

Kirjallisuuskatsaus melonnan biomekaniikkaan osa I

Kirjoitelman aiheena on käsitellä melonnan biomekaniikkaa yleisestä näkökulmasta. Suomalaista melonnan biomekaniikkaa käsittelevää kirjallisuutta on julkaistu vähän. Vuonna 1991 julkaistiin Risto Lehtisen kirjoittama Melontavalmennuksen käsikirja, jossa käsitellään myös melontatekniikkaa laajasti [1a]. Lisäksi Mononen & Viitasalo ovat tutkineet vedon parametreja ja julkaisseet niistä kansainvälisiä tutkimusraportteja [1b]. Melontatutkimusta tehdään myös tänä päivänä ja Jyväskylän Yliopistonliikuntatieteellisestä tiedekunnasta on viime aikoina valmistunut kaksi Pro gradu-tutkielmaa [2], [3]. Lähtökohtaisesti optimaalisen melontasuorituksen tutkimisessa on käytetty asetelmaa, jossa on vertailtu eri tason melojia toisiinsa.

Ensimmäisiä kansainvälisiä laajempia biomekaanisia tutkimuksia on Mann & Kearneyn vuonna 1980 julkaisema ratamelonnan elokuvaustekniikalla toteutettu biomekaaninen analyysi, joka toteutettiin yhdeksälle olympiatason melojalle. Metodologisesti melonnan tutkimukset ovat kehittyneet 80-luvulta tähän päivään asti merkittävästi [4]. Melontatutkimuksissa on käytetty perinteisesti liikeanalyysiä (motion analysis), mutta viime vuosikymmeninä erilaisten antureiden (voima, kiihtyvyys, inertiamittausyksiköt) käyttö melonnan tutkimuksessa on lisääntynyt [5]–[9]. Uutena lupaavana mittalaitteena tutkimuslaboratorioiden valmistamien kustomoitujen laitteiden rinnalle on tullut kaupallinen tehomittari One Giant Leap, (Uusi-Seelanti), jolla julkaistaan koko ajan laadukkaita tutkimuksia [10]–[12]. Myös pieniä, edullisia ja monipuolisia inertiamittausyksiköitä on käytetty melontatutkimuksessa aivan viime aikoina [3], [6].

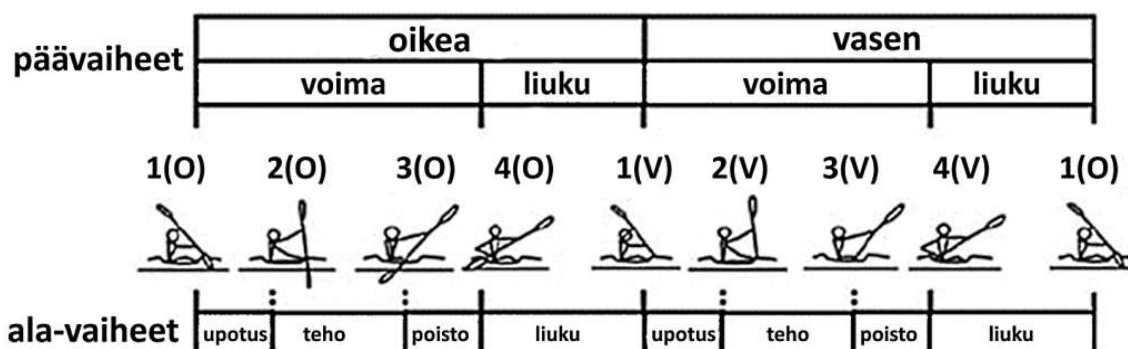
Yleisesti

Melonnessa suorituskykyä voidaan pääasiassa parantaa kahdella tapaa. Aluksen kulkuvastusta voidaan vähentää [13] tai melonnan suorituskykyä lisätä [14]. Aluksen eteenpäin suuntautuvan kiihtyvyyden luomiseksi melojan on voitettava aluksen kulkua vastustavien veden ja ilman aiheuttamat vastusvoimat [14]–[16]. Veden alukselle aiheuttamat vastusvoimat ovat huomattavasti suuremmat, sillä ilmanvastuksen osuus on vain noin 10 % kokonaisvastusvoimista [16], [17]. Veden vastusvoimat koostuvat kolmesta eri komponentista: veden kitkasta, veden paineen tuottamasta vastuksesta ja aaltojen muodostukseen eli veden syrjäyttämiseen vaadittavasta voimasta [18], [19]. Melojan hyötysuhde propulsiivoimien muodostamisessa on yksi keskeinen menestyksen tekijä [20]. Melan valinta on myös tärkeää ja sen tulee erityisesti lavan koon ja mallin osalta vastata melojan omaa lihasvoimaprofiilia [21].

