

**HAPENKULUTUKSEN JA ASKELMUUTTUJEN YHTEYS PITKÄKESTOISESSA
TASAVAUHTISESSA JUOKSUSSA**

Juho-Pekka Ikonen

Biomekaniikan kandidaatin tutkielma

Liikuntatieteellinen tiedekunta

Jyväskylän yliopisto

Kevät 2024

TIIVISTELMÄ

Ikonen, J. 2024. Hapenkulutuksen ja askelmuuttujien yhteys pitkäkestoisessa tasavauhtisessa juoksussa. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, biomekaniikan kandidaatin tutkielma, 25 s.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, muuttuvatko hapenkulutus ja askelmuuttajat sekä onko hapenkulutuksen ja askelmuuttujien suhteellisen muutoksen välillä yhteys pitkäkestoisessa tasavauhtisessa juoksussa.

Pitkäkestoisessa kestävyysuorituksessa hapenkulutuksen on havaittu kasvavan, kun suoritus on jatkunut pitkään. Hapenkulutuksen kasvun taustalla on monta tekijää kuten aineenvaihdunnalliset muutokset. Juoksun taloudellisuus on yksi ratkaisevista tekijöistä pitkäkestoisissa kestävyysjuoksusuorituksissa. Tässä tutkimuksessa juoksun taloudellisuudella tarkoitetaan hapenkulutusta tietyllä submaksimaalisella juoksunopeudella. Pitkäkestoisen kestävyysuorituksen on havaittu aiheuttavan sentraalista väsymystä, mikä voi vaikuttaa askelmuuttujiin ja heikentää juoksun taloudellisuutta eli lisätä hapenkulutusta.

Tämä tutkimus toteutettiin osana HoDARI- ja RunAI-tutkimusta. Tutkimukseen osallistui 36 kestävyysurheilijaa, joiden harjoittelumäärä oli vähintään 250 tuntia vuodessa. Tutkittavat suorittivat maksimaalisen hapenottokyvyn testin juoksumatolla (VO_{2max} -testi). Yhdestä kahteen päivää VO_{2max} -testin jälkeen tutkittavat juoksivat pitkäkestoisen kestävyystestin, jossa tutkittavat juoksevat 90 minuuttia nopeudella, joka oli 90 % aerobisen kynnyksen nopeudesta. Testiin kuuluu myös viisi kolmen minuutin (5 x 3 min) kuormaa ennen tasavauhtista osuutta ja sen jälkeen. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan ainoastaan pitkäkestoista kestävyystestiä ja sen tasavauhtista osuutta. Tässä tutkimuksessa askelmuuttujista tarkasteltiin askelkontaktin kestoja, askeltiheyttä sekä askelpituutta. Askelmuuttajat arvioitiin kiihtyvyyssensorista saadusta datasta aiemmin kirjallisuudessa esitetyn algoritmin avulla.

Hapenkulutus kasvoi pitkäkestoisen kestävyystestin aikana tilastollisesti merkitsevästi, kun verrattiin 15 ja 90 minuutin kohdalla mitattuja arvoja. ($2,480 \pm 0,507$ vs. $2,551 \pm 0,490$, $p < 0,001$). Askelmuuttujissa havaittiin myös tilastollisesti merkitsevää muutosta. Askelkontaktin kesto lyheni (274 ± 41 ms vs. 265 ± 37 ms, $p < 0,05$), askeltiheys kasvoi (165 ± 6 vs. 166 ± 6 , $p < 0,05$) ja askelpituus lyheni (100 ± 14 cm vs. 99 ± 14 cm, $p < 0,05$). Hapenkulutuksen ja minkään askelmuuttujan muutoksen välillä ei havaittu tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota. Muutokset hapenkulutuksessa ja askelmuuttujissa ovat aiemman kirjallisuuden kanssa yhteneviä. Tämän tutkimuksen johtopäätös on, että kestävyysharjoitelleilla pitkäkestoinen tasavauhtinen juoksu heikentää juoksun taloudellisuutta. Taloudellisuuden heikentymisen taustalla tässä tutkimuksessa eivät ole muutokset askelmuuttujissa vaan muutokset energia-aineenvaihdunnassa.

Asiasanat: hapenkulutus, pitkäkestoinen, askelmuuttajat, väsymys, kiihtyvyyssensori

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

1 JOHDANTO.....	1
2 ASKELMUUTTUJAT PITKÄKESTOISESSA JUOKSUSSA.....	2
2.1 Muutokset askelmuuttujissa pitkäkestoisessa tasavauhtisessa juoksussa.....	2
2.2 Väsymyksen vaikutus askelmuuttujiin	4
3 HAPENKULUTUS PITKÄKESTOISESSA TASAVAUHTISESSA JUOKSUSSA....	6
3.1 Hapenkulutuksen muutos pitkäkestoisen tasavauhtisen suorituksen aikana	6
3.2 Askelmuuttujien vaikutus hapenkulutukseen	8
4 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEEESIT.....	10
5 TUTKIMUSMENETELMÄT	11
5.1 Tutkittavat ja laitteisto	11
5.2 Maksimaalinen hapenottokyvyn testi	13
5.3 Pitkäkestoinen kestävyystesti	13
5.4 Tilastolliset menetelmät.....	14
6 TULOKSET.....	16
7 POHDINTA.....	19
7.1 Askelmuuttujat.....	19
7.2 Hapenkulutus.....	20
7.3 Hapenkulutuksen ja askelmuuttujien välinen yhteys.....	21
7.4 Yhteenveto ja johtopäätökset.....	22
LÄHTEET	23

1 JOHDANTO

Pitkäkestoisten juoksumatkojen kuten maratonin ja puolimaratonin suosio on kasvanut viimeisten vuosien saatossa (Rothschild 2012). Juoksun taloudellisuus on yksi ratkaisevista tekijöistä pitkäkestoisissa juoksuosuuksissa (Hauswirth & Lehénaff 2001). Tässä tutkimuksessa juoksun taloudellisuudella tarkoitetaan juoksun aikaista hapenkulutusta tietyllä submaksimaalisella nopeudella. On havaittu, että pitkäkestoisissa tasavauhtisissa suorituksissa hapenkulutus kasvaa suorituksen edetessä, vaikka intensiteetti pysyy samana (Davies & Thompson 1986; Kyröläinen ym. 2000). Hapenkulutuksen kasvun taustalla on monta tekijää, joista yksi voi olla muutokset askelmuuttujissa. Esimerkiksi askeltiheyden liiallinen kasvu voi vaikuttaa merkittävästi juoksun taloudellisuuteen (Moore 2016). Askelmuuttujien muutosten taustalla voi olla pitkäkestoisen kestävyysosuituksen aiheuttama sentraalinen väsymys, jonka takia hermolihasjärjestelmän toiminta heikkenee (Ament & Verkerke 2009).

Useissa tutkimuksissa on havaittu, että hapenkulutus kasvaa pitkäkestoisen suorituksen aikana, kun hapenkulutusta on mitattu juoksunopeuden ollessa vakio (Davies & Thompson 1986; Dick & Cavanagh 1987; Kyröläinen ym. 2000; Xu & Montgomery 1995). Tutkimuksissa juoksuosuituksen kesto on vaihdellut 90 minuutista (Davies & Thompson 1986) 24 tuntiin (Gimenez ym. 2013). Osassa tutkimuksista hapenkulutuksessa ei ole havaittu muutosta mutta näissä tutkimuksissa hapenkulutusta mitattaessa nopeus ei ole ollut vakio (Billat ym. 2022; Dressendorfer 1991; Schena ym. 2014). Askelmuuttujien muutoksista on myös vaihtelevia havaintoja. Monessa aiemmassa tutkimuksessa on havaittu askeltiheyden kasvua (Kyröläinen ym. 2000; Morin ym. 2011; Place ym. 2004) ja askelpituuden lyhenemistä (Hauswirth ym. 1996; Kyröläinen ym. 2000; Schena ym. 2014). Aiemmassa kirjallisuudessa askelkontaktin keston on havaittu kasvavan (Prigent ym. 2022) ja lyhenevän (Morin ym. 2011). Muutokset askelmuuttujissa eivät siis ole olleet yksiselitteisiä, joten niiden muutosta on tärkeää tutkia lisää.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella, muuttuuko hapenkulutus ja askelmuuttajat kevyessä 90 minuutin kestoisessa tasavauhtisessa suorituksessa juoksumatolla tehtynä sekä onko niiden suhteellisten muutosten välillä yhteyttä. Aiempien tutkimuksien perusteella molemmissa voidaan havaita muutosta, joskaan muuttujien yhteyttä eivät ole aiemmin tutkittu juuri tämän kestoisessa suorituksessa.

2 ASKELMUUTTUJAT PITKÄKESTOISESSA JUOKSUSSA

On yleisesti tiedossa, että kuormituksen aiheuttama väsymys vaikuttaa juoksutekniikkaan. Juoksun tekniikkaa ja biomekaniikkaa tutkiessa voidaan tarkastella esimerkiksi juoksun kontaktivaiheessa maahan kohdistuvia voimia tai nivelkulmien muutoksia. (Apte ym. 2021) Tässä tutkimuksessa juoksun biomekaniikkaa tutkittaessa tarkastellaan askelmuuttujia eli askelkontaktin kestoa, askeltiheydettä ja askelpituudetta. Seuraavissa kappaleissa käsitellään askelmuuttujien muutoksia pitkäkestoisessa tasavauhtisessa juoksussa ja miten juoksun aiheuttama väsymys voi vaikuttaa askelmuuttujiin.

