

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ŠPORT

**DIPLOMSKO DELO / DIPLOMSKA
NALOGA**

TILEN BARBARIČ

Ljubljana, 2015

UNIVERZA V LJUBLJANI

FAKULTETA ZA ŠPORT

Kineziologija

**UPORABA INERCIALNE OBLEKE MVN ZA IZRAČUN SILE REAKCIJE
PODLAGE V ALPSKEM SMUČANJU**

DIPLOMSKO DELO/DIPLOMSKA NALOGA

MENTOR

izr. prof. dr. Matej Supej, univ. dipl. fiz.

SOMENTOR

izr. prof. dr. Blaž Lešnik, prof. šp. vzg.

RECENZENT

prof. dr. Milan Žvan, prof. šp. vzg.

Avtor dela

TILEN BARBARIČ

Ljubljana, 2015

ZAHVALA ALI POSVETILO

Ključne besede: alpsko smučanje, merjenje sil, inercialni sistem, pritiskovne plošče.

UPORABA INERCIALNE OBLEKE MVN ZA IZRAČUN SILE REAKCIJE PODLAGE V ALPSKEM SMUČANJU

Tilen Barbarič

IZVLEČEK

Alpsko smučanje je dinamičen šport, ki temelji na delovanju sil. Te so vzrok za gibanje. Poznavanje sil je osnova za razumevanje alpskega smučanja in smučanja nasploh. Nameni meritev sil v alpskem smučanju so različni. Njihov namen je lahko preprečevanje poškodb, razvoj opreme ali optimizacija smučarske tehnike.

V preteklosti so bili obravnavani že trije različni sistemi za merjenje sile reakcije podlage v alpskem smučanju. Tako so za namene merjenja sile reakcije podlage bili uporabljeni sistem pritiskovnih plošč, sistem pritiskovnih vložkov in 3D kinematika, ki temelji na sistemu kamer. Namen tega raziskovalnega dela je bilo primerjati novejši inercialni sistem MVN s sistemom pritiskovnih plošč. Na podlagi dosedanjih raziskovanj in ugotovitev je bilo smiselno oblikovati hipotezo, da bosta sistema primerljiva.

V 6 vožnjah z različnimi tehnikami smučanja so bili v sistemu MVN zajeti podatki s frekvenco 120 Hz in v sistemu pritiskovnih plošč s 500 Hz. Izmerjene sile so pokazale visoke, zelo močne korelacije. Na podlagi tega sklepamo, da so razlike v absolutnih vrednostih posledice sistemskih napak zaradi kalibracije, sinhronizacije in obdelave podatkov. Slabšo korelacijo sta pokazali zgolj vožnji, kjer je smučar uporabil širši tip smučí, kar smo pripisali težavi s pritiskovnimi ploščami. Prav tako je bilo zaznati razliko v velikosti sil pri zaustavljanju v plužni položaj. Posledično je bilo ugotovljeno, da sistem MVN ne zazna nasprotujočih si sil, ki se pojavijo med levo in desno smučko ob njuni postavitvi v plužni položaj.

Na podlagi izračunanih podatkov smo ugotovili, da sta sistema primerljiva za terensko merjene sile reakcije podlage v alpskem smučanju.

Key words: alpine skiing, force measurement, inertial system, force plates.

USE OF INERTIAL SYSTEM MVN TO CALCULATE GROUND REACTION FORCES IN ALPINE SKIING

Tilen Barbarič

ABSTRACT

Alpine skiing is a highly dynamic sport which depends on the external force acting resulting in motion. To understand the forces means understanding the principles of alpine skiing and skiing in general. The aims of force measurements in alpine skiing are diverse and can lead to injury prevention, the development of new equipment or an optimally improved ski technique.

In the past three different systems for the ground reaction force measurements were already applied - the force plate system, the pressure insole system and video-based 3D kinematic systems. The aim of this study was to compare the latest inertial measurement data MVN to the force plate system. Based on the data acquisition and findings it was logical to make a research hypothesis that the systems are comparable.

In six ski runs where different ski techniques were tested the MVN system included the data with the frequency of 120 Hz in the force plate system with 500 Hz. The determined forces showed high and strong correlations, which leads to the assumption that the differences in absolute values are the result of the system errors due to calibration, synchronisation and data processing. A weaker correlation was calculated only in the run where a skier used wide skis, a difficulty being the use of force plates. Another difference was spotted in the amount of forces when a skier wanted to stop with a snowplough turn, which led to the conclusion that the MNV system does not detect the opposing forces which emerge between the left and the right ski in the snowplough position.

Based on the data collection it was concluded that the systems are comparable for the ground reaction measurements in alpine skiing.

KAZALO VSEBINE

1. UVOD.....	8
1.1 ZGODOVINA BIOMEHANSKIH MERITEV ALPSKEGA SMUČANJA	8
1.2 SILE	9
1.2.1 SILA TEŽE.....	10
1.2.2 ZRAČNI UPOR.....	10
1.2.1 SILA REAKCIJE PODLAGE	11
1.3 PREDMET IN PROBLEM	12
1.4 CILJI IN HIPOTEZE.....	14
2. METODE DELA	15
2.1 PREIZKUŠANEC	15
2.2 PRIPOMOČKI	15
2.2.1 INERCIALNI SISTEM MVN.....	15
2.2.2 PRITISKOVNE PLOŠČE	15
2.3 POSTOPEK	15
2.3.1 OBDELAVA PODATKOV.....	17
3. REZULTATI	20
3.1 SMUČANJE S KRAJŠIMI ZAVOJI S KOMBINIRANO TEHNIKO	21
3.2 SMUČANJE Z DALJŠIMI ZAVOJI Z ZAREZNO TEHNIKO	22
3.3 VOŽNJA NARAVNOST IN ZAUSTAVLJANJE V PLUŽNI POLOŽAJ.....	23
4. RAZPRAVA	25
5. SKLEP	26
6. VIRI.....	27