Melan vedon eri vaiheet

Melonta on syklinen suoritus, johon osallistuu koko hermo- ja lihasjärjestelmä [9], [22]. Kirjallisuus ehdottaa, että melonnan perustekniikka voidaan jakaa eri vaiheisiin. Vuonna 1985 Logan and Holt esittivät ensimmäisten joukossa melontavaiheiden täydellisen analyysin, jakamalla melontasuoritus neljään eri vaiheeseen: (1) catch, (2) pull, (3) exit ja (4) recovery [23]. Myöhemmin julkaistu kirjallisuus tarkentaa, että melonnan perustekniikassa veto voidaan kahteen perusosaan eli liukuvaiheeseen (glide/aerial/recovery) ja voimantuottovaiheeseen (stroke/water) [14], [24], [25]. Voimantuottovaiheen keston on todettu vaihtelevan 60–70 % [26], [27] ja vastaavasti 45-65 % välillä koko vetovaiheen kehosta [6], [20]. Ideaaliosuudeksi perinteisellä melalla vuonna 1979 esitettiin 69 % [28].

Voimantuottovaihe voidaan jakaa kiinniotto- (Catch), teho- (Pull) ja poistovaiheisiin (exit) [24], [25]. Yleensä tarkasteluissa ”Pre-catch” ja ”Catch” yhdistetään pelkäksi Catch-vaiheeksi [14], mutta jos ne eritellään, Pre-catch-vaiheessa lapa upotetaan veteen ja Catch-vaiheessa vedestä haetaan mahdollisimman tukeva ote ennen varsinaista vetoa [24], [25]. Catch-vaiheessa lantio ja hartialinja ovat kiertyneet vedon päälle sekä käsi ojentunut eteen [29]. On myös tärkeää muistaa, että upotusvaiheessa lavan tulee liikkua taaksepäin, jotta se ei jarruta aluksen kulkua [30] (Kuvio 1).



KUVIO 1. Melonnan vetosyklin pää- ja osavaiheet molemmille puolille esitettynä (suomennettu ja mukailtu [24]).

”Pull” eli tehovaiheessa veteen pyritään tuottamaan voimaa tehokkaasti ja nopeasti kiihtyen. Tavoitteena on ”kammata itseään eteenpäin” melan varren ja veteen kiinnittyneen lavan avulla, pyrkien pitämään yläkäsi mahdollisimman stabiilina [29]. Alusta on tärkeää ponnistaa eteenpäin nopeammin kuin itse alus kulkee [30]. Vartalo ja hartialinja kiertyy (rotate) taakse ja kyynärpää pyrkii pysymään ekstensiossa [29]. Vartalon kierron (torso rotation) on todettu olevan tärkeää hyvän suorituskyvyn kannalta [31].

Poistovaiheessa lapa pyritään nostamaan pois vedestä mahdollisimman rennosti ja kajakin kulkua haittaamatta [14], [24]–[26]. Vaikka aluksen nopeuden ja kiihtyvyyden vaihtelua

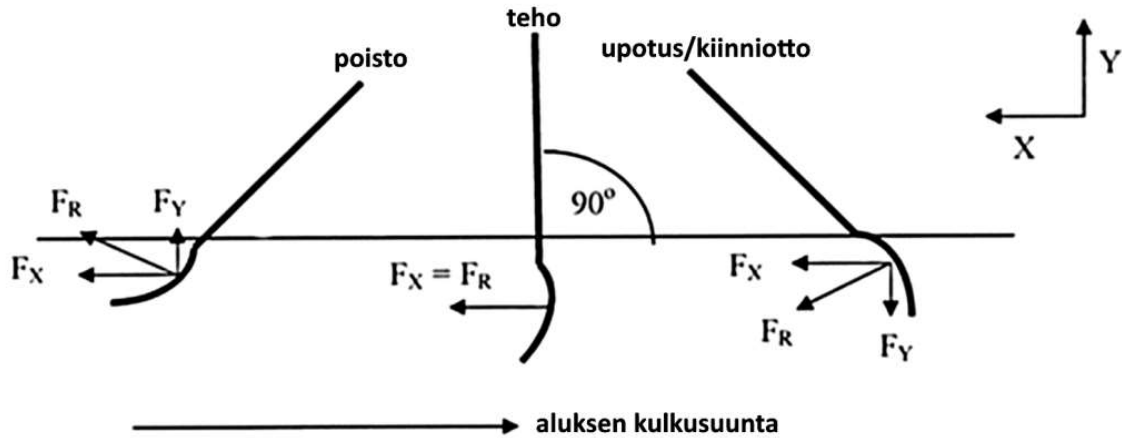
melontasyklin aikana ei ole tutkittu paljon, voidaan todeta, että aluksen nopeus [14], [27], [32], [33] ja kiihtyvyys [6] hidastuvat voimakkaasti liukuvaiheen aikana. Liukuvaiheen aikana ylävartalon lihakset rentoutuvat ja valmistautuvat seuraavaan vetoon [14].