2.1 Muutokset askelmuuttujissa pitkäkestoisessa tasavauhtisessa juoksussa

Askelkontaktin keston muutoksesta on saatu erilaisia tuloksia eri tutkimuksissa. Apten ym. (2021) review-artikkelissa tutkittiin kuormituksen aiheuttaman akuutin väsymyksen vaikutusta juoksun biomekaanisiin muuttujiin kevyessä, raskaassa, uupumukseen asti tehtävissä ja intervallityyppisissä suorituksissa. Kevyet ja raskaat suoritukset olivat pitkäkestoisia suorituksia, joissa energiantuottotapana oli pääsääntöisesti aerobinen energiantuotto. Juoksumatolla juostessa ja kuormituksen tason ollessa raskas, askelkontaktin kestossa havaittiin selvää kasvua, kun taas muulla alustalla juostessa kasvua askelkontaktin kestossa ei havaittu. Kevyissä suorituksissa askelkontaktin kestossa havaittiin selvää kasvua muulla alustalla kuin juoksumatolla tehtynä. (Apte ym. 2021) Prigent ym. (2022) tutkimuksessa terveiltä aikuisilta tutkittiin muun muassa askelkontaktin kestoa tiellä juostun puolimaratonin aikana. Askelkontaktin kesto kasvoi tilastollisesti merkitsevästi, kun verrattiin askelkontaktin kestoa puolimaratonin alussa ja puolivälissä sekä puolimaratonin alussa ja lopussa. Toisaalta Morinin ym. (2011) tutkimuksessa askelkontaktin kesto lyheni tilastollisesti merkitsevästi, kun tutkittavat pyrkivät juoksemaan mahdollisimman pitkän matkan juoksumatolla 24 tunnin aikana. Tämän lisäksi askelkontaktin on myös havaittu pysyvän samana maratonin aikana (Kyröläinen ym. 2000). Myöskään Schena ym. (2014) eivät havainneet muutosta askelkontaktin kestossa. Askelkontaktin keston muutos ei siis todellakaan ole yksiselitteistä tai muutosta ei välttämättä edes havaita ja onkin hyvä tarkastella myös muita askelmuuttujia.

Pitkäkestoisissa juoksusuorituksissa on tarkasteltu myös askeltiheyden ja -pituuden muutosta. Askeltiheys ja -pituus vaikuttavat toisiinsa paljon. Jos askeltiheys kasvaa nopeuden ollessa

vakio, askelpituus lyhenee. Jos taas askelpituus kasvaa nopeuden ollessa vakio, askeltiheys pienenee. (Moore 2016) Schena ym. (2014) havaitsivat tilastollisesti merkitsevää askelpituuden lyhenemistä juoksumatolla juostun 60 kilometrin simuloidun ultramaratonin aikana. Kuitenkaan askeltiheydessä ei havaittu muutosta (Schena ym. 2014). Kyröläisen ym. (2000) tutkimuksessa puolestaan askelpituuden lyhentyessä havaittiin askeltiheyden tilastollisesti merkitsevää kasvua. Askelpituuden ja -tiheyden yhteyttä on havaittu myös muissa tutkimuksissa (Hauswirth ym. 1996; Place ym. 2004). Näissä tutkimuksissa, jotka havaitsivat askelpituuden lyhenemistä, on yhteistä se, ettei askelkontaktin kestossa havaittu tilastollisesti merkitsevää muutosta. On siis selvää, että askelmuuttujissa havaitaan muutosta pitkäkestoisen juoksuosuorituksen aikana mutta on vaikea ennustaa, mitkä muuttujista muuttuvat ja mihin suuntaan.

Juoksualustalla voi myös olla vaikutusta askelmuuttujiin. Van Hoorenin ym. (2020) systemaattisessa review-artikkelissa ja meta-analyysissä tutkittiin, onko juoksumatolla juokseminen verrattavissa muilla alustoilla juoksemiseen, kun tarkastellaan juoksun biomekaanisia muuttujia. Askeltiheydessä ja -pituudessa ei havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa verrattaessa juoksumatolla juoksua muihin alustoihin. Askelkontaktin kesto oli tilastollisesti merkitsevästi pidempi juoksumatolla juostessa verrattuna muihin alustoihin, joskin ero oli hyvin pieni (5 ms). (Van Hooren ym. 2020) Kuitenkaan muuttujien muutosta suorituksen edetessä ei tarkkailtu. Tutkimuksissa juoksualusta ja tulokset ovat vaihdelleet (taulukko 1).

Taulukosta 1 nähdään, että juoksumatolla juostessa askelstiheys on kasvanut suorituksen edetessä yhtä tutkimusta lukuun ottamatta. Tutkimuksia, joissa on juostu muulla kuin juoksumatolla on vain kaksi, joten niiden perusteella on vaikea sanoa askelmuuttujien muutoksesta. Aiempien tutkimustulosten perusteella olisi houkuttelevaa ajatella, ettei juoksualusta vaikuta askelmuuttujien muutokseen pitkäkestoisessa juoksusuorituksessa.

Taulukko 1. Askelmuuttujien muutokset eri tutkimuksissa eri alustoilla.

Tutkimus	Alusta	Askelkontaktin kesto	Askelpituus	Askelstiheys
Davies & Thompson (1986)	JM	-	-	ei muutosta
Kyröläinen ym. (2000)	JM	ei muutosta	lyheni	kasvoi
Morin ym. (2011)	JM	lyheni	-	kasvoi
Place ym. (2004)	JM	-	-	kasvoi
Schena ym. (2014)	JM	ei muutosta	lyheni	ei muutosta
Hausswirth ym. (1996)	MA	-	lyheni	-
Prigent ym. (2022)	MA	kasvoi	-	-

JM = juoksumatto, MA = muu alusta,

2.2 Väsymyksen vaikutus askelmuuttujiin

Fyysisen kuormitus aiheuttama väsymisen tunne voi tarkoittaa, että jostain syystä saman intensiteetin ylläpitäminen tarvitsee voimakkaampaa neuraalista ohjausta, jota voidaan havaita esimerkiksi elektromyografialla. Väsymisen tunne ja voimakkaamman hermostollisen ohjauksen tarve johtuu perifeerisestä ja/tai sentraalisesta väsymisestä. (Ament & Verkerke 2009) Pitkäkestoisen kestävyysuorituksen ajatellaan aiheuttavan sentraalista väsymystä, kun taas lyhytkestoiset ja kovemalla intensiteetillä tehdyt suorituksen aiheuttavat perifeeristä väsymistä (Apte ym. 2021). Perifeerisessä väsymisessä lihaksen kyky supistua on heikentynyt, mikä voi johtua liiallisesta aineenvaihdunnallisten aineiden kertymisestä lihakseen estäen esimerkiksi aktiopotentiaalin etenemisen lihaksessa. Sentraalisessa väsymisessä väsyminen aiheuttaa muutoksia itse hermostoon, jolloin aktiopotentiaalin eteneminen aivoista lihakseen häiriintyy. Aktiopotentiaalin eteneminen lihakseen voi häiriintyä esimerkiksi tyypin III ja IV hermosolujen aktivoitumisesta. (Ament & Verkerke 2009) Nämä hermosolut voivat aktivoitua

esimerkiksi kuormituksen aiheuttamien lihasvaurioiden yhteydessä esiintyvistä proteiineista ja rasvahapoista. (Kniffki ym. 1978; Rotto & Kaufman 1988).

Juoksussa voidaan lihasten ja jänteiden avulla askelkontaktin aikana absorboida ja vapauttaa energiaa, jota kutsutaan elastiseksi energiaksi. Elastista energiaa varastoidaan askelkontaktin alkuvaiheessa jalan iskeytyessä maahan. Ponnistusvaiheessa kehon massan liikuttamiseen tarvittava energia saadaan lihasten supistumisesta sekä vapautettavasta elastisesta energiasta. Juoksun aiheuttaman akuutin väsymyksen seurauksena pohjelihasten ja jänteiden kyky absorboida elastista energiaa askelkontaktin aikana heikkenee, jolloin vapautettavaa elastista energiaa ei ole niin paljon eikä siitä voida hyötyä niin paljon ponnistusvaiheessa. Näin ollen, kun elastisen energian määrä laskee ja kokonaisenergia kehon massan liikuttamiseen halutaan pitää samana, täytyy energiaa tuottaa enemmän aktiivisen lihassupistuksen avulla. (Novacheck 1998) Voi olla, että lihasten alentunutta kykyä tuottaa ja sietää kontaktissa jalkaan kohdistuvaa voimaa pyritään kompensoimaan lyhentämällä askelpituutta ja kasvattamalla askeltiheyttä, sillä askeltiheyden kasvaessa askelkontaktin aikana jalkaan kohdistuva suurin voima pienenee (Morin ym. 2011). Myös Kyröläisen ym. (2000) mukaan askeltiheyden kasvaminen voi olla keino kompensoida hermolihäsjärjestelmän toiminnan heikentymistä. Väsymisen myötä voimantuottoaika askelkontaktin aikana pitenee, mikä voi myös johtua hermolihäsjärjestelmän heikentyneestä toiminnasta (Winter ym. 2017). Tämä voi mahdollisesti pidentää askelkontaktin kestoa (Apte ym. 2021). Aiemman kirjallisuuden perusteella on kuitenkin houkuttelevampaa sanoa, että väsymisen myötä nimenomaan juoksumatolla tasavauhtisessa suorituksessa askeltiheys kasvaa, askelpituus lyhenee ja askelkontaktin kesto pysyy samana tai lyhenee juoksun aiheuttaman akuutin väsymisen seurauksena.