KAZALO SLIK

Slika 1: Sile pri smučanju (Brodie, 2009).	10
Slika 2: Prikaz gibalne akcije za sinhronizacijo (osebni arhiv).....	18
Slika 3: Grafični prikaz izmerjenih sil pri vožnji.....	20
Slika 4: Korelacija za vožnjo MVN_day2_measurement_07.	21
Slika 5: Grafični prikaz krajših zavojev s kombinirano tehniko.	21
Slika 6: Grafični prikaz daljših zavojev z zarezno tehniko.	22
Slika 7: Grafični prikaz vožnje naravnost in zaustavljanja v plužni položaj; day2_measurement05.....	23
Slika 8: Grafični prikaz vožnje naravnost in zaustavljanja v plužni položaj; day2_measurement07	24

KAZALO TABEL

Tabela 1: Obdobje biomehanskih analiz alpskega smučanja.....	9
Tabela 2: Pregled voženj in uporabljenih načinov smučanja.....	17
Tabela 3: Paired Samples T-test, smučanje s krajšimi zavoji s kombinirano tehniko.	22
Tabela 4: Paired Samples T-test, smučanje z daljšimi zavoji z zarezno tehniko	23
Tabela 5: Paired Samples T-test, vožnja naravnost in zaustavljanje v plužni položaj.	24

1. UVOD

Alpsko smučanje oziroma smučanje, kot ga radi poimenujemo, je dinamičen šport na prostem. Za uspešno upravljanje smuči po smučišču mora smučar uspešno kljubovati silam, ki delujejo nanj. Za razumevanje in določanje vpliva teh sil jih je smiselno meriti. Šport kot tak je s sočasnim razvojem tehnike in znanja deležen napredka v razumevanju tehnike smučanja, vplivov podnebja in vplivov zunanjih sil, ki delujejo na smučarja. Kot v drugih športih se s pomočjo različnih meritev skuša poiskati parametre, ki na eni strani prinesejo stotinko prednosti pred drugimi tekmovalci v tekmovalnem športu in na drugi strani poškodbo manj v rekreativnem športu. Z opisovanjem, merjenjem in razlago pojavov ter vzrokov za gibanje v športu se ukvarja biomehanika.

»Biomehanika je po definiciji znanost, ki raziskuje in se ukvarja z mehaniko živih organizmov. Kot taka je interdisciplinarna ter združuje mehaniko in biologijo. Kljub temu, da se je biomehanika zgodovinsko ukvarjala predvsem z osnovami zakonitosti gibanja, kot so težišče telesa, pomen krčenja mišic za gibanje segmentov, aerodinamike letenja ptic in insektov, hidrodinamike plavanja rib, je danes to področje bistveno širše. Poleg funkcionalnega razumevanje makro gibanja človeka in živali zajema biomehanika tudi mehanske lastnosti in funkcijo tkiv ter celic, mehanske lastnosti in obnašanje organov, npr. dihal, slušnega aparata, krvnih obtočil« (Supej, 2011:10).

V diplomskem delu bom skušal oceniti primernost povratne informacije v alpskem smučanju s stališča biomehanike. Potek povratne informacije je razdeljen iz-na več korakov. Najprej opazujemo izvedbo z lastnimi čutili – torej z očmi, včasih tudi z ušesi. Nato se signali iz naših čutil prenesejo v možgane, kjer jih primerjamo z našimi izkušnjami in znanjem. Narava rezultata je kvalitativna in omejena z opazovalčevimi izkušnjami in znanjem. Povratna informacija je omejena z zmogljivostjo človeških čutil. S tehnološkim razvojem se je tudi kvaliteta povratne informacije v smučanju izboljšala. Posledica merjenj s številnimi različnimi senzorji in merilnimi inštrumenti so kardinalni podatki objektivne narave. Po zajemanju podatkov sledi faza procesiranja, ki se opravi v računalniku (izračuni in obdelava podatkov). Sledi le še analiza podatkov, ki izmerjene parametre spremeni v informacijo, koristno za športnika.

1.1 ZGODOVINA BIOMEHANSKIH MERITEV ALPSKEGA SMUČANJA

Za razumevanje biomehanskih meritev alpskega smučanja se je smiselno ozreti tudi v preteklost. Zgodovina raziskav na področju biomehanike smučanja bo morda marsikaterega laika presenetila. Erich Müller in Hermann Schwameder (2003) sta objavila delo, ki zajema tudi »kratek« opis zgodovine biomehanskih analiz alpskega smučanja. Opis je zajemal preko 90 znanstveno raziskovalnih virov.

Tabela 1:
Obdobje biomehanskih analiz alpskega smučanja

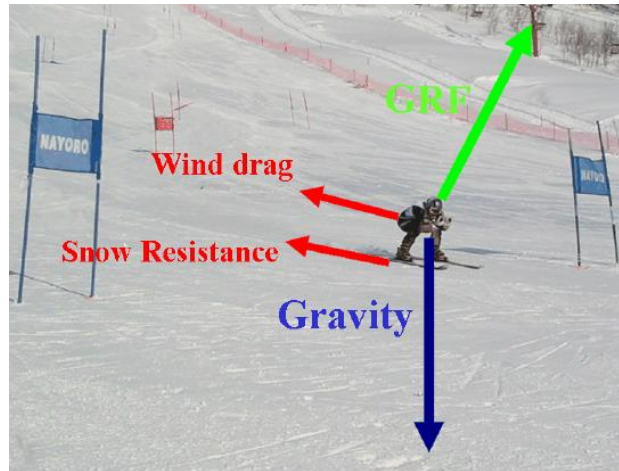
Obdobje	Namen
1930 do danes	<i>Kvantitativni opisi</i>
1957 do danes	<i>Kvalitativni opisi</i>
1980 do danes	<i>Optimizacija tehnike in preprečevanje poškodb</i>

Avtorja sta zgodovino analiz razdelila v 3 obdobja, kot je prikazano v Tabeli 1.