Melan vedon liikerata

Melan lavan liikerata (trajection) ja sen hallinta on tärkeää [34]. Perinteisesti melontakirjallisuudessa on nostettu esille, että tehovaiheen tulee tapahtua mahdollisimman lähellä aluksen pituusakselia, jolloin voimaa tuotetaan pääasiassa eteenpäin ja sivuttaissuuntainen heiluminen vähenee [27], [32].

On kuitenkin todettava, että 80-luvun puolivälissä kehitetyllä [30] kuppimelalla (wing) lavan liikerata on hieman erilainen [9], [27]. Kuppimelan lavan siipimuoto tuottaa perinteisen melaan verrattuna [32] nostevoimaa [30]. Kuppimelalla meloessa tulee vedon liikerata olla hieman kaarevammalla linjalla, siirtyen vedon lopussa ulommas aluksen keskilinjasta [27]. Tämän on todettu pidentävän lavan optimaalista voimantuottoasennon kestoja [30]. Lisäksi jarrutusvoimien on todettu vähenevän [30], [35] ja liikkeiden olevan sujuvampia ja taloudellisuuden olevan parempi [30]. Ratamelonnassa on jo pitkään käytetty kuppimeloja ja niiden on todettu olevan matemaattisen mallinnuksen mukaan noin 15 % tehokkaampia kuin perinteisten tasapintaisten lapojen [35].

Melan liikerataan keskittyneet tutkimukset ovat osoittaneet, että kokeneemmat melojat kykenevät symmetrisempään melontasuoritukseen [27], [36], [37]. On myös havaittu, että kokeneilla melojilla on laajemmat liikeradat kuin kokemattomilla [36]. Tehokkaimmillaan veto on, kun lapa on suurin piirtein pystysuorassa veden pintaan nähden [14], [25], [32] (Kuva 1). Voiman huippu näyttää tapahtuvan hieman ennen pystysuoran asennon saavuttamista [38], [39]. Laskennallisen virtausdynamiikan avulla voidaan osoittaa, että vedon alussa paine on melan lavan kärjessä, mutta siirtyy vedon lopussa keskivaiheille lapa [40].



KUVIO 2. Melanvedon vaiheet ja lavan asento, sekä vedon voimavektorit F_X = voima x-suuntaan, F_Y = voima y-suuntaan, ja F_R = voiman resultantti (suomennettu ja mukailtu [14]).

Kirjallisuuden perusteella voidaan todeta, että voimantuottoprofiilin tulee olla suorakaiteen muotoinen, joka mahdollistaa voiman sujuvan siirtämisen aluksen tasaiseksi kiihtyvyydeksi [11], [15], [26]. Tällöin myös impulssi on suurimmillaan [15], [21]. Jotta suorakaiteen muotoinen voimaprofiili voidaan saavuttaa, tulee melojan tuottaa voimaa nopeasti ja tehokkaasti kun riittävä pito veteen on saavutettu. Toisaalta voimantuotto pitää lopettaa lavan siirryttyä pois optimaalisesta voimantuottoasennosta (kohtisuora vedon pintaan nähden) ja vedestä on syytä poistua mahdollisimman nopeasti ja kulkua haittaamatta [11], [26], [34].

Melan vedon keskeisiä muuttujia, jotka ovat yhteydessä aluksen kulkunopeuteen tai ergometrillä tuotettuun tehoon ovat ainakin voima, teho, frekvenssi, voimantuottoaika, joita on mitattu lukuisissa tutkimuksissa [7], [8], [11], [26], [41]–[43]. Voiman, tehon ja frekvenssi on todettu olevan positiivisesti yhteydessä aluksen nopeuteen ja kiihtyvyyteen [3], [20] kun taas voimantuottoajan yhteys on negatiivinen [3], [20].

Myös vedon impulssia on määritetty [38], [42]. Kun tarkastellaan impulssia tarkemmin, voidaan todeta, että mitä korkeampi on frekvenssi, sitä matalampi on impulssi, jos keskimääräinen vedon voima pysyy vakiona [15]. On vahvoja viitteitä siihen, että paremmat melojat tuottavat suuremmat impulssit, jos frekvenssi vakioidaan ja tämä ero on havaittavissa myös sukupuolten välillä [26]. Tulevaisuudessa tulisi selvittää erityisesti eteenpäin suuntautuvan impulssin ja frekvenssin yhteyksiä [3] (lisää artikkelin lopussa).

