ominaisuus. Juoksunkin taloudellisuus kehittyy parhaiten juuri sillä vauhdilla, jolla harjoitellaan (Daniels & Daniels 1992). Näin ollen voitaisiin esittää arvelu, että kävelyn ja juoksun taloudellisuus kehittyy parhaiten juuri niillä askel­tiheyksillä ja askelpituuksilla, joita käytetään. Toisin sanoen, käytetyn askel­tiheyden ja -pituuden taloudellisuus ei olisikaan itseoptimoinnin tulos, vaan seurausta tuon nimenomaisen askel­tiheyden ja -pituuden suuresta käytöstä. Riittäväällä harjoittelulla esimerkiksi pienemmän askelpituuden käyttäminen voisikin lopulta johtaa parempaan taloudellisuuteen.

Niinpä itseoptimointi johtaa varmasti jonkinlaiseen välioptimitilaan, mutta ei välttämättä parhaimpaan optimitilaan, johon päästäkseen voidaan tarvita ulkopuolistakin opastusta. Esimerkiksi kierähdystylin opetellut korkeushyppääjä pärjää todennäköisesti kierähtämällä paremmin kuin kokeillessaan floppausta ensimmäistä kertaa. Siitä huolimatta pitkällä aikavälillä floppauksen opettelu tulisi todennäköisesti olemaan korkeushyppääjälle tehokkaampi hyppytapa, vaikkei hän itseoptimoitumalla siihen olisikaan koskaan edennyt. Vastaavalla tavalla valmentajan neuvot ja opastukset juoksutekniikasta saattavat auttaa kestävyysjuoksijaa parempaan taloudellisuuteen kuin mihin hän yksinään lenkkipoluilla yltäisi.

Monimuotoinen taloudellisuus

Taloudellisuuden tutkimuksen vaikeudesta kertoo se, ettei ole lainkaan tavatonta, että tutkittaessa kymmenienkin fysiologisten ja biomekaanisten teki-

joiden vaikutuksia taloudellisten ja epätaloudellisten liikkujien välillä, ei löydetä lainkaan selittäviä tekijöitä (Lundby ym. 2017). Tämä johtunee siitä, että taloudellisuus on loppujen lopuksi hyvin monien tekijöiden summa. Voisikin sanoa, ettei yhdessäkään liikkumismuodossa ole selkeää ”parasta” liikemallia, vaan jokainen yksilö hioo omaa liikkumistapaansa omanlaiseen suuntaansa ja muokkaa siitä käyttämälleen tekniikalle ”parhaimman”. Tämä voi osaltaan vaikeuttaa eri tekijöiden vaikutuksien tutkimista taloudellisuuteen, kun tutkittavat eivät ole harjoitelleet teoreettisesti ”parasta” liikemallia, jolloin heidän kohdallaan vuosikausia hiottu ”vääränlainen” liike-malli saattaa näyttää hyvinkin taloudelliselta.

PEKKA MATOMÄKI, FT

Tutkijatohtori

Jyväskylän yliopisto

Sähköposti: pmatomaki@gmail.com

LÄHTEET

- Ardigo, L.P., Goosey-Tolfrey, V. L. & Minetti, A. E.** 2005. Bio-mechanics and energetics of basketball wheelchairs evolution, *International Journal of Sports Medicine*, 26(5), 388–396.
- Barbosa, T., Fernandes, T., Keskinen, K. L., Colac, P., Cardoso, C., Silva, J. & Vilas-Boas, J. P.** 2006. Evaluation of the energy expenditure in competitive swimming strokes, *International Journal of Sports Medicine*, 27(11), 894–899.
- Brisswalter, J. & Mottet, D.** 1996. Energy Cost and Stride Duration Variability at Preferred Transition Gait Speed Between Walking and Running, *Canadian Journal of Applied Physiology*, 21(6), 471–480.
- Cavagna, G. A. & Kaneko, M.** 1977. Mechanical work and efficiency in level walking and running, *Journal of Physiology*, 268(3), 467–481.
- Cavagna, G. A., Saibene, F. P. & Margaria, R.** 1964. Mechanical work in running, *Journal of Applied Physiology*, 19, 249–256.
- Cavanagh, P. R. & Williams, K. R.** 1982. The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14(1), 30–35.
- Daniels, J. & Daniels, N.** 1992. Running economy of elite male and elite female runners, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 24(4), 483–489.
- Formenti, F., Ardigo, L. P. & Minetti, A. E.** 2005. Human locomotion on snow: determinants of economy and speed of skiing across the ages., *Proceedings. Biological sciences/The Royal Society*, 272(1572), 1561–1569.
- Hall, C., Figueroa, A., Fernhall, B. & Kanaley J. A.** 2004. Energy expenditure of walking and running: Comparison with prediction equations, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(12), 2128–2134.
- Hintzy, F., Mourot, F., Perrey, S. & Tordi, N.** 2005. Effect of endurance training on different mechanical efficiency indices during submaximal cycling in subjects unaccustomed to cycling, *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30(5), 520–528.
- Kyröläinen, H., Avela, J., McBride, J. M., Koskinen, S., Andersen, J. L., Sipilä, S., Takala, T. E. S. & Komi, P. V.** 2004. Effects of power training on mechanical efficiency in jumping, *European Journal of Applied Physiology*, 91(2–3), 155–159.
- Lay, B. S., Sparrow, W. A., Hughes, K. M. & O’Dwyer, N. J.** 2002. Practice effects on coordination and control, metabolic energy expenditure, and muscle activation, *Human Movement Science*, 21(5–6), 807–830.
- Lundby, C. ym.** 2017. Physiological, biochemical, anthropometric, and biomechanical influences on exercise economy in humans, *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 27(12), 1627–1637.
- Minetti, A. E., Pinkerton, J. & Zamparo, P.** 2001. From bipedalism to bicyclism: evolution in energetics and biomechanics of historic bicycles, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 268, 1351–1360.
- Moore, I. S., Jones, A. M. & Dixon, S. J.** 2012. Mechanisms for improved running economy in beginner runners, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(9), 1756–1763.
- Nummela, A.** 2017. Kestävyyssuorituskykyä suorituksen taloudellisuutta parantamalla, *Liikunta & Tiede*, 54(6), 22–26.
- Sparrow, W. A., Hughes, K. M., Russell, A. P. & Le Rossignol, P. F.** 2000. Movement economy, preferred model and pacing, in Sparrow, W. A. (toim.) *Energetics of human activity*. Champaign (IL): Human Kinetics, 96–123.
- Sparrow, W. A. & Newell, K. M.** 1994. Energy expenditure and motor performance relationships in humans learning a motor task, *Psychophysiology*, 31, 338–346.
- Sparrow, W. & Newell, K.** 1998. Metabolic energy expenditure and the regulation of movement economy, *Psychonomic Bulletin & Review*, 5(2), 173–196.
- Tietsuo, T., Yoshifumi, Y., Takaishi, O. & Toshio, M.** 1996. Optimal pedaling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(12), 1492–1497.
- Tokuji, M. & Hirakoba, K.** 2007. Effect of internal power on muscular efficiency during cycling exercise, *European Journal of Applied Physiology*, 101, 565–570.
- Wilson, Z. Z.** 1973. *Bicycle Technology*, *Scientific American*, 228(3), 81–91.

Juoksun taloudellisuus pysyy jotakuinkin muuttumattomana eri nopeuksilla; 9 km/h nopeudella juoksun energiankulutus kilometriä kohti on sama kuin 14 km/h nopeudella.