Za prvo obdobje (1930 do danes) je značilno predvsem beleženje gibalnih vzorcev in razprave o silah, ki se pojavljajo pri smučanju (Brandenberger, 1934; Hatze, 1966; Howe, 1983; Lind in Sanders, 1997). Drugo obdobje avtorja opisujeta kot uporabo biomehanskih analiz oziroma meritev za opisovanje tehnike smučanja (Müller, 1994; Raschner et al., 2001). Prva meritev, ki je bila narejena, je merila silo reakcije podlage. V tretjem obdobju pa je raziskovalce zanimala predvsem optimizacija tehnike in preprečevanje poškodb. Natančneje to pomeni uporabo analiz in matematičnega modeliranja za merjenje, ocenjevanje in napovedovanje izboljšav. Nekateri so tako raziskovali skrajšanje časa zaradi aerodinamičnih položajev (Kaps, Nachbauer in Mossner, 1996), drugi (Casolo, Lorenzi, Vallatta in Zappa, 1997; Margane, Trzecinski, Babel in Neumaier, 1998) so raziskovali vpliv geometrije smučke na trajektorijo smučanja. Nekateri pa so se osredotočili na merjenje obremenitev v sklepih (Klous et al., 2014) v namen preprečevanja in razumevanja poškodb pri alpskem smučanju (Brucker et al., 2014).

1.2 SILE

»V smučanju stil smučanja ne določa rezultata, določa ga delovanje oziroma obvladovanje zunanjih sil, ki delujejo na smučarja« (Brodie, 2009). Stil se sicer ocenjuje v prostem slogu in ponekod v ekstremnih tekmovalnih disciplinah alpskega smučanja. Vendar v tekmovalnem alpskem smučanju (slalom, veleslalom, superveleslalom, smuk) stila ne ocenjujemo. Kljub temu pa se trenerji pogosto ukvarjajo s stilom smučanja tekmovalca, namesto da bi obravnavali tehniko smučanja. Tehnika smučanja je rezultat srečevanja smučarja z zunanjimi in notranjimi silami. Zato je za iskanje optimalne tehnike, ki pomeni boljši rezultat na tekmovanju, smiselno raziskovati delovanje sil na smučarja. Zunanje sile, ki delujejo na smučarje v času smučanja, so sila teže, zračni upor, sila trenja in sila reakcije podlage.



Slika 1: Sile pri smučanju (Brodie, 2009).

Na Sliki 1 so prikazane sile, ki delujejo na smučarja pri vožnji naravnost.

Sila teže, zračni upor in sila trenja določajo najvišjo hitrost v smeri smučanja po vpadnici. Supej et al. (2013) v analizi vpliva zračnega upora na izgubo energije smučarja v veleslalomu ugotavljajo, da gre le majhen del izgube energije pripisati sili zračnega upora. Večji delež k izgubi energije prispeva sila trenja med smučko in snežno podlago, ki vključuje tudi način vodenja smučí, ki ni optimalen. Optimalno in učinkovito smučanje zahteva od smučarja učinkovito uporabo potencialne energije, sposobnost najučinkovitejšega zmanjšanja zračnega upora in trenja ob vzdrževanju najvišje možne hitrosti ter izbiro optimalne trajektorije smučanja, kot ugotavljajo Héber-Losier, Supej in Holmeberg (2013). Za obvladovanje sil, ki delujejo na smučarja, pa je poleg tehnike in taktike smučarja pomembna tudi njegova telesna kondicija, prav tako pa tudi pravilna izbira opreme.

1.2.1 SILA TEŽE

Sila teže oziroma sila gravitacije je sila, s katero Zemlja privlači k sebi vsa telesa, katerih masa ni enaka nič. Enaka je zmnožku mase in gravitacijskega pospeška. Smer sile teže je enaka smeri gravitacijskega pospeška in kaže proti središču Zemlje. V smučanju je opisana kot primarna pospeševalna sila smučarja, ko le-ta potuje po klancu navzdol. Silo teže razdelimo na dinamično in statično komponento. Dinamična komponenta sile teže je vzporedna s podlago in povzroča pospeševanje smučarja. Statična komponenta pa je pravokotna na podlago in potiska smučarja k tlom.

1.2.2 ZRAČNI UPOR

Smer sile zračnega upora nasprotuje smeri gibanja smučarja. Smučarji skušajo ohraniti čim nižjo silo zračnega upora. To storijo z iskanjem aerodinamičnega položaja, ki ga trenirajo in merijo v zračnih tunelih. Zračni upor je v primeru smučanja

kvadratno sorazmeren s hitrostjo gibanja smučarja. Barelle, Ruby in Tavernier (2004) ugotavljajo, da je pri visokih hitrostih (>25 m/s) sila zračnega upora največja zaviralna sila, ki deluje na smučarja. Silo zračnega upora pri alpskem smučanju so raziskovali tudi Kaps, Nachbauer in Mössner (1996). Zračni upor so prvič na terenu izmerili Meyer, Le Pelley in Borrani (2012). Supej et al. (2013) so raziskovali vpliv zračnega upora na uspešnost smučarja.

1.2.1 SILA REAKCIJE PODLAGE

Silo reakcije podlage najboljše opišemo, če povemo, da s tolikšno silo, kakor smučar deluje na podlago, z enako nasprotno silo deluje podlaga na smučarja. Je direktno povezana s tehniko smučanja in lahko povzroča pospeševanje ali zaviranje ter tako vpliva na spremembo smeri smučanja (Brodie, 2009). Komponenti sile reakcije podlage predstavljata sila trenja in normala, ki je po Newtonovem zakonu o akciji-reakciji nasprotno enaka statični komponenti sile teže.

Sila trenja se pojavi, ko eno telo drsi po drugem. Ko gre za smučanje, je to kontakt med smučmi in snežno podlago. Ob drsenju enega telesa po drugem prihaja do sile, ki se temu drsenju upira. To silo imenujemo sila trenja. Smer delovanja sile je v nasprotni smeri drsenja telesa in je vzporedna s podlago. Poznamo statično trenje oziroma silo lepenja, ki se pojavlja, ko je relativna hitrost med telesoma enaka nič, in kinetično trenje, ko relativna hitrost ni enaka nič. Sila trenja je enaka zmnožku normalne sile in koeficienta lepenja. Da bi smučarji zmanjšali silo trenja, ki povzroča zaviranje, izbirajo različne priprave smuči. Izbira smuči je odvisna od vremenski razmer in je v tekmovalnem smučanju prepuščena strokovnjakom za pripravo smuči. Ti so seznanjeni z različnimi testirani materialov pri različnih vremenskih in snežnih pogojih (temperatura zraka in snega, relativna vlažnost v zraku, struktura kristalov snega, ...). Kot trenje se v smučanju obravnava tudi oddrsavanje smuči med zavijanjem. Med oddrsavanjem prihaja do nekoliko drugačnega stika med snežno podlago in smučmi. Smuči namreč brusijo oziroma režejo sneg. Številne raziskave na področju sile trenja v alpskem smučanju se ukvarjajo z vplivom temperature snega, obremenitve, sončne radiacije itd. (Kaps, Nachbauer in Mössner (1996), Buhl, Faure in Rhyner (2001), Colbeck in Perovich (2004), Strausky, Krenn, Leitner in Aussenegg (1998), Nordt, Springer in Kollár (1999), Heinrich, Mössner, Kaps in Nachbauer (2010)).