Istuma-asento ja keskivartalon merkitys

Melonnassa on tärkeää hallita koko kehoa, sillä voima melonnassa välittyy melojan kehon kautta [15], [45], [46]. Erityisesti vipuvarsien yhteydet (connections) ovat tärkeitä, jotta voima välittyy tehokkaasti alusta eteenpäin vieväksi voimaksi [47]. Keskivartalon heikkous melonnan

voimavaiheen aikana aiheuttaa voiman välittymisessä katkoksen, jolloin voima ei välity tehokkaasti eteenpäin [25].

Jalkapuuhun kohdistuvien voimien on todettu olevan kokeneilla melojilla suurempia kuin kokemattomilla melojilla [7] ja alaraajojen työskentelyn on todettu olevan tärkeää suorituskyvyn kannalta [48]–[51]. Kuten aikaisemmin todettiin, vedon voimantuotto tulee olla luonteeltaan terävää, kun taas jalkapuuhun ja istuimeen kohdistuvat voimat ovat enemmänkin puristavia [52]. Suurimmat jalkapuuhun välittyneet voimat on mitattu 120–150 asteen polvikulmalla [53]. Tutkimuksissa lantion ja jalkojen liikkeellä on todettu olevan perustavanlaatuisen merkityksen aluksen nopeuden ja suorituskyvyn kannalta [29], [54].

Joidenkin tutkimusten mukaan alaselkävammat ovat yleisiä melojien keskuudessa [55]–[57]. Melonnassa lannerangan neutraaliasennon säilyttäminen on tärkeää [58], [59]. Tämän luonnollisen notkon säilyttämiseen lannerangassa saattaa vaikuttaa alaraajojen (hamstring) kireys [60]. Voisi olla viitteitä siitä, että alaraajojen kireyksien poistaminen [61] tai istumiskorkeuden muutos [62] voisi helpottaa paremman istumisasennon ylläpitämistä [59], [62]. Slalom-melojilla tehdyn tutkimuksen mukaan istuin korkeuden säädöllä on havaittu yksilöllisiä parannuksia ja sitä suositellaan kokeiltavaksi [45], [63].

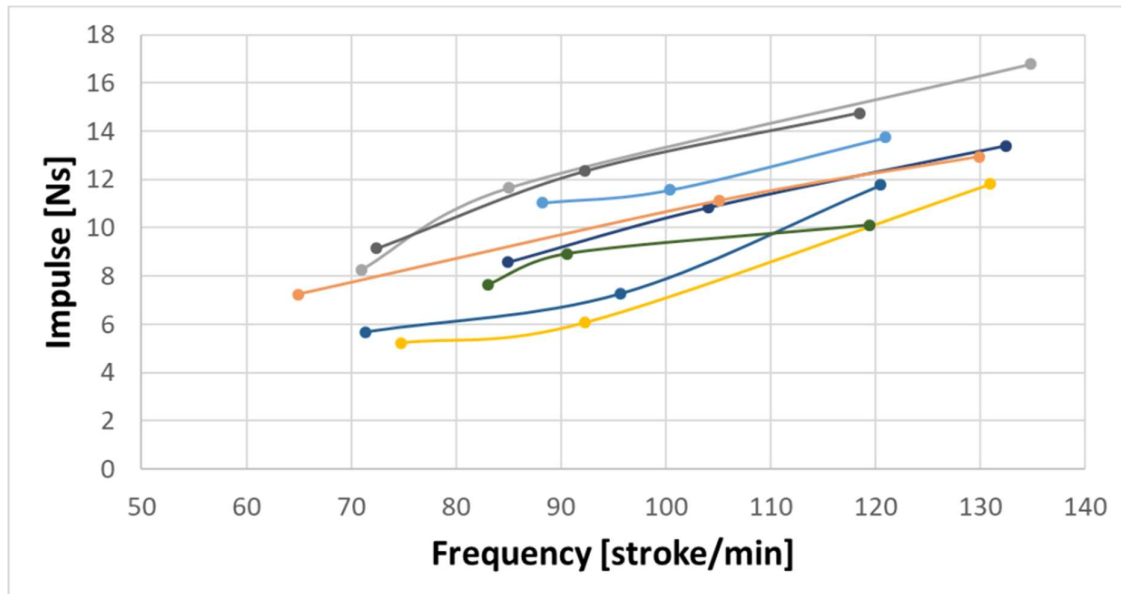
Yhteenveto

Tämän osakatsauksen yhteenvetona voidaan todeta, että melonta on teknisesti haastava kestävyyslaji. Erityisen haastavaksi muodostuu ”lajisuorituksen vapausasteiden” suuri lukumäärä, joka tekee suorituksen kontrolloinnista koko melojan hermo-lihasjärjestelmää kuormittavaa. Tästä syystä tekniikkaharjoitteluun on tärkeää kiinnittää huomiota ja on hyvä pohtia vetosyklin vaiheita omassa melonnassa. Välineiden merkitys on myös hyvin keskeinen ja niiden valintaan sekä erityisesti kokeiluun kannattaa kiinnittää paljon huomiota. Melontatutkimus on kehittynyt aivan viime vuosina paljon ja oletuksena on, että se tulee kehittymään lähivuosina entisestään. Toivottavasti se rantautuu myös laajemmin melonnan eri alalajeihin, antaen spesifimpää tietoa niiden yksilöllisistä vaatimuksista.