3 HAPENKULUTUS PITKÄKESTOISESSA TASAVAUHTISESSA JUOKSUSSA

Pitkäkestoisissa suorituksissa hapenkulutuksen on havaittu kasvavan suorituksen edetessä. (Davies & Thompson 1986; Kyröläinen ym. 2000; Xu & Montgomery 1995). Hapenkulutuksen kasvun taustalla ei ole yhtä tiettyä tekijää. Muutokset energia-aineenvaihdunnassa sekä jalan lihasten väsyminen voivat olla eräitä syitä hapenkulutuksen kasvuun (Davies & Thompson 1986). Väsyminen voi johtaa juoksutekniikan muuttumiseen, mikä voi nostaa hapenkulutusta (Moore 2016). Tässä luvussa käsitellään aiempaa tutkimusnäyttöä hapenkulutuksesta pitkäkestoisissa juoksusuorituksissa sekä miten muutokset askelmuuttujissa voivat vaikuttaa hapenkulutukseen.

3.1 Hapenkulutuksen muutos pitkäkestoisen tasavauhtisen suorituksen aikana

Pitkäkestoisen tasavauhtisen suorituksen alkaessa hapenkulutus kasvaa nopeasti. Hapenkulutus tasaantuu saavuttaessaan kuormitukseen vaadittavan tason muutaman minuutin aikana ja perinteisesti ajateltuna hapenkulutus pysyy samalla tasolla kuormituksen tason ollessa kevyttä. (Jones ym. 2011) Kuormituksen jatkuessa pitkään hapenkulutuksen on havaittu kasvavan, vaikka kuormituksen intensiteetti pysyy samana. (Davies & Thompson 1986; Dick & Cavanagh 1987; Kyröläinen ym. 2000)

Jo 90 minuutin kestoisen tasavauhtisen juoksusuorituksen jälkeen hapenkulutus oli kasvanut tilastollisesti merkitsevästi verrattuna hapenkulutukseen ennen 90 minuutin tasavauhtista juoksusuoritusta. (Xu & Montgomery 1995) Samankaltaisia havaintoja hapenkulutuksen kasvusta tasavauhtisessa suorituksessa on saatu tutkittaessa hapenkulutusta tasavauhtisen maratonin aikana (Kyröläinen ym. 2000). Kyröläisen ym. (2000) tutkimuksessa seitsemän kokenutta triathlonistia juoksi tasavauhtisen maratonin. Maratonia ennen, maratonin aikana 13 ja 26 kilometrin kohdalla sekä maratonin lopussa tutkittavat juoksivat viisi minuuttia juoksumatolla samalla vauhdilla kuin maratonissakin ja samalla heiltä mitattiin hapenkulutusta. Hapenkulutus kasvoi tilastollisesti merkitsevästi ensimmäisen ja viimeisen mittauksen välillä (Kyröläinen ym. 2000). On myös havaittu, ettei hapenkulutus tilastollisesti merkitsevästi muuttuisi maratonin aikana (Billat ym. 2022). Kyseisessä tutkimuksessa havainto hapenkulutuksen muuttumattomuudesta voi johtua siitä, että juoksunopeus oli laskenut suorituksen aikana (Billat ym. 2022). Juoksun vaatiman energian ja juoksunopeuden välillä on

havaittu tilastollisesti merkitsevää vahvaa korrelaatiota, (Gimenez ym. 2013), joskaan Billat ym (2022) eivät itse tähän ottaneet kantaa. Simuloidun 60 kilometrin ultramaratonin aikana on saatu samankaltaisia tuloksia hapenkulutuksesta, kun juoksunopeus ollut täysin vakioitu hapenkulutusta mitattaessa. Hapenkulutuksen pysymistä samana perusteltiin myös jatkuvalla ja merkittävällä nopeuden laskulla suorituksen aikana. (Schena ym. 2014). Hapenkulutuksen muutosta tarkkaillessa on siis tärkeää ottaa huomioon juoksunopeus, jotta arvio muutoksesta on luotettava.

Suorituksen kesto näyttäisi vaikuttavan siihen kuinka paljon hapenkulutus kasvaa alkutilanteeseen nähden suorituksen ollessa tasavauhtinen. Gimenezin ym. (2013) tutkimuksessa 12 ultramaratoonaria pyrki juoksemaan mahdollisimman pitkän matkan 24 tunnin aikana juoksumatolla itse säätellessään vauhdilla. Hapenkulutusta mitattaessa nopeus oli vakioitu. Hapenkulutus oli kasvanut tilastollisesti merkitsevästi neljän tunnin kohdalla ja jatkoi kasvua kahdeksan tunnin ajankohtaan saakka. (Gimenez ym. 2013) Myös Daviesin ja Thompsonin (1986) tutkimuksessa hapenkulutuksen kasvu oli lähes lineaarista suorituksen edetessä. Aiemmistä tutkimustuloksista nähdään, että hapenkulutus lähes aina kasvaa pitkäkestoisen kestävyysuorituksen aikana.

Yksi selkeimmin tiedossa olevista tekijöistä hapenkulutuksen kasvun takana on rasvan käytön lisääntyminen energianlähteenä, minkä seurauksena saman energiamäärän tuottamiseen tarvitaan enemmän happea (Davies & Thompson 1986). Aineenvaihdunnan muutoksia voidaan havaita hengityskaasuista hiilidioksidin tuoton ja hapenkulutuksen suhteen (respiratory exchange ratio, RER) avulla. Kun RER on 0,70 elimistö käyttää vain rasvaa energiantuotossa. Jos RER on 1,00 elimistö käyttää vain hiilihydraatteja energiantuottoon. (Nelson ym. 2015) Gimenezin ym. (2013) tutkimuksessa RER oli laskenut tilastollisesti merkitsevästi kahdeksan tunnin aikana verrattuna ennen testiä mitattuun arvoon (0,97 vs. 0,83). Laskun takana on lisääntynyt rasvojen käyttö energianlähteenä (Gimenez ym. 2013). Lisääntynyt rasvojen käyttö energianlähteenä johtuu lisääntyneestä rasvahappojen kuljetuksesta mitokondrioihin tai mitokondrioiden lisääntyneestä aineenvaihdunnasta. Mitokondrioiden tehokkuuden heikentyminen voi myös lisätä hapenkulutusta pitkäkestoisissa kestävyysuorituksissa. Mitokondrioiden tehokkuutta voidaan mitata tuotetun adensiinitrifosfaatin (ATP) ja kulutetun hapen suhteen avulla. (Fernström ym. 2007)

Energia-aineenvaihdunnalliset muutokset eivät yksinään pysty selittämään hapenkulutuksen kasvua, vaikkakin ne ovat yksi siihen vaikuttava tekijä. Suorituksen aikainen hikoilu voi aiheuttaa nestehukkaa, mikä voi näkyä kehon lämpötilan nousuna (Hausswirth & Lehénaff 2001). Nestehukka ja kehon lämpötilan nousu voivat lisätä hapenkulutusta pitkäkestoisen kestävyysuorituksen aikana (Chevront ym. 2010) Suorituksen edetessä myös väsymys voi vaikuttaa heikentäen lihasten taloudellisuutta ja siten lisätä hapenkulutusta. Lihasten väsyminen voi myös vaikuttaa askelmuuttujiin (Apte ym. 2021; Kyröläinen ym. 2000; Prigent ym. 2022). Seuraavassa kappaleessa käsitellään miten askelmuuttujien muutos ja kuormituksen aiheuttama väsymys voi vaikuttaa hapenkulutukseen.

3.2 Askelmuuttujien vaikutus hapenkulutukseen

Hapenkulutuksen muutoksen taustalla pitkäkestoisessa tasavauhtisessa suorituksessa on moni tekijä, joten muutokset juoksun biomekaniikassa kuten askelkontaktin kestossa, voivat selittää vain osan hapenkulutuksen muutoksesta (Kyröläinen ym. 2000). On ehdotettu, että lyhyt askelkontakti kuluttaa paljon energiaa, koska voimaa täytyy tuottaa nopeasti, minkä takia rekrytoitaisiin nopeita, enemmän energiaa kuluttavia lihassoluja. Toisaalta pidemmässä askelkontaktissa voimaa täytyy tuottaa pidemmän aikaa, minkä on myös ajateltu kuluttavan paljon energiaa. On kuitenkin tärkeintä, että askelkontaktin aikana menetetään mahdollisimman vähän nopeutta. (Moore 2016) Askeltiheyden ja askelpituuden muutokset voivat myös vaikuttaa hapenkulutukseen (Kyröläinen ym. 2000). Juoksijat alkavat juosta automaattisesti sellaisella askeltiheydellä ja -pituudella, jotka ovat juoksun taloudellisuuden kannalta optimaalisia (Moore 2016; Schena ym. 2014). Juoksun aiheuttaman akuutin väsymyksen myötä askelmuuttujissa usein havaitaan muutosta (taulukko 1), minkä myötä juoksu voi olla epätaloudellisempaa (Moore 2016). Tästä voisi päätellä, että askelmuuttujilla suorituksen alussa ei välttämättä ole yhteyttä hapenkulutukseen vaan askelmuuttujien muutoksella suorituksen edetessä.