1.3 PREDMET IN PROBLEM

Za merjenje sile reakcije podlage obstajajo v alpskem smučanju trije načini merjenja sil: prvi način je preko t. i. pritiskovnih plošč, ki temeljijo na dinamometrih. Sistem meri sile med smučko in smučarskim čevljem. Merilni senzori so lahko nameščeni ali med smučko in vezmi ali med vezmi in smučarskim čevljem. Število merilnih celic je odvisno od tega, katere sile želimo meriti in kako natančno jih želimo meriti. Merilne celice so izdelane iz uporovnih lističev ali iz piezoelektričnih kristalov. Zelo natančno merilno pripravo je razvil proizvajalec Kistler (Kugovnik, Supej in Nemec, 2003). Merilni sistem omogoča merjenje vertikalne, prečne in vzdolžne sile. Slabost se kaže predvsem v tem, da smučarju merilna priprava spremeni dejansko velikost in težo. Poleg samih t. i. pritiskovnih plošč je obvezna oprema še nahrbtnik s prenosnim računalnikom, kjer se beležijo podatki. Tudi plošča predstavlja dodatno oviro med smučarjem in smučko. Hitrost informacije je lahko dokaj visoka, če želimo le opazovati izmerjene sile. Če želimo izmerjene sile sinhronizirati z video posnetki, pa je potreben prenos vseh podatkov in video posnetkov v računalnik. Stricker et al. (2010) so raziskovali vpliv temperature in obremenitve na dinamometre. Ugotavljajo, da povprečna napaka meritve posameznega dinamometra naraste iz 0,2 % do 0,9 % pri spremembi temperature od + 23 °C do -10 °C. Pri nizkih silah (<292 N) so zabeležili 4,6 % napako za merjenje smučarja in 3,3 % napak za merjenje deskarja respektivno. Pri visokih silah (>292 N) pa beležijo zmanjšanje napake na 0,3 % za merjenje smučarja in 0,4 % za merjenje deskarja respektivno.

Drugi način merjenja sil so pritiskovni vložki. Vložki, ki se vstavijo v smučarski čevlji pod podplat smučarja, merijo vertikalno silo in omogočajo prikaz središča sile znotraj čevlja. Prednosti pritiskovnih vložkov se kažejo predvsem v možnosti minimalnega prilagajanja smučarja na dodatno opremo. Smučar lahko uporablja svojo celotno opremo. Teža in oblika vložkov nista moteči. Težava v tem načinu je, da velik del sil, ki jih ustvari smučar, poteka preko jezika smučarskega čevlja, ki ga pritiskovni vložki ne pokrivajo. Izmerjene sile zato lahko pokažejo veliko odstopanje od meritev z drugimi sistemi. Pritiskovni vložki so bili že uporabljeni za analizo tehnike mladih in vrhunskih smučarjev (Raschner et al, 2007; Spritzenpfeil, Huber in Waibel, 2009). S pomočjo vložkov so opravljali tudi test smučarskih čevljev, da bi povečali udobje smučarskega čevlja in prispevali k preprečevanju poškodb (Schaff, Schattner, Kulot in Hauser, 1989; Senner, Schaff in Hauser, 1991). Opravljena je bila tudi analiza vaj izbrane smučarske šole, da bi izboljšali kvaliteto učenja smučanja z uporabo posebej razvitih pritiskovnih vložkov (Schreiber, Schwameder, in Müller, 2006).

Tretji način je 3D kinematika, ki temelji na sistemu kamer. Najstarejši način 3D merjenja smučanja s pomočjo stacionarne kamere vsaj enega zavoja s sprejemljivo natančnostjo, ki pa zahteva relativno zapleten proces kalibracije (Supej, 2008). Z razvojem tehnološkega znanja se je pojavila tudi nova metoda, ki temelji na sistemu

kamer »pan-tilt-zoom«. Ta sistem rešuje problem kompleksnosti več kamer, saj ena kamera zajame večji del terena. Zato je potrebnih manj kamer, še vedno pa ostaja dokaj zapletena kalibracija. Natančnost sistema »pan-tilt-zoom« na terenu je primerljiva s testi v laboratoriju in je primerna za uporabo v nadaljnjih raziskavah (Klaus, Müller in Schwameder, 2010). Kot slabost meritev avtorji navajajo dolgotrajno, naporno in drago delo. Ročno določevanje središč sklepov iz posnetkov zahteva strokovnjaka s področja anatomije/biomehanike. Novejša metoda, ki omogoča avtomatsko zaznavanje markerjev, sicer omogoča nekaj prihranka pri času, vendar markerji niso nameščeni natančno v središča sklepov, kar poveča možnost sistemske napake. Rešitev so lahko dodatni markerji, kar pa posledično prispeva k višji kompleksnosti meritve. Prav tako so zaradi gibanja smučarja po prostoru nekateri markerji skriti pred kamerami. Potrebne so dodatne kamere, ki zvišajo stroške. Tehnične omejitve lahko predstavljata tudi resolucija in frekvenca zajemanja podatkov. Poleg tehničnih omejitev pa so prisotne tudi omejitve obsega zajemanja podatkov. Zajemanje podatkov je omejeno na 2–3 zavoje na terenu ali celo na izolirane zavoje. Če je strategija zavoja odvisna od prejšnjega in naslednjega zavoja, potem strategija vožnje ne more biti oblikovana na podlagi meritev izoliranih zavojev (Brodie, Walmsley in Page, 2008 a). Za izračun sil je potrebna diferenciacija, ki multiplicira šum na podatkih. Posledično se uporabljajo zelo restriktivne metode glajenja, ki pa zmanjšujejo natančnost.