Tulevaisuuden tutkimusaiheita ja pohdintaa

Melonnan biomekaniikkaan liittyvät asiat ovat jo kohtalaisen hyvin tiedossa, mutta muutamia mielenkiintoisia aiheita on kuitenkin kirjoittajien harkinnassa. Melonnassa vaikuttaisi olevan keskeinen merkitys voimalla ja sen vaikutusajalla. Impulssi kuvaa mekaniikassa voimaa ja sen vaikutusajan tuloa. Vaikutusaika on keskeisesti yhteydessä melonnan frekvenssiin, eli mitä nopeampi on frekvenssi, sitä lyhyempi on myös voimantuoton vaikutusaika (per veto). Tulevaisuuden tutkimusasetelmissä olisikin oleellista tutkia impulssin eri komponenttien (x, y, z) ja melontafrekvenssin yhteyttä. Lajianalyysin kannalta tähän olisi tärkeää yhdistää eri

tasoisten melojien vertailua ja suorituksen taloudellisuuden tarkastelua. Aikaisemmin julkaisemattomassa tuloksessa asiaa on selvitetty epäsuorasti. Inertiamittausyksiköllä tehdyssä tutkimuksessa [3] tutkittavat tekivät kolme melontasuoritusta eri intensiteeteillä (myös frekvenssillä). Kuviosta 3 nähdään että ”frekvenssi – eteenpäin suuntautuva impulssi” - tarkastelussa on havaittavissa eroa melojien (n = 8) välillä.



KUVIO 3. Aikaisemmin julkaisematon tulos [3]. Kolmen melontasuorituksen (PK,VK,MK = pallot) frekvenssin ja absoluuttisen eteenpäin suuntautuvan impulssin yhteys mitattuna inertiamittausyksiköllä (Trainesense SmartPaddle).

Tässä kirjoituksessa käsitellään melonnan biomekaniikkaa, mekaniikkaa ja kinematiikka yleisestä näkökulmasta. Suurin osa tutkimuksista keskittyy kilpamelontaa (rata/slalom), joten yleistäminen kaikkiin melonnan alalajeihin sisältää monia rajoituksia. Katsaus ei ole systemaattinen, sillä tutkimukset ovat valikoituneet niiden laadun ja aiheen rajauksen mukaisesti. Pohdintaa jatketaan osassa II, jossa käsitellään melojien antropometriaa, hyötysuhdetta/taloudellisuutta, välineiden säätöä ja eri tasoisten melojien eroja.

Antti Löppönen, LitM, TtM, VAT, ft.
Väitöskirjatutkija
Jyväskylän Yliopisto, KU Leuven, Belgia
antti.ej.lopponen@jyu.fi