Askelmuuttujien muutos on seurausta kuormituksen aiheuttamasta väsymyksestä, jonka aiheuttamat muutokset hermolihasjärjestelmässä voivat lisätä hapenkulutusta. Väsymyksen myötä elastisen energian hyödyntäminen voi heikentyä, mikä johtaa siihen, että lihakset joutuvat aktiivisella supistumisella tuottamaan enemmän energiaa askelkontaktin aikana (Novachek 1998). Väsymyksen seurauksena saman voiman tuottamiseen täytyy rekrytoida

enemmän lihaksen motorisia yksiköitä, minkä takia hermostollisen ohjauksen määrä kasvaa. On myös ajateltu, että askeltiheyden kasvaessa ja askelpituuden lyhentyessä, lihasten aktiivisuus kasvaa (Kyröläinen ym. 2000). Nämä kaikki ovat tekijöitä, jotka voivat lisätä hapenkulutusta pitkäkestoisen tasavauhtisen kestävyysjuoksusuorituksen aikana. On kuitenkin otettava huomioon, että kevyissä pitkäkestoisissa juoksusuorituksissa väsymys kehittyy hitaasti (Place ym. 2004), joten väsymyksen aiheuttamien muutosten mahdollinen vaikutus hapenkulutukseen kasvaa vasta suorituksen kestäessä pidempään.

4 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESEIT

Tutkimuskysymys 1: Muuttuvatko askelmuuttajat (askelkontaktin kesto, askeltiheys ja askelpituus) pitkäkestoisen tasavauhtisen suorituksen aikana?

Hypoteesi ja perustelut: Kyllä muuttuvat. Askeltiheys kasvaa, askelpituus lyhenee ja askelkontaktin kesto lyhenee. Askeltiheyden kasvua ja askelpituuden lyhenemistä on havaittu muissakin tutkimuksissa (Hauswirth ym. 1996; Kyröläinen ym. 2000; Morin ym. 2011; Schena ym. 2014) Tasavauhtisissa suorituksissa on aiemmin havaittu askelkontaktin keston lyhenevän, kun askeltiheys on kasvanut (Morin ym. 2011).

Tutkimuskysymys 2: Muuttuuko hapenkulutus pitkäkestoisen tasavauhtisen suorituksen aikana?

Hypoteesi ja perustelut: Kyllä, hapenkulutus muuttuu pitkäkestoisen suorituksen aikana. Pitkäkestoisen kestävyysuorituksen aikana rasvojen osuus energianlähteenä kasvaa, minkä tiedetään lisäävän hapenkulutusta. (Davies & Thompson 1986; Fernström ym. 2007) Hapenkulutuksen kasvua pitkäkestoisissa kestävyysuorituksissa on havaittu myös aiemmissa tutkimuksissa (Davies & Thompson 1986; Gimenez ym. 2013; Kyröläinen ym. 2000)

Tutkimuskysymys 3: Onko hapenkulutuksen ja askelmuuttajien välillä yhteys?

Hypoteesi: On yhteys. Askeltiheyden ja hapenkulutuksen välillä on positiivinen korrelaatio, eli askeltiheyden kasvaessa hapenkulutus kasvaa. Askelpituuden ja hapenkulutuksen välillä on negatiivinen korrelaatio eli askelpituuden lyhentyessä hapenkulutus kasvaa. Askeltiheyden kasvu ja askelpituuden lyhentäminen voi lisätä lihasten aktiivisuutta, mikä voi lisätä hapenkulutusta (Kyröläinen ym. 2000; Schena ym. 2014). Askelkontaktin keston ja hapenkulutuksen välillä on negatiivinen korrelaatio eli sen lyhentyessä hapenkulutus kasvaa. Askelkontaktin keston on havaittu lyhenevän askeltiheyden kasvaessa ja askelpituuden lyhentyessä (Morin ym. 2011) ja hapenkulutuksen kasvavan (Davies & Thompson 1986; Gimenez ym. 2013; Kyröläinen ym. 2000) pitkäkestoisessa tasavauhtisessa juoksussa.

5 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tämän tutkimuksen tulokset on saatu Jyväskylän yliopistossa tehdyistä HoDARI -ja RunAI-tutkimuksista. Mittaukset on suoritettu Jyväskylän yliopiston liikuntalaboratorion tiloissa syksyllä 2023. Tutkittavat suorittivat maksimaalisen hapenottokyvyn testin sekä pitkäkestoisen kestävyystestin. Askelmuuttujia ja hapenkulutusta tarkasteltiin pitkäkestoisen kestävyystestin aikana. Jyväskylän yliopiston eettinen toimikunta on antanut hyväksynnän HoDARI- ja RunAI-tutkimukselle.

5.1 Tutkittavat ja laitteisto

Tutkimukseen osallistui 36 kestävyysurheilijaa, joista 16 oli naisia ja 20 miehiä. Urheilijoiden harjoitusmäärä oli vähintään noin 250 tuntia vuodessa ja harjoittelua takana vähintään kaksi vuotta. Keskiarvot miehistä ja naisista näkee taulukosta 2.

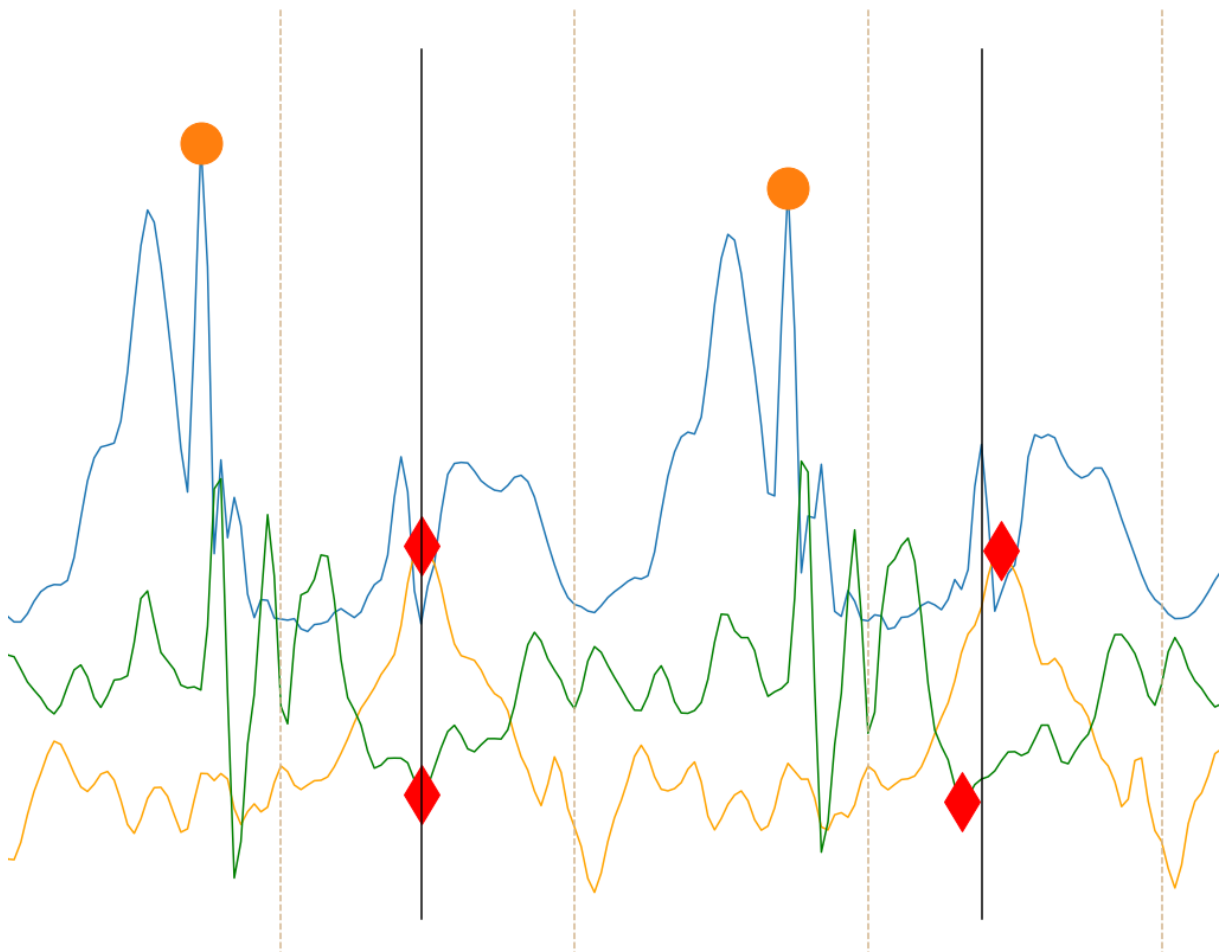
TAULUKKO 2. Tutkittavien tiedot.

Sukupuoli	N	Ikä (vuotta)	Paino (kg)	Pituus (cm)
Miehet	20	35,6	77	168
Naiset	16	35,7	63	180

Hapenkulutuksen mittaamiseen käytettiin hengityskaasuanalysaattoria. Hengityskaasut kerättiin Breath-By-Breath menetelmällä (Jaeger Vyntus CPX). Sykkeen mittaamiseen käytettiin Polarin rannekelloa (Vantage V2, Pacer Pro or Pacer, Polar Electro, Finland), joka oli yhdistetty Polar H10 sykesensoriin. Juoksutestit suoritettiin juoksumatolla (HP Cosmos). Askelmuuttujien arvioimiseen käytettiin kiihtyvyyssensoreilla (MovellaDOT Xsens) mitattua dataa. Kiihtyvyyssensoreiden datan analysointiin käytettiin aiemmassa kirjallisuudessa käytettyä algoritmia (Donahue & Hahn 2022; Purcell ym. 2006).