V sklopu diplomskega dela bomo preverjali uporabnost inercialnega sistema za merjenje sile reakcije podlage v alpskem smučanju, ki je torej funkcionalno četrti način merjenja sil. V ta namen bomo uporabili sistem MVN (Xsens Technologies, Enschede, Nizozemska), ki sestoji iz 17 senzorjev gibanja in omogoča izmero pospeškov vsakega izmed 22 sklepov, ki jih zajema. Iz izmerjenih pospeškov segmentov telesa je mogoče neposredno izračunati pospešek težišča telesa in nato s pomočjo drugega Newtonovega zakona še silo reakcije podlage ob predpostavki, da je sila upora razmeroma majhna. Inercialni sistem MVN je bil v posebnih razmerah testiran za kinematične parametre že v raziskavi (Supej, 2010), ki je pokazala visoko natančnost pri 10 s meritvah nihajočega telesa, kar pomeni približno 10 slalomskih zavojev. S podaljšanjem meritve na 35 s se je natančnost nekoliko znižala. Še vedno pa je bila natančnost meritve ocenjena na podobno raven kot pri meritvah tipičnega sistema, ki temelji na kamerah (Ethara et al., 1997) in ga je možno smiselno uporabiti v alpskem smučanju na terenu, saj je sposoben zajema podatkov skozi celotno vožnjo. Na podlagi teh ugotovitev se je inercialni sistem pokazal kot zanesljiv za meritev celotne vožnje smučarja z manj napora in nižjimi stroški, če ga primerjamo s sistemom, ki temelji na kamerah. Kot pomanjkljivost lahko omenimo, da lahko obleka s senzorji gibanja nekoliko ovira smučarja – podobno kot markerji pri sistemu, ki temelji na kamerah.

1.4 CILJI IN HIPOTEZE

Namen diplomskega dela je preveriti uporabnost inercialne obleke v alpskem smučanju za oceno sile reakcije podlage.

Cilj dela je preveriti, kako natančno lahko na podlagi meritev z inercialnim sistemom MVN modeliramo silo reakcije podlage pri alpskem smučanju, torej preveriti, ali je ta način merjenja ocenjevanja sil v alpskem smučanju primerljiv z zlatim standardom neposrednega merjenja sil preko pritiskovnih plošč, vgrajenih med smučarsko vez in smučarski čevelj. Na podlagi napisanega smo izoblikovali naslednjo hipotezo.

H01: Izračuni sile reakcije podlage bodo s pomočjo meritev MVN inercialnega sistema primerljivi z meritvami sile reakcije podlage, ki jih dobimo z neposrednim merjenjem s pomočjo specialnih pritiskovnih plošč.

2. METODE DELA

2.1 PREIZKUŠANEC

Preizkušanec je bil 50-letni, bivši član nemške ekipe demonstratorjev s telesno težo 89,7 kg.

2.2 PRIPOMOČKI

2.2.1 INERCIALNI SISTEM MVN

Za potrebe merjenja sil je bil smučar opremljen z inercialno obleko MVN Biomech (Xsens Technologies, Enschede, Nizozemska). Sistem MVN je namenjen zajemanju podatkov iz celotnega telesa. Sistem sestoji iz 17 senzorjev, ki s pomočjo modela izmerijo 23 telesnih segmentov.

Sistem temelji na miniaturnih senzorjih in brezžični komunikaciji z računalnikom. Poleg obleke z žepki, namenjeni senzorjem gibanja, obstajajo še posebej prirejene trakovi, namenjeni pritrditvi senzorjev gibanja na telo. Zaradi prenosljivosti je sistem primeren za meritve tako v laboratoriju kot tudi na terenu.

Senzorji gibanja vsebujejo 3D pospeškometre, 3D giroskope in 3D magnetometre. Pospeškometri merijo pospeške, magnetometri merijo zemljino magnetno polje in giroskopi kotno hitrost telesnih segmentov. Skupaj so sposobni zajemanja podatkov v realnem času. Po meritvi so podatki zbrani v programu MVN Studio Biomech PRO (Xsens Technologies, Enschede, Nizozemska).

Sistem je sam po sebi sicer namenjen merjenju gibanj na ravni podlagi, kar za alpsko smučanje ne moremo trditi. Vendar pa v uporabi z globalnim navigacijskim satelitskim sistemom (GNSS) predstavlja zanesljiv sistem za meritve alpskega smučanja v tridimenzionalnem prostoru (Supej, 2010).

2.2.2 PRITISKOVNE PLOŠČE

Uporabljen je bil sistem pritiskovnih plošč (Tehnična fakulteta v Münchnu, Nemčija). Natančneje opisan v članku *A New Component Dynamometer for Measuring Ground Reaction Forces in Alpine Skiing* (Kiefmann, Krinninger, Lindemann, Senner in Sptzenpfeil, 2006). Sistem je sestavljen iz dveh 3D plošč, in sicer za vsako nogo. Plošče vsebujejo dinamometre, ki beležijo podatke. Na podlagi dobljenih podatkov izračunamo sile.

2.3 POSTOPEK

Meritve so bile opravljene v dveh zaporednih dneh. Prvi dan: dve meritvi med 12. in 13. uro. Naslednji dan: štiri meritve v časovnem razponu med 13. in 14. uro. Prvi dan

je bil sneg mehak, v drugem dnevu pa srednje mehak. Vidljivost je bila dobra v obeh dneh, padavin ni bilo. Omeniti je potrebno, da so bili v vožnji MVN_day2_measurement_06 zaradi tehničnih težav s sistemom MVN zabeleženi le prvi štirje zavoji.