Julkaistu 17.12.2020

Lähteet

- [1a] R. Lehtinen. Melontavalmennuksen käsikirja, 1991.
- [1b] H. Mononen and J. Viitasalo, "Stroke parameters and kayak speed during 200m kayaking." Research Institute for Olympic Sports, Jyväskylä, Finland, 1995.
- [2] M. Haverinen, "Jalkojen voima, iskun voima ja melonnan ajoitus nuorilla ja kokeneilla melojilla melontaergometrissa.," Biomekaniikan Pro gradu -tutkielma. Liikuntatieteellinen tiedekunta. Jyväskylän Yliopisto., 2017.
- [3] A. Löppönen, "Inertiamittausyksiköllä mitattujen melan vedon keskeisten muuttujien vaikutus kajakin kulkunopeuteen.," Biomekaniikan Pro gradu -tutkielma. Liikuntatieteellinen tiedekunta. Jyväskylän Yliopisto., 2020.
- [4] M. Li, "The Progress of Biomechanical Researches in Kayaking," *Yangtze Med.*, vol. 01, no. 01, pp. 30–44, 2017, doi: 10.4236/ym.2017.11004.
- [5] A. Umek and A. Kos, "Wearable sensors and smart equipment for feedback in watersports," in *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 129, pp. 496–502, doi: 10.1016/j.procs.2018.03.030.
- [6] V. Bonaiuto, G. Gatta, C. Romagnoli, P. Boatto, N. Lanotte, and G. Annino, "A pilot study on the e-kayak system: A wireless DAQ suited for performance analysis in flatwater sprint kayaks," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 2, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/s20020542.
- [7] B. Tornberg, P. Håkansson, I. Svensson, and P. Wollmer, "Forces applied at the footrest during ergometer kayaking among female athletes at different competing levels – A pilot study," *BMC Sports Sci. Med. Rehabil.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1186/s13102-018-0113-5.
- [8] F. Nates and F. Colloud, "A 6-Component Paddle Sensor To Estimate Kayaker's Performance: Preliminary Results," *33rd Int. Conf. Biomech. Sport.*, pp. 683–686, 2015.
- [9] D. López-Plaza Palomo, "The effect of seat type on stroke kinematics and trunk rotator activity during kayak ergometer paddling," no. September, 2013, [Online]. Available: http://eprints.lincoln.ac.uk/14684/1/_ddat02_staffhome_jpartridge_López-Plaza-Daniel-Sports-Science-Sept-2013.pdf.
- [10] P. W. Kong, C. S. Tay, and J. W. Pan, "Application of instrumented paddles in measuring on-water kinetics of front and back paddlers in k2 sprint kayaking crews of various ability levels," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 21, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/s20216317.
- [11] P. W. Macdermid, C. Gilbert, and J. Jayes, "Using a kayak paddle power-meter in the sport of whitewater slalom," *J. Hum. Sport Exerc.*, vol. 15, no. 1, 2019, doi: 10.14198/jhse.2020.151.10.
- [12] P. W. MacDermid, A. Osborne, and S. R. Stannard, "Mechanical work and physiological responses to simulated flat water Slalom Kayaking," *Front. Physiol.*, vol. 10, no. MAR, pp. 1–9, 2019, doi: 10.3389/fphys.2019.00260.
- [13] M. G. Robinson, L. E. Holt, and T. W. Pelham, "The technology of sprint racing canoe and kayak hull and paddle designs," *Int. Sport. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 68–85, 2002.
- [14] J. S. Michael, R. Smith, and K. B. Rooney, "Determinants of kayak paddling performance," *Sport. Biomech.*, vol. 8, no. 2, pp. 167–179, 2009, doi: 10.1080/14763140902745019.

- [15] J. Baker, "The Evaluation of Biomechanic Performance Related Factors and On-Water Tests," *Int. Semin. Kayak. Coach. Sci.*, no. November, pp. 50–66, 1998.
- [16] S. Seiler, "A biomechanical review of factors affecting rowing performance: Commentary," *Br. J. Sports Med.*, vol. 36, no. 6, p. 402, 2002.
- [17] B. Sanderson and W. Martindale, "Towards optimizing rowing technique," *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 18, no. 4, pp. 454–468, 1986, doi: 10.1249/00005768-198608000-00016.
- [18] A. Blazeovich, *Sports biomechanics: the basics: optimising human performance*, 3rd edition. New York: Bloomsbury, 2017.
- [19] V. R. Mantha, A. J. Silva, D. A. Marinho, and A. I. Rouboa, "Numerical simulation of two-phase flow around flatwater competition kayak design-evolution models," *J. Appl. Biomech.*, vol. 29, no. 3, pp. 270–278, 2013, doi: 10.1123/jab.29.3.270.
- [20] M. B. Brown, M. Lauder, and R. Dyson, "Notational analysis of sprint kayaking: Differentiating between ability levels," *Int. J. Perform. Anal. Sport*, vol. 11, no. 1, pp. 171–183, 2011, doi: 10.1080/24748668.2011.11868538.
- [21] E. Sprigings, P. McNair, G. Mawston, D. Sumner, and M. Boocock, "A method for personalising the blade size for competitors in flatwater kayaking," *Sport. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 147–153, 2006, doi: 10.1007/bf02844116.
- [22] M. Begon, F. Colloud, and P. Sardain, "Lower limb contribution in kayak performance: Modelling, simulation and analysis," *Multibody Syst. Dyn.*, vol. 23, no. 4, pp. 387–400, 2010, doi: 10.1007/s11044-010-9189-8.
- [23] S. Logan and L. Holt, "Sports performance series: The flatwater kayak stroke," *Strength Cond. J.*, 1985.
- [24] L. K. McDonnell, P. Hume, and V. Nolte, "An observational model for biomechanical assessment of sprint kayaking technique," no. November, 2012, doi: 10.1080/14763141.2012.724701.
- [25] A. Nikonorov, "Paddling technique for 200m sprint kayak." Teoksessa M. Isorna, F. & Alacid, J.J. (toim.). 2015. Training sprint canoeing. Progress in improving the physical, technical, tactical, psychological, nutritional and technological preparation. 2.0 Editor. Espanja., 2015.
- [26] B. Gomes, N. Ramos, F. Conceição, R. Sanders, M. Vaz, and J. P. Vilas-Boas, "Paddling force profiles at different stroke rates in elite sprint kayaking," *J. Appl. Biomech.*, vol. 31, no. 4, pp. 258–263, 2015, doi: 10.1123/jab.2014-0114.
- [27] S. J. Kendal and R. H. Sanders, "The Technique of Elite Flatwater Kayak Paddlers Using the Wing Paddle," *Int. J. Sport Biomech.*, vol. 8, no. 3, pp. 233–250, 1992, doi: 10.1123/ijsb.8.3.233.
- [28] S. Plagenhoef, "Biomechanical analysis of olympic flatwater kayaking and canoeing," *Res. Q. Am. Alliance Heal. Phys. Educ. Recreat. Danc.*, vol. 50, no. 3, pp. 443–459, 1979, doi: 10.1080/00345377.1979.10615632.
- [29] M. Ben Brown, "Biomechanical Analysis of Flatwater Sprint Kayaking," PhD Thesis, Univ. Chichester., 2009.
- [30] R. H. Sanders and J. D. Baker, "Evolution of technique in flatwater kayaking," *Science and Practice of Canoe/Kayak*. pp. 67–81, 1998.
- [31] C. A. Wassinger, "Biomechanical and Physical Characteristics of Whitewater Kayakers with and without Shoulder Pain," PhD Thesis, Univ. Pittsburgh, 2007.