Algoritmissa askelten tunnistus perustuu minimi- ja maksimiarvojen tunnistamiseen kiihtyvyyssensorien mittaamasta datasta. Jalkapöydän sensorien mittaamasta datasta etsitään resultanttikihtyvyyden maksimiarvoja, jotka merkkäavat arvioitua hetkeä, kun jalka tulee kontaktiin maan kanssa (initial contact, IC). Säären sensorin mittaamasta datasta etsitään

sivuttaissuuntaisen kiihtyvyyden minimiarvo ja eteen-taakse suuntaisen maksimiarvo. Säären sensoridatasta saadun minimin ja maksimin välin keskikohtaan arvioitiin se hetki, kun jalka irtoaa maasta (toe-off, TO). Säären kiihtyvyyssensorin minimi- ja maksimiarvot pyrittiin tunnistamaan annetulta aikaväliltä. Aikaväli alkoi, kun kontaktihetkestä oli kulunut 0,1 sekuntia ja aikavälin pituus oli puolet kahden peräkkäisen IC välisestä ajasta. Aikaväliä jouduttiin osan tutkittavien kanssa siirtämään eteenpäin, jotta säären kiihtyvyyssensorin minimi- ja maksimiarvo saatiin tunnistettua. Kiihtyvyyssensorien dataa sekä IC ja TO tunnistusta tarkasteltiin piirtämällä kiihtyvyyssensorien datasta kuva ja merkkäämällä tunnistetut minimi- ja maksimiarvot sekä IC ja TO.



KUVA 1. Askelten tunnistus kiihtyvyyssensorin datasta havainnollistettuna kuvalla. Sininen käyrä on jalkapöydän kiihtyvyyssensorin resultanttikihtyvyys. Vihreä käyrä on säären kiihtyvyyssensorin eteen-taakse suuntainen kiihtyvyys ja keltainen käyrä sen sivuttaissuuntainen kiihtyvyys. Keltainen katkoviiva merkkää säären sensorin tunnistuksessa käytetyn aikavälin. Oranssi pallo on arvioitu kontaktihetki (initial contact, IC) ja musta pystyviiva on se hetki, kun jalan on arvioitu irronneen maasta (toe-off, TO).

5.2 Maksimaalinen hapenottokyvyn testi

Maksimaalinen hapenottokyvyn testi tehtiin juoksumatolla juosten. Testissä juoksunopeutta nostettiin portaittain. Yhden portaan pituus oli kolme minuuttia ja nopeutta nostettiin aina 1 km/h. Ennen testin alkua tutkittava lämmitteli noin 5 minuuttia alhaisella nopeudella. Aloitussnopeus arvioitiin tutkittavalle siten, ettei kahden ensimmäisen portaan aikana ylitettäisi aerobista kynnystä. Juoksumatto pysäytettiin aina portaan päätyttyä ja tutkittavalta otettiin laktaattinäyte. Koska testiaikaa ei pysäytetty maton ollessa pysähtynyt, seuraavan kuorman todellinen pituus oli laktaattinäytteen ottamiseen kuluvan ajan verran eli noin 20 sekuntia lyhyempi.

Aerobinen kynnys määriteltiin laktaatin perusteella. Aerobinen kynnys asetettiin siihen kohtaan, kun laktaatti oli noussut 0,3 mmol/l alhaisimmasta testin aikana mitatusta laktaattiarvosta. Tutkimuksen johtava fysiologi arvioi kaikkien tutkittavien aerobiset kynnykset, jotta mahdolliset subjektiiviset arviot ja muutokset pysyivät samanlaisina kaikkien tutkittavien kohdalla.

5.3 Pitkäkestoinen kestävyystesti

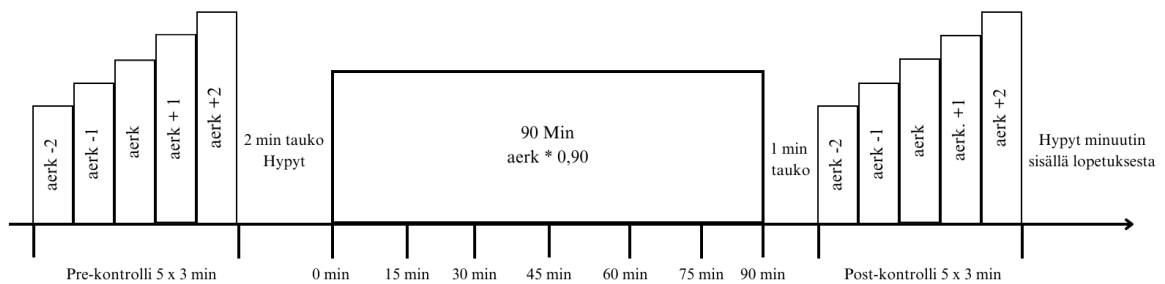
Pitkäkestoinen kestävyystesti suoritettiin 1–2 päivää maksimaalisen hapenottokyvyn testin jälkeen. Ennen testiä tutkittavat lämmittelivät noin 5 minuuttia juosten alhaisella nopeudella. Lämmittelyn jälkeen tutkittava punnittiin (Seca 719) ja kiihtyvyyssensorit asetettiin paikalleen ja kalibroitiin. Kiihtyvyyssensorit teipattiin tutkittavan jalkapöytiin kenkien päälle sekä säärien etuosaan paljaalle iholle.

Tutkittavat suorittivat yhteensä kahden tunnin kestoisen juoksutestin ja suorittivat 15 reaktiivisuushyppyä kahdesti. Testi alkaa 15 minuutin pre-kontrollijuoksulla, jossa juostaan viisi kertaa kolmen minuutin kuorma (5 x 3 min). Ensimmäisen kuorman nopeus on 2 km/h alle aerobisen kynnyksen nopeus ja nopeutta nostettiin aina 1 km/h seuraavaan kuormaan. Pre-kontrollijuoksun jälkeen tutkittava suoritti ensin harjoitukseksi 5 submaksimaalista reaktiivisuushyppyä. Harjoitushyppyjen jälkeen tutkittava suoritti 10 maksimaalista

jännehyppyä kontaktimatolla. Tutkittavaa ohjeistettiin pitämään kädet lanteilla ja hyppäämään mahdollisimman korkealle mahdollisimman nopeasti siten, että polvet koukistuvat mahdollisimman vähän.

Pre-kontrollijuoksun jälkeen juostiin 90 minuuttia tasaisella vauhdilla. Nopeus oli 90 % aerobisen kynnyksen nopeudesta, joka oli valmiiksi määritelty maksimaalisen hapenottokyvyn testin perusteella. 90 minuutin tasavauhtinen suoritus jakautui kuuteen 15 minuutin intervalliin. Intervallissa 10 minuuttia juostiin ilman maskia, minkä jälkeen matto pysäytettiin ja tutkittavalta otettiin laktaatinäyte, kysyttiin RPE Borg-asteikolla (Borg 1982) ja puettiin tutkittavalle maski. Loput 5 minuuttia kerättiin hengityskaasuja ja dataa kiihtyvyyssensoreilla, minkä jälkeen tutkittava riisui maskin itse maton ollessa jatkuvasti päällä.

Post-kontrollijuoksu oli täysin samanlainen kuin pre-kontrollijuoksu. Post-kontrollijuoksun päätyttyä tutkittava suoritti reaktiivisuushyppyt samalla tavalla kuin pre-kontrollijuoksun jälkeen. Reaktiivisuushyppyt suoritettiin minuutin sisällä post-kontrollijuoksun päättymisestä. 90 minuutin tasavauhtisen juoksuun on merkattu ajankohdat, kun hengityskaasujen analysointi on lopetettu. Testin kulku on havainnollistettu kuvassa 2.



KUVA 2. Testiprotokolla havainnollistettuna kuvaksi. aerk = aerobisen kynnyksen vauhti, aerk \pm x = aerobisen kynnyksen vauhti \pm x km/h, aerk * 0,90 = 90 % aerobisen kynnyksen vauhdista.