Smučar je bil opremljen z inercialno obleko MVN Biomech, s pritiskovnimi ploščami ter s sistemom Leica RTK GNSS (Leica Geosystems, Heerbrugg, Švica), ki beleži referenčno trajektorijo smučanja. Inercialna obleka MVN Biomech je bila nameščena po navodilih proizvajalca, kjer je bilo to možno. Senzorja gibanja za stopalo in glavo sta bila nameščena prilagojeno glede na smučarsko opremo. Senzor gibanja za segment glava (Head) je bil nameščen na smučarsko čelado. Senzor gibanja za stopalo (Foot) pa na smučarski čevlji. Nadomestne pozicije senzorjev ne vplivajo na točnost podatkov, saj so odstopanja od priporočene pozicije minimalne. Pritiskovne plošče so bile nameščene med smuči in smučarske vezi. Sistem RTK GNSS je bil nameščen v nahrbtniku, tako tudi zbiralec podatkov s pritiskovnih plošč. Posebej je potrebno poudariti, da je bilo telesni masi smučarja potrebno dodati tudi maso opreme, ki je znašala 9,292 kg (palice, smučarski čevlji, nahrbtnik z vso tehnično opremo).

Za potrebe sinhronizacije sistema MVN in sistema pritiskovnih plošč je smučar pred vsako vožnjo dvignil levo nogo in z njo udaril ob tla. Za sinhronizacijo s sistemom RTK GNSS pa je bil uporabljena najnižja pozicija ob izvedbi počepa.

Tabela 2:
Pregled voženj in uporabljenih načinov smučanja

Meritev	Tip smuči	Način smučanja
MVN_day1_measurement _02	Völkl Werks Code 104/76/122	Terensko vijuganje, smučanje z zarezno tehniko.
MVN_day1_measurement _04	18,6 m 178 cm	Kratki zavoji s kombinirano tehniko smučanja, dolgi zavoji z zarezno tehniko smučanja, drsenje naravnost s smučmi v klinastem položaju.
MVN_day2_measurement _04	Olypmpus Mons Elan	Dolgi zavoji z zarezno tehniko smučanja.
MVN_day2_measurement _05	Wide Rocker L176 G140-110- 130 R 21,5	Dolgi zavoji z zarezno tehniko smučanja, drsenje v paralelnem položaju naravnost, zaustavljanje v plužnem položaju.
MVN_day2_measurement _06 (zabeleženi le prvi štiri zavoji)	Race Rig L176 G101-65-89	Dolgi zavoji z zarezno tehniko smučanja, drsenje v paralelnem položaju naravnost, zaustavljanje v plužnem položaju.
MVN_day2_measurement _07	R 21,4	Dolgi zavoji z zarezno tehniko smučanja, drsenje v paralelnem položaju naravnost, zaustavljanje v plužnem položaju.

V Tabeli 2 so prikazane vožnje, uporabljene smuči in način vožnje, ki ga je smučar izvajal.

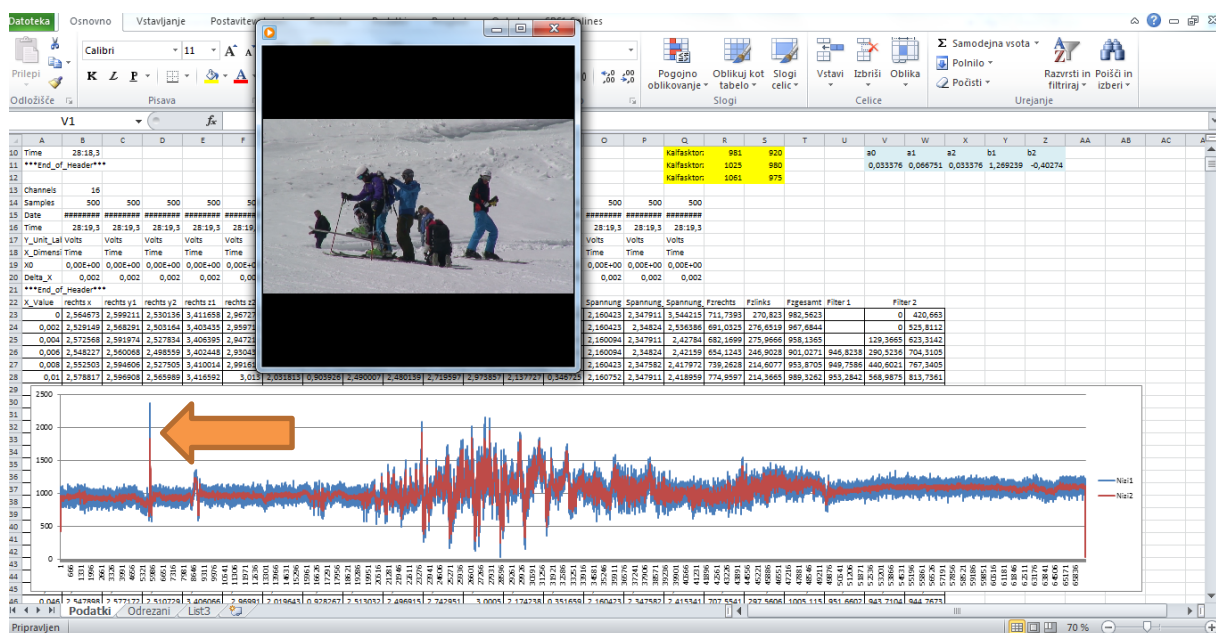
Najpogosteje uporabljena tehnika smučanja na meritvah je bilo smučanje z zarezno tehniko, kjer smučar izkorišča nastavitev robnika in stranski lok smučke, pri tem pa se hitrost iz zavoja v zavoj lahko povečuje (Lešnik in Žvan, 2007). Pri terenskem smučanju v ožjem hodniku pa se je smučar posluževal smučanja s kombinirano tehniko, kjer smučar s pomočjo vrtenja stopal v prvem delu zavoja hitrost prilagaja ustreznemu in želenemu nivoju (Lešnik, Žvan, 2007). Izmerjene sile iz različnih sistemov merjenja so bile med seboj primerjane po načinu smučanja.