- [32] R. V. Mann and J. T. Kearney, "A biomechanical analysis of the olympic-style flatwater kayak stroke," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 12, no. 3, pp. 183–188, 1980, doi: 10.1249/00005768-198023000-00010.
- [33] D. Pendergast, J. Mollendorf, P. Zamparo, A. Termin, D. Bushnell, and D. Paschke, "The influence of drag on human locomotion in water," *Undersea Hyperb. Med.*, vol. 32, no. 1, pp. 45–57, 2005.
- [34] D. Sumner, E. J. Sprigings, J. D. Bugg, and J. L. Heseltine, "Fluid forces on kayak paddle blades of different design," *Sport. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 11–19, 2003, doi: 10.1007/bf02844156.
- [35] P. S. Jackson, "Performance prediction for olympic kayaks," *J. Sports Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 239–245, 1995, doi: 10.1080/02640419508732233.
- [36] E. Limonta et al., "Tridimensional kinematic analysis on a kayaking simulator: Key factors to successful performance," *Sport Sci. Health*, vol. 6, no. 1, pp. 27–34, 2010, doi: 10.1007/s11332-010-0093-7.
- [37] R. J. N. Helmer, A. Farouil, J. Baker, and I. Blanchonette, "Instrumentation of a kayak paddle to investigate blade/water interactions," *Procedia Eng.*, vol. 13, pp. 501–506, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.05.121.
- [38] D. A. Aitken and R. J. Neal, "An On-Water Analysis System for Quantifying Stroke Force Characteristics during Kayak Events," *Int. J. Sport Biomech.*, vol. 8, no. 2, pp. 165–173, 2016, doi: 10.1123/ijsb.8.2.165.
- [39] N. Fleming, B. Donne, D. Fletcher, and N. Mahony, "A biomechanical assessment of ergometer task specificity in elite flatwater kayakers," *J. Sport. Sci. Med.*, vol. 11, no. 1, pp. 16–25, 2012.
- [40] D. Morgoch, C. Galipeau, and S. Tullis, "Sprint Canoe Blade Hydrodynamics-Modeling and On-water Measurement," *Procedia Eng.*, vol. 147, pp. 299–304, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.295.
- [41] B. Gomes, N. Viriato, R. Sanders, F. Conceição, and M. Vaz, "Analysis of the on-water paddling force profile on an elite kayaker," *Port. J. Sport Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 259–262, 2011.
- [42] L. Niu et al., "Evaluating on-water kayak paddling performance using optical fiber technology," *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 24, pp. 11918–11925, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2927304.
- [43] M. Therrien, F. Colloud, and M. Begon, "Effect of stroke rate on paddle tip path in kayaking," *Mov. Sport. Sci. – Sci. Mot.*, vol. 75, no. 1, pp. 113–120, 2012, doi: 10.1051/sm/2011156.
- [44] R. Enoka, "Neuromechanics of Human Movement," *Human Kinetics*, 2008.
- [45] K. B. Ong, T. R. Ackland, P. A. Hume, B. Ridge, E. Broad, and D. A. Kerr, "Kayak: Equipment set-up among Olympic sprint and slalom Kayak paddlers," *Sport. Biomech.*, vol. 4, no. 1, pp. 47–58, 2005, doi: 10.1080/14763140508522851.
- [46] R. W. Fry and A. R. Morton, "Physiological and kinanthropometric attributes of elite flatwater kayakists," *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 23, no. 11, pp. 1297–1301, Nov. 1991, doi: 10.1249/00005768-199111000-00016.