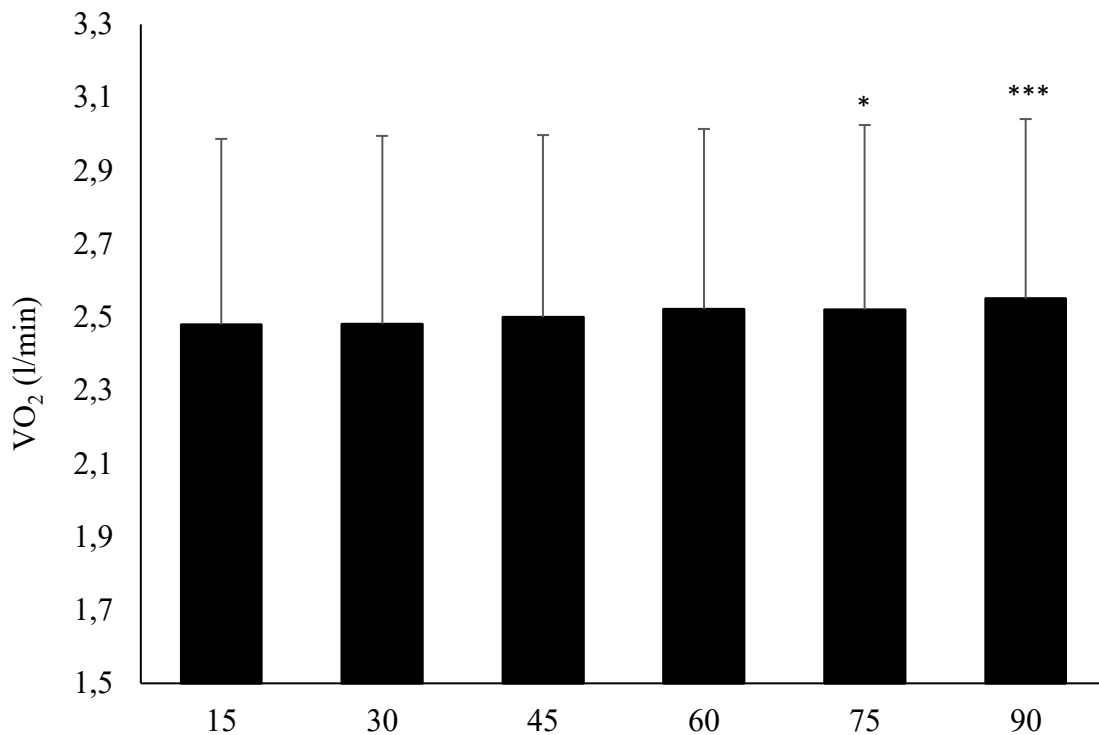
5.4 Tilastolliset menetelmät

Tulosten tilastolliseen analysointiin käytettiin IBM SPSS Statistics -ohjelmistoa (Versio: 28.0.1.1). Jokaisen muuttujan normaalijakautuneisuus tarkastettiin Shapiro-Wilk testillä. Normaalijakautuneisuudessa otettiin huomioon myös jakautuman vinous ja huipukkuus. Normaalijakautuneisuuden perusteella valittiin muut testit. Hapenkulutuksen ja RER:in analysoimiseen eri mittauspisteissä käytettiin toistovarianssianalyysia. Askelmuuttujien ennen ja jälkeen arvojen vertaamiseen käytettiin Wilcoxonin testiä. Hapenkulutuksen ja askelmuuttujien suhteellisten muutosten korrelaatioiden tarkastamiseen käytettiin Pearsonin testiä.

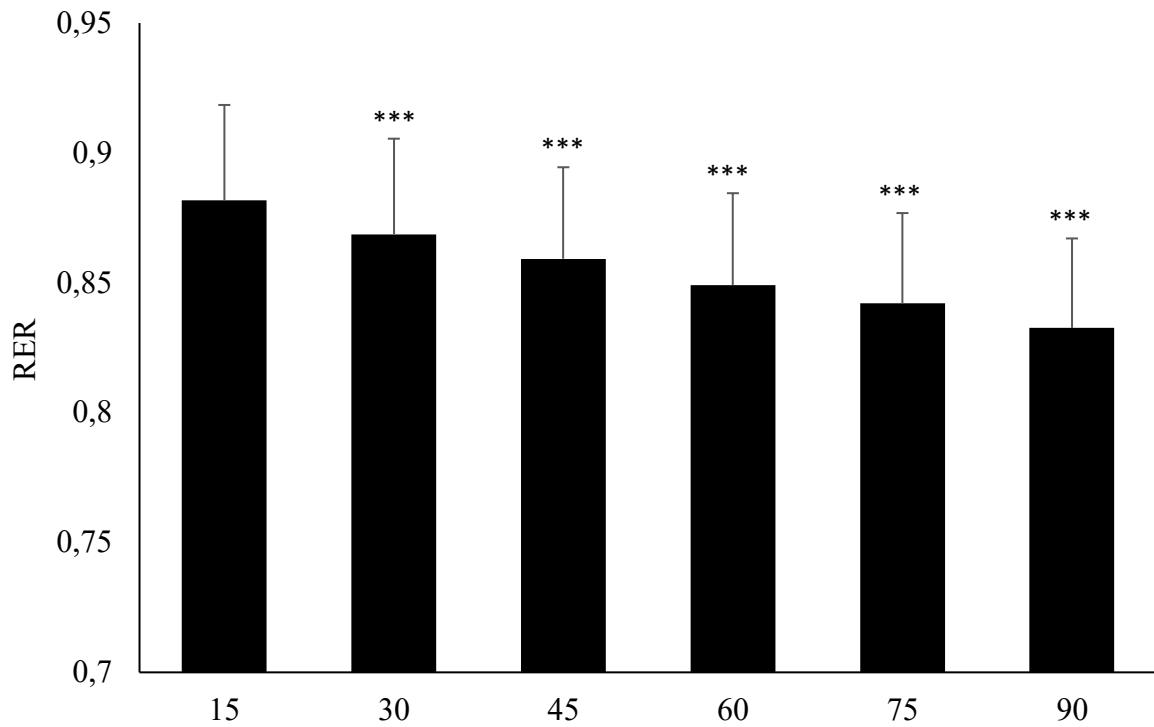
Tutkimukseen osallistui 36 kestävyysurheilijaa, joista 34 suoritti juoksutestin kokonaan. Yksi tutkittavista joutui jättäytymään tutkimuksesta pois ja yhdellä juoksutesti jouduttiin keskeyttämään. Hengityskaasujen viiden minuutin keräyksestä käytettiin vain viimeistä kahta minuuttia hapenkulutuksen ja RER arvon mittaamiseen. Myös kiihtyvyyssensoreiden tallentamasta datasta käytettiin viimeistä kahta minuuttia. Askelmuuttujissa osa tutkittavista rajattiin pois epäonnistuneen tallennuksen vuoksi, joten vain 25 tutkittavalta analysoitiin askelmuuttujia.

6 TULOKSET

Hapenkulutuksen keskiarvo mitattiin kahden minuutin ajalta jokaisessa mittauspisteessä tasavauhtisen juoksun aikana. Hapenkulutus kasvoi verrattuna 15 minuutin kohdalla mitattuun arvoon tilastollisesti merkitsevästi, kun suoritusta oli kulunut 75 minuuttia ($2,521 \pm 0,504$ vs. $2,480 \pm 0,507$, $p = 0,13$) ja 90 minuuttia ($2,551 \pm 0,490$ vs. $2,480 \pm 0,507$, $p < 0,001$). (Kuva 3) RER oli tilastollisesti merkitsevästi pienempi ($p < 0,001$) kaikissa mittauspisteissä (30, 45, 60, 75, 90) verrattuna 15 minuutin kohdalla mitattuun arvoon (kuva 4).

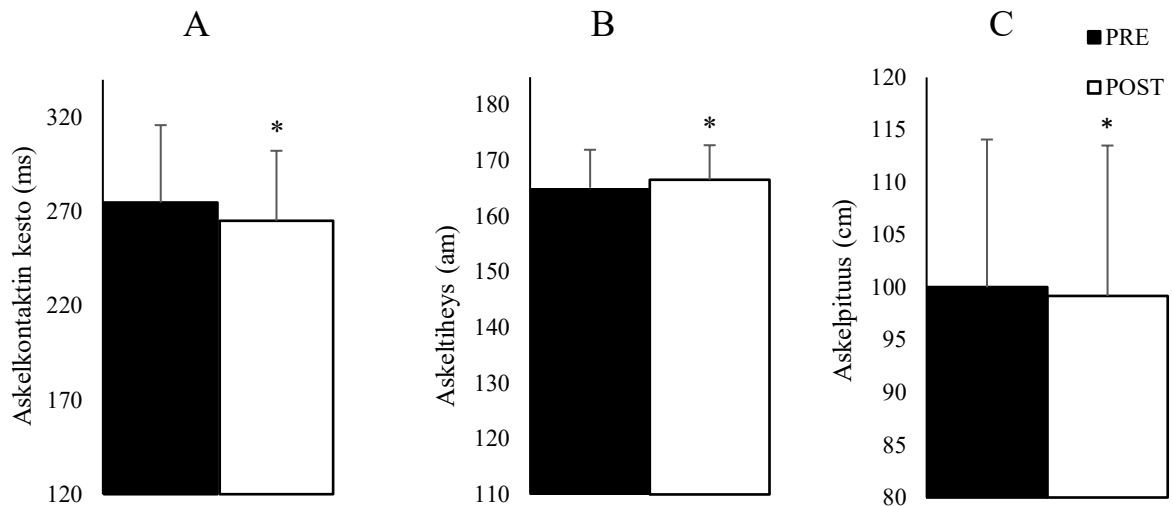


KUVA 3. Hapenkulutus (l/min) eri mittauspisteissä pitkäkestoisen kestävyystestin aikana. N = 34, * $p < 0,05$ verrattuna 15 min arvoon, *** $p < 0,001$ verrattuna 15 min arvoon.



KUVA 4. RER jokaisessa mittauspisteessä pitkäkestoisen tasavauhtisen kestävyystestin aikana. X-akselilla tasavauhtisen juokсутestin ajanhetki minuutteina. N = 34, *** p < 0,001 verrattuna 15 min arvoon.

Kun verrattiin 15 ja 90 minuutin kohdalla mitattuja arvoja, askelkontaktin kesto lyheni tilastollisesti merkitsevästi (274 ± 41 ms vs. 265 ± 37 ms, $p < 0,05$) ja askeltiheys kasvoi tilastollisesti merkitsevästi (165 ± 6 vs. 166 ± 6 , $p < 0,05$). Askelpituus lyheni tilastollisesti merkitsevästi verrattaessa 15 ja 90 minuutin arvoja (100 ± 14 cm vs. 99 ± 14 cm, $p < 0,05$). (Kuva 5)



KUVA 5. Askelkontaktin kesto (A), askelfrekvenssi (B) ja askelpituus (C) 15 minuutin ja 90 minuutin kohdalla. N = 25, am = askelta minuutissa, * p < 0,05

Askelkontaktin kestolle (-3,03 %), askeltiheydelle (0,90 %), askelpituudelle (-0,87 %) ja hapenkulutukselle (2,44 %) laskettiin keskimääräinen suhteellinen muutos (N = 25). Suhteellinen muutos laskettiin 15 minuutin ja 90 minuutin arvojen perusteella. Askelkontaktin keston ($r = -0,364$), askelfrekvenssin ($r = -0,192$) tai askelpituuden ($r = 0,192$) suhteellisen muutoksen ja hapenkulutuksen suhteellisen muutoksen välillä ei havaittu tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota.