2.3.1 OBDELAVA PODATKOV

Pridobljeni podatki iz inercialnega sistema MVN so bili iz programa MVN Studio Biomech PRO izvoženi v Microsoft Excel 2010. Podatki iz sistema pritiskovnih plošč so bili zapisani v formatu cvs in preneseni v format xlsx. Vsi izračuni so bili izračunani

s programom Microsoft Excel 2010. Za izračun pospeškov v masnih središčih telesnih segmentov so bili uporabljeni koeficienti po De Levi (De Leva,1996). Iz izračunanega pospeška težišča telesa (sistema masnih točk) je sledil izračun sile po sistemu, ki ga dobimo ob uporabi drugega Newtonovega zakona in pri pogoju, da zanemarimo silo upora zraka. Za glajenje podatkov je bil uporabljen filter Butterworth (Winter, 2009).

Zaradi različne frekvence zajemanja podatkov iz inercialnega sistema MVN (120 Hz) in sistema pritiskovnih plošč (500 Hz) je bila potrebna interpolacija podatkov v programu Microsoft Excel 2010. Naslednji korak je bila sinhronizacija podatkov iz obeh sistemov na podlagi gibalne akcije. Ob ogledu video posnetka vožnje in izmerjenih sil je bil določen čas udarca v tla z levo nogo (kot je prikazano na Sliki 2).



Slika 2: Prikaz gibalne akcije za sinhronizacijo (osebni arhiv).

Sledila je analiza smučanja, kjer so bili podatki zaradi boljše primerjave merilnih sistemov razdeljeni po načinu smučanja in naklonu terena. Smučanje z dolgimi zavoji z zarezno tehniko smučanja na naklonini je bilo v treh vožnjah izmerjeno $n=2097$, $n=1587$ in $n=2269$ vrednosti sile reakcije podlage. Smučanje z dolgimi zavoji z zarezno tehniko smučanja na položnem delu je bilo merjeno v dveh vožnjah ($n=3148$ in $n=1761$ vrednosti sile reakcije podlage). 3830 vrednosti ($n=3830$) sile reakcije podlage je bilo izmerjenih za opis v kratkih zavojih s kombinirano tehniko smučanja na naklonini. Vrednosti so bile zabeležene tudi za vožnjo naravnost po položnem delu ($n=1679$) in zaustavljanje v plužni položaj ($n=918$).

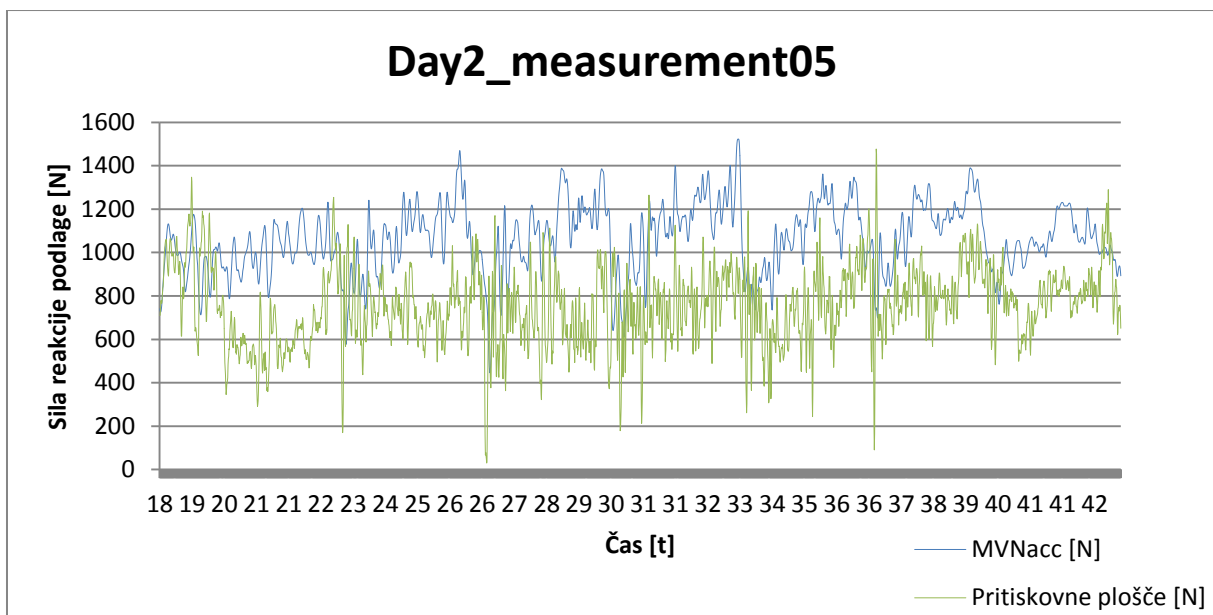
Za ugotavljanje povezanosti podatkov iz omenjenih sistemov je bil uporabljen izračun Pearsonovega koeficienta korelacije v programu SPSS 17.0. Za definiranje razlike

med sistemoma pa je bil uporabljen Paired Samples T-test, pri 95 % stopnji zaupanja ($p < 0.05$).

Za statistično analizo je bila za smučanje v krajših zavojih s kombinirano tehniko izbrana vožnja day1_measurement04, za analizo daljših zavojev pa vožnja day2_measurement07. Zaradi uporabe širših smuči v drugih meritvah in posledično velikih odstopanj v izmerjenih silah sta bili vožnji day2_measurement04 in day2_measurement05 izključeni iz statistične analize. Za vožnjo naravnost in zaustavljanje v pljučni položaj je bila analizirana vožnja DAY2_MEASUREMENT07.