- [47] C. Bulgan, G. Ersoz, B. M. Bingul, S. Mengutay, and M. Aydin, "Three- Dimensional angular kinematics of 200m flat-water sprint kayaking," *Acta Medica Mediterr.*, vol. 33, no. 2, pp. 291–294, 2017, doi: 10.19193/0393-6384_2017_2_043.
- [48] J. E. Nilsson and H. G. Rosdahl, "New devices for measuring forces on the kayak foot bar and on the seat during flat-water kayak paddling: A technical report," *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, vol. 9, no. 2, pp. 365–370, 2014, doi: 10.1123/IJSPP.2012-0333.
- [49] J. E. Nilsson and H. G. Rosdahl, "Contribution of leg-muscle forces to paddle force and kayak speed during maximal-effort flat-water paddling," *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, vol. 11, no. 1, pp. 22–27, 2016, doi: 10.1123/ijssp.2014-0030.
- [50] A. Bjerkefors, J. S. Rosén, O. Tarassova, and A. Arndt, "Three-Dimensional Kinematics and Power Output in Elite Para-Kayakers and Elite Able-Bodied Flat-Water Kayakers," *J. Appl. Biomech.*, vol. 35, pp. 93–100, 2019.
- [51] N. Petrone, A. Isotti, and G. Guerrini, "Biomechanical analysis of olympic kayak athletes during indoor paddling," in *The Engineering of Sport 6*, vol. 1, Springer New York, 2006, pp. 413–418.
- [52] M. Begon, F. Colloud, and P. Lacouture, "Measurement of contact forces on a kayak ergometer with a sliding footrest-seat complex," *Sport. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 67–73, 2008, doi: 10.1007/s12283-008-0011-2.
- [53] C. H. Lee and K. J. Nam, "Analysis of the kayak forward stroke according to skill level and knee flexion angle," *Int. J. Bio-Science Bio-Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 41–48, 2012.
- [54] M. B. Brown, M. Lauder, and R. Dyson, "Activation and contribution of trunk and leg musculature to force production during on-water sprint kayak performance.," *ISBS-Conference*, 2010.
- [55] H. Pasanen, J. Sinkko, and H. Mehtänen, "Kilpamelojien alaselkävaivojen ennaltaehkäisy harjoitteluohjelman sekä oppaan avulla," 2018.
- [56] D. Abraham and N. Stepkovitch, "The Hawkesbury Canoe Classic: Musculoskeletal injury surveillance and risk factors associated with marathon paddling," *Wilderness Environ. Med.*, vol. 23, no. 2, pp. 133–139, 2012, doi: 10.1016/j.wem.2012.02.014.
- [57] C. Powell, "Injuries and medical conditions among kayakers paddling in the sea environment," *Wilderness Environ. Med.*, vol. 20, no. 4, pp. 327–334, 2009, doi: 10.1580/1080-6032-020.004.0327.
- [58] G. A. Mawston and M. G. Boocock, "Lumbar posture biomechanics and its influence on the functional anatomy of the erector spinae and multifidus," *Phys. Ther. Rev.*, vol. 20, no. 3, pp. 178–186, 2015, doi: 10.1179/1743288X15Y.0000000014.
- [59] T. Abelleira-Lamela, R. Vaquero-Cristóbal, F. Esparza-Ros, and P. J. Marcos-Pardo, "Biomechanical Adaptations in Kayakers of Different Competitive Levels and the Relationship with the Kayak Elements," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 23, p. 8389, 2020, doi: 10.3390/app10238389.
- [60] P. A. López-Miñarro and F. Alacid, "Influence of hamstring muscle extensibility on spinal curvatures in young athletes," *Sci. Sport.*, vol. 25, no. 4, pp. 188–193, 2010, doi: 10.1016/j.scispo.2009.10.004.
- [61] N. González-Gálvez, P. J. Marcos-Pardo, H. Trejo-Alfaro, and R. Vaquero-Cristóbal, "Effect of 9-month Pilates program on sagittal spinal curvatures and hamstring extensibility in

adolescents: randomised controlled trial,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-66641-2.

[62] J. M. Muyor, F. Alacid, and P. López-Miñarro, “Influence of hamstring muscles extensibility on spinal curvatures and pelvic tilt in highly trained cyclists,” *J. Hum. Kinet.*, vol. 29, no. 1, pp. 15–23, 2011, doi: 10.2478/v10078-011-0035-8.

[63] S. A. L. Broomfield and M. Lauder, “Improving paddling efficiency through raising sitting height in female white water kayakers,” *J. Sports Sci.*, vol. 33, no. 14, pp. 1440–1446, Aug. 2015, doi: 10.1080/02640414.2014.992935.