7 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella hapenkulutuksen ja askelmuuttujien muutosta sekä yhteyttä pitkäkestoisen tasavauhtisen juoksun aikana. Hypoteesit hapenkulutuksen ja askelmuuttujien muutoksista olivat oikeat. Hapenkulutus kasvoi eli juoksun taloudellisuus heikkeni. Askelmuuttujista askelkontaktin kesto ja askelpituus lyhenivät sekä askeltiheys kasvoi. Hapenkulutuksen ja askelmuuttujien väliltä ei löytynyt tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota. Seuraavissa kappaleissa pohditaan tuloksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä sekä tehdään mahdolliset johtopäätökset tämän tutkimuksen tuloksista.

7.1 Askelmuuttujat

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella askelkontaktin kesto sekä askelpituus lyhenevät ja askeltiheys kasvaa pitkäkestoisen tasavauhtisen juoksun aikana. Aiempi tutkimusnäyttö on puoltanut askelkontaktin keston lyhenemistä mutta se on ollut myös tätä tulosta vastaan. Morinin ym. (2011) tutkimuksessa havaittiin myös askelkontaktin keston lyhenemistä 24 tunnin kestoisen juoksusuorituksen aikana, joskin muutos havaittiin vasta, kun suoritusta oli kulunut 12 tuntia. Prigentin ym. (2022) tutkimuksessa taas havaittiin askelkontaktin keston kasvua puolimaratonin aikana. Askeltiheyden kasvu on yhtenevää aiemman kirjallisuuden kanssa (Kyröläinen ym. 2000; Morin ym. 2011; Place ym. 2004). Tässä tutkimuksessa havaittiin myös askelpituuden lyhenemistä. Askelpituuden lyhenemistä on havaittu askeltiheyden kasvaessa myös muissa tutkimuksissa (Kyröläinen ym. 2000). Toisaalta Schena ym. (2014) havaitsivat askelpituuden lyhenevän, vaikka askeltiheydessä ei havaittu muutosta, mutta heidän tutkimuksessaan nopeus ei pysynyt vakioituna. Tärkeää on muistaa, että askelmuuttujien arvot ovat vain arvioita tässä tutkimuksessa, sillä muuttujat on arvioitu kiihtyvyyssensoreiden mittaamasta datasta. Ei siis ole varmuutta ovatko askelmuuttujat todellisuudessa olleet sitä, mitä tutkimuksessa on arvioitu. Myös osalla tutkittavista datan tallennus epäonnistui, minkä myötä kaikkien tutkittavien askelmuuttujia ei pystytty tarkastelemaan.

Askelmuuttujien muutosten taustalla on luultavasti pitkäkestoisen tasavauhtisen kestävyysuorituksen aiheuttama sentraalinen väsymys. (Apte ym. 2021; Burnley & Jones 2018) Kuormituksen aiheuttama väsymys voi vaikuttaa jalan lihasten ja jänteiden kykyyn sietää

ja käyttää hyväksi askelkontaktissa syntyviä voimia (Novacheck 1998). Tätä hermolihaskäytön heikentynyttä toimintaa voidaan pyrkiä kompensoimaan lisäämällä askeltiheyttä (Kyröläinen ym. 2000), sillä askeltiheyden kasvattamisen myötä jalkaan kohdistuvat voimat pienenevät askelkontaktin aikana (Morin ym. 2011), mikä voikin olla elimistön keino suojata itseään liian kovalta rasitukselta (Avela ym. 1999). Tämä voisi selittää askeltiheyden kasvun ja askelpituuden lyhentymisen myös tässä tutkimuksessa. Hermolihaskäytön heikentymisen taustalla voi olla tyypin III ja IV hermosolujen aktivoituminen pitkäkestoisen kestävyysjuoksuksen aiheuttamien lihaskuormien seurauksena (Ament & Verkerke 2009). Tässä tutkimuksessa lihaskuormien todellista olemassaoloa ei voitu todistaa, sillä tutkittavilta ei otettu verinäytteitä, joista olisi voitu analysoida molekyylejä, joita esiintyy lihaskuormien yhteydessä.

Tässä tutkimuksessa mitattiin myös kontakti- ja lentoaika sekä painoon suhteutettua tehoa kymmenessä peräkkäisessä maksimaalisessa jännehypyssä. Kontaktiaika piteni ja teho laski tilastollisesti merkitsevästi, eli toisin sanoen voimantuottoaika piteni. Myös Avela ym. (1999) havaitsivat, että kontaktiaika toistetuissa maksimaalisissa pudotushypyissä kasvoi maratonin jälkeen. Tutkimuksessa havaittiin myös, että maraton oli heikentänyt hermolihaskäytön toimintaa (Avela ym. 1999). Kontaktiajan piteneminen loikissa siis tukee ajatusta siitä, että hermolihaskäytön toiminta heikentyi pitkäkestoisen kestävyystestien seurauksena.

7.2 Hapenkulutus

Tämän tutkimuksen tulos hapenkulutuksen kasvusta ja RER laskusta on linjassa aiemman tutkimusnäytön kanssa. Gimenezin ym. (2013) tutkimuksessa hapenkulutus kasvoi tilastollisesti merkitsevästi ja RER laski tilastollisesti merkitsevästi. Myös Kyröläinen ym. (2000) sekä Davies ja Thompson (1986) havaitsivat samanlaisia muutoksia hapenkulutuksessa ja RER-arvossa pitkäkestoisen kestävyysjuoksuosuorituksen aikana. Kuten aiemmissakin tutkimuksissa myös tässä tutkimuksessa hapenkulutuksen kasvua selittää osaltaan rasvojen lisääntyneen käyttö energianlähteenä, mikä havaittiin RER arvon laskuna. Lisääntyneen rasvojen käytön taustalla voi olla mitokondrioiden oman aineenvaihdunnan lisääntyminen tai niiden heikentynyt tehokkuus (Fernström ym. 2007).

Muutkin tekijät kuin rasvan lisääntynyt käyttö energianlähteenä voivat selittää hapenkulutuksen kasvua. Esimerkiksi kehon lämpötilan nousu ja kuormituksen aikaisesta hikoilusta johtuva nestehukka on voinut lisätä hapenkulutusta (Chevront ym. 2010) Tässä tutkimuksessa näitä muuttujia ei kuitenkaan otettu huomioon, joten niiden vaikutusta hapenkulutukseen on mahdotonta arvioida. Myös väsymyksestä aiheutuva koordinaation heikentyminen ja siitä aiheutuva ylimääräinen liike tai juokсутekniikan huonontuminen on voinut lisätä hapenkulutusta (Davies & Thompson 1986). Väsymyksen ja sen myötä askelmuuttujien muutosten vaikutusta hapenkulutukseen käsitellään tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

7.3 Hapenkulutuksen ja askelmuuttujien välinen yhteys

Hapenkulutuksen suhteellisen muutoksen ja askelmuuttujien suhteellisten muutosten välillä ei ollut tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita. Tämä oli vastoin hypoteesia, jossa aiemman kirjallisuuden perusteella oletettiin, että askelmuuttujien muutoksen ja hapenkulutuksen muutoksen välillä havaittaisiin yhteys. Hypoteesin taustalla oli pitkäkestoisesta kestävyysuoritukselta aiheutuva sentraalinen väsymys, jonka takia hermolihasjärjestelmän toiminta heikentyy (Ament & Verkerke 2009). Väsymyksestä johtuva heikentynyt elastisen energian hyödyntäminen (Novacheck 1998) sekä askeltiheyden kasvu ja askelpituuden lyhentymisen (Prigent ym. 2022) lisää lihasten aktiivisuutta, mikä voi lisätä hapenkulutusta. Tässä tutkimuksessa askeltiheyden ja askelpituuden suhteellinen muutos oli alle prosentin (1 %). Mooren (2016) mukaan alle kolme prosentin (3 %) muutokset askeltiheydessä tai -pituudessa eivät vielä heikennä juoksun taloudellisuutta. Tämä hyvin pieni muutos askeltiheydessä ja -pituudessa luultavasti selittää, miksi hapenkulutuksen ja askelmuuttujien suhteellisen muutoksen välillä ei havaittu muutosta.

Sentraalisen väsymisen kehittyminen pitkäkestoisessa kevyessä kestävyysuorituksessa on hidasta (Burnley & Jones 2018). Place ym. (2004) tutkivat sentraalisen väsymisen kehittymistä viiden tunnin kestävyysjuoksuuorituksen aikana. Sentraalista väsymystä havaittiin vasta suorituksen loppuvaiheessa. (Place ym. 2004) Voi siis olla, ettei tässä tutkimuksessa 90 minuutin tasavauhtinen juoksuuoritus kerennyt aiheuttaa sentraalista väsymystä ja siten vaikuttamaan askelmuuttujiin, mikä selittäisi hyvin pienen suhteellisen muutoksen askeltiheydessä ja -pituudessa. Hapenkulutuksen ja askelmuuttujien välistä yhteyttä tarkastellessa tutkimusjoukon koko oli vain 25, koska kiihtyvyyssensoridatan tallentamisen

epäonnistui osalla tutkittavista. Voi olla, että tulos hapenkulutuksen ja askelmuuttujien välisestä yhteydestä olisi voinut olla eri, jos tutkimusjoukon koko olisi ollut suurempi.

7.4 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat, että hapenkulutus kasvaa pitkäkestoisessa tasavauhtisessa kestävyysjuoksusuorituksessa eli juoksun taloudellisuus heikkenee. Hapenkulutuksen kasvun taustalla merkittävin tekijä oli rasvojen lisääntynyt käyttö energianlähteenä. Askelmuuttujien ja hapenkulutuksen välillä ei löytynyt tilastollisesti merkitsevää yhteyttä. Tämä johtunee siitä, että askelmuuttujissa havaitut muutokset olivat hyvin pieniä ja eivät sen takia vaikuttaneet juoksun taloudellisuuteen merkittävästi. Hyvin pienet muutokset askelmuuttujissa selittynee sillä, ettei tutkimuksen kestävyysjuoksusuoritus aiheuttanut tarpeeksi voimakasta sentraalista väsymistä ja siten heikentänyt hermolihasarjestelmän toimintaa. Jatkotutkimuksena askelmuuttujien ja hapenkulutuksen yhteyttä voitaisiin tarkastella vielä pidemmässä suorituksessa, jotta väsymys ehtii kehittyä suorituksen aikana. Myös kiihtyvyyssensoridatan analysoimiseen käytettyjen algoritmien luotettavuutta täytyy testata ja algoritmeja täytyy kehittää.

Johtopäätöksenä on, ettei 90 minuutin kestoinen kevyt tasavauhtinen kestävyysjuoksusuoritus aiheuta kestävyysharjoitelleilla niin suuria muutoksia hermolihasarjestelmän toiminnassa, jotta juoksutekniikka muuttuisi epätaloudelliseksi vaan muutokset hapenkulutuksessa ja juoksun taloudellisuudessa selittyvät tämän kaltaisessa suorituksessa energia-aineenvaihdunnallisilla muutoksilla.

LÄHTEET

- Ament, W. & Verkerke, G. J. (2009). Exercise and Fatigue. *Sports Medicine* 39 (5), 389–422. doi:10.2165/00007256-200939050-00005.
- Apte, S., Prigent, G., Stöggel, T., Martínez, A., Snyder, C., Gremeaux-Bader, V. & Aminian, K. (2021). Biomechanical Response of the Lower Extremity to Running-Induced Acute Fatigue: A Systematic Review. *Frontiers in Physiology* 12, 646042. doi:10.3389/fphys.2021.646042.
- Avela, J., Kyröläinen, H., Komi, P. V. & Rama, D. (1999). Reduced reflex sensitivity persists several days after long-lasting stretch-shortening cycle exercise. *Journal of Applied Physiology* 86 (4), 1292–1300. doi:10.1152/jappl.1999.86.4.1292.
- Billat, V., Poinard, L., Palacin, F., Pycke, J. R. & Maron, M. (2022). Oxygen Uptake Measurements and Rate of Perceived Exertion during a Marathon. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (9), 5760. doi:10.3390/ijerph19095760.
- Borg, G. a. V. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 14 (5), 377.
- Burnley, M. & Jones, A. M. (2018). Power-duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *European Journal of Sport Science* 18 (1), 1–12. doi:10.1080/17461391.2016.1249524.
- Cheuvront, S. N., Kenefick, R. W., Montain, S. J. & Sawka, M. N. (2010). Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md.: 1985) 109 (6), 1989–1995. doi:10.1152/jappphysiol.00367.2010.
- Davies, C. T. & Thompson, M. W. (1986). Physiological responses to prolonged exercise in ultramarathon athletes. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md.: 1985) 61 (2), 611–617. doi:10.1152/jappl.1986.61.2.611.
- Dick, R. W. & Cavanagh, P. R. (1987). An explanation of the upward drift in oxygen uptake during prolonged sub-maximal downhill running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 19 (3), 310–317.
- Donahue, S. R. & Hahn, M. E. (2022). Validation of Running Gait Event Detection Algorithms in a Semi-Uncontrolled Environment. *Sensors* (Basel, Switzerland) 22 (9), 3452. doi:10.3390/s22093452.

- Dressendorfer, R. H. (1991). Acute reduction in maximal oxygen uptake after long-distance running. *International Journal of Sports Medicine* 12 (1), 30–33. doi:10.1055/s-2007-1024651.
- Fernström, M., Bakkman, L., Tonkonogi, M., Shabalina, I. G., Rozhdestvenskaya, Z., Mattsson, C. M., Enqvist, J. K., Ekblom, B. & Sahlin, K. (2007). Reduced efficiency, but increased fat oxidation, in mitochondria from human skeletal muscle after 24-h ultraendurance exercise. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md.: 1985) 102 (5), 1844–1849. doi:10.1152/jappphysiol.01173.2006.
- Gimenez, P., Kerhervé, H., Messonnier, L. A., Féasson, L. & Millet, G. Y. (2013). Changes in the Energy Cost of Running during a 24-h Treadmill Exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 45 (9), 1807–1813. doi:10.1249/MSS.0b013e318292c0ec.
- Hauswirth, C., Bigard, A. X., Berthelot, M., Thomaïdis, M. & Guezennec, C. Y. (1996). Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *International Journal of Sports Medicine* 17 (8), 572–579. doi:10.1055/s-2007-972897.
- Hauswirth, C. & Lehénaff, D. (2001). Physiological demands of running during long distance runs and triathlons. *Sports Medicine* (Auckland, N.Z.) 31 (9), 679–689. doi:10.2165/00007256-200131090-00004.
- Jones, A. M., Grassi, B., Christensen, P. M., Krustup, P., Bangsbo, J. & Poole, D. C. (2011). Slow Component of $\dot{V}O_2$ Kinetics: Mechanistic Bases and Practical Applications. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 43 (11), 2046. doi:10.1249/MSS.0b013e31821fcfc1.
- Kniffki, K. D., Mense, S. & Schmidt, R. F. (1978). Responses of group IV afferent units from skeletal muscle to stretch, contraction and chemical stimulation. *Experimental Brain Research* 31 (4), 511–522. doi:10.1007/BF00239809.
- Kyröläinen, H., Pullinen, T., Candau, R., Avela, J., Huttunen, P. & Komi, P. V. (2000). Effects of marathon running on running economy and kinematics. *European Journal of Applied Physiology* 82 (4), 297–304. doi:10.1007/s004210000219.
- Moore, I. S. (2016). Is There an Economical Running Technique? A Review of Modifiable Biomechanical Factors Affecting Running Economy. *Sports Medicine* 46 (6), 793–807. doi:10.1007/s40279-016-0474-4.
- Morin, J.-B., Samozino, P. & Millet, G. Y. (2011). Changes in running kinematics, kinetics, and spring-mass behavior over a 24-h run. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 43 (5), 829–836. doi:10.1249/MSS.0b013e3181fec518.

- Nelson, M. T., Biltz, G. R. & Dengel, D. R. (2015). Repeatability of Respiratory Exchange Ratio Time Series Analysis. *The Journal of Strength & Conditioning Research* 29 (9), 2550. doi:10.1519/JSC.0000000000000924.
- Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. *Gait & Posture* 7 (1), 77–95. doi:10.1016/S0966-6362(97)00038-6.
- Place, N., Lepers, R., Deley, G. & Millet, G. Y. (2004). Time course of neuromuscular alterations during a prolonged running exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 36 (8), 1347–1356. doi:10.1249/01.mss.0000135786.22996.77.
- Prigent, G., Apte, S., Paraschiv-Ionescu, A., Besson, C., Gremeaux, V. & Aminian, K. (2022). Concurrent Evolution of Biomechanical and Physiological Parameters With Running-Induced Acute Fatigue. *Frontiers in Physiology* 13, 814172. doi:10.3389/fphys.2022.814172.
- Purcell, B., Channells, J., James, D. & Barrett, R. (2006). Use of accelerometers for detecting foot-ground contact time during running. *Proc SPIE*.
- Rothschild, C. E. (2012). Primitive Running: A Survey Analysis of Runners' Interest, Participation, and Implementation. *The Journal of Strength & Conditioning Research* 26 (8), 2021. doi:10.1519/JSC.0b013e31823a3c54.
- Rotto, D. M. & Kaufman, M. P. (1988). Effect of metabolic products of muscular contraction on discharge of group III and IV afferents. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md.: 1985) 64 (6), 2306–2313. doi:10.1152/jappl.1988.64.6.2306.
- Schena, F., Pellegrini, B., Tarperi, C., Calabria, E., Salvagno, G. L. & Capelli, C. (2014). Running economy during a simulated 60-km trial. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 9 (4), 604–609. doi:10.1123/ijsp.2013-0302.
- Van Hooren, B., Fuller, J. T., Buckley, J. D., Miller, J. R., Sewell, K., Rao, G., Barton, C., Bishop, C. & Willy, R. W. (2020). Is Motorized Treadmill Running Biomechanically Comparable to Overground Running? A Systematic Review and Meta-Analysis of Cross-Over Studies. *Sports Medicine* 50 (4), 785–813. doi:10.1007/s40279-019-01237-z.
- Winter, S., Gordon, S. & Watt, K. (2017). Effects of fatigue on kinematics and kinetics during overground running: a systematic review. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 57 (6), 887–899. doi:10.23736/S0022-4707.16.06339-8.
- Xu, F. & Montgomery, D. L. (1995). Effect of prolonged exercise at 65 and 80% of VO₂max on running economy. *International Journal of Sports Medicine* 16 (5), 309–313. doi:10.1055/s-2007-973011.