3. REZULTATI

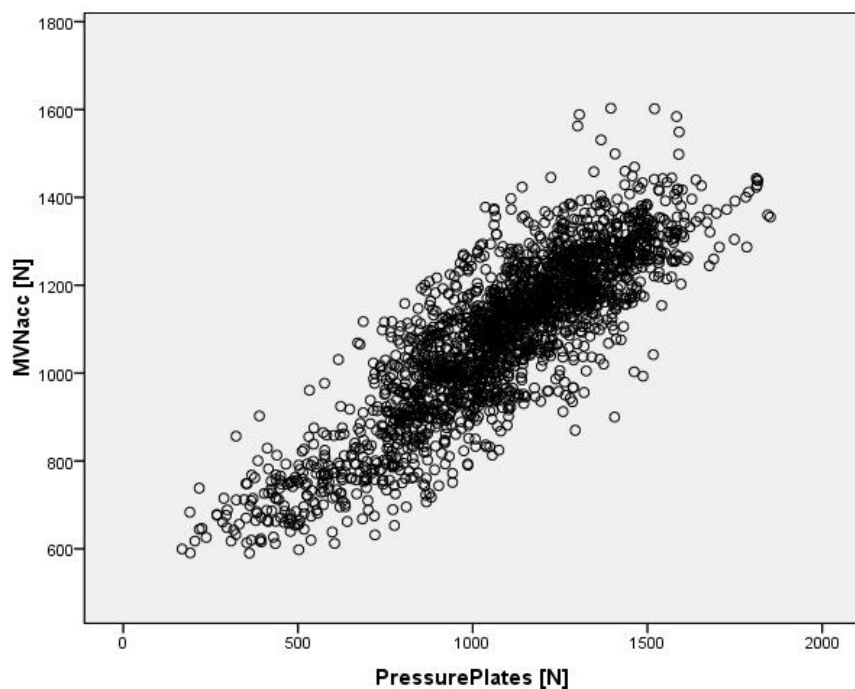
Normalnost porazdelitve je bila pokazana v vseh meritvah oziroma vožnjah. Naslednji korak je bil izračun korelacije med sistemoma, ki je testiral povezanost spremenljivk. Na podlagi izračuna Pearsonovega koeficienta korelacije je bilo določeno, ali je korelacija statistično pomembna ali ne. V vseh načinih vožnje se je korelacija pokazala kot statistično pomembna. Korelacija je najvišje vrednosti – skoraj popolno korelacijo ($r=0,967$) – pokazala pri kratkih zavojih s kombinirano tehniko smučanja na naklonini. Nekoliko nižja vrednost ($r=0,826$) je pokazala visoko, močno korelacijo za smučanje z dolgimi zavoji z zarezo tehniko smučanja. Še nekoliko nižje vrednosti si bile zabeležene za vožnjo naravnost v paralelnem položaju smuči in zaustavljanju v plužni položaj ($r=0,686$), kar pa kaže na zmerno, srednjo korelacijo. Slabša korelacija je rezultat strižnih sil, ki jih sistem MVN ne izmeri, kot je pojasnjeno v nadaljevanju. Nizka korelacija ($r=0,344$ na strmini in $r=0,385$ na ravnini) je bila prisotna le v MVN_day2_measurement_04 in ($r=0,116$ na strmini in $r=0,33$ na ravnini) MVN_day2_measurement05 (slika 5). Nižjo korelacijo in višje razlike v izmerjenih silah gre pripisati uporabi širših smuči (kot je prikazano v Tabeli 2 na strani 16). Zaradi širše površine prihaja do drugačnih navorov, ki popačijo rezultate sil, izmerjene s sistemom pritiskovnih plošč.



Slika 3: Grafični prikaz izmerjenih sil pri vožnji.

Na Sliki 3 je vidno odstopanje vrednosti sile reakcije podlage, ki so posledica uporabe širših smuči.

Zaradi visokih vrednosti korelacije ostalih meritev lahko sklepamo, da so vrednosti inercialnega sistema MVN zaupljive, glede na v preteklosti že preverjen sistem pritiskovnih plošč, kar nakazuje, da je odstopanje v absolutnih vrednostih posledica sistemskih napak.

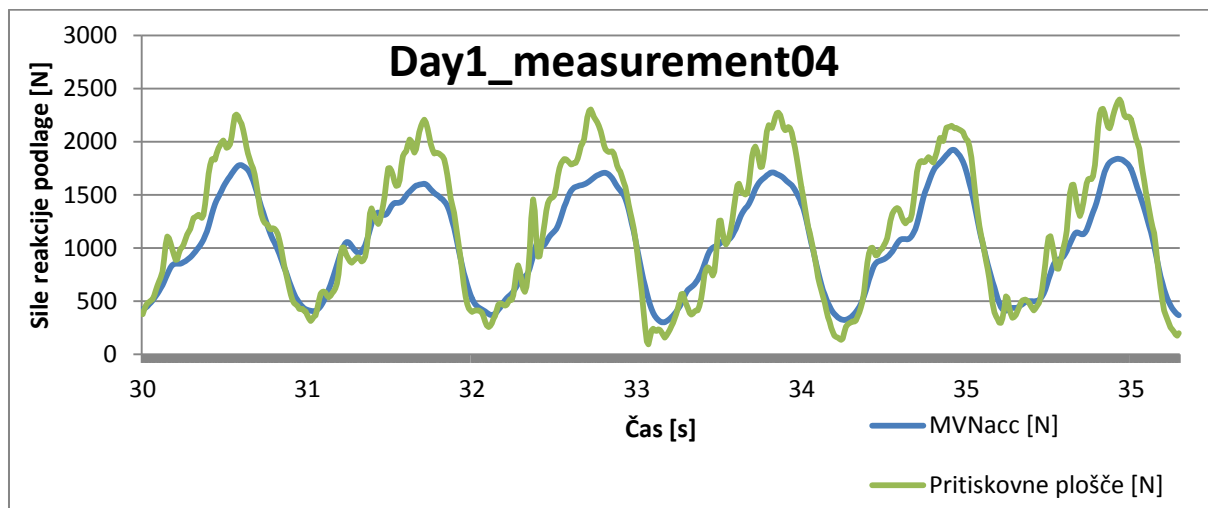


Slika 4: Korelacija za vožnjo MVN_day2_measurement_07.

Na Sliki 4 je prikazana skoraj popolna korelacija med sistemoma.

V nadaljevanju so bili izračunani T-testi po različnih načinih vožnje med obema sistemoma merjenja.

3.1 SMUČANJE S KRAJŠIMI ZAVOJI S KOMBINIRANO TEHNIKO



Slika 5: Grafični prikaz krajših zavojev s kombinirano tehniko.

Za smučanje v ožjem hodniku oz. smučanje s krajšimi zavoji s kombinirano tehniko, kot vidimo na Sliki 5, je videti skladnost sistema MVN in sistema pritiskovnih plošč. Korelacija sistemov je bila najvišja pri tem načinu smučanja ($r=0,967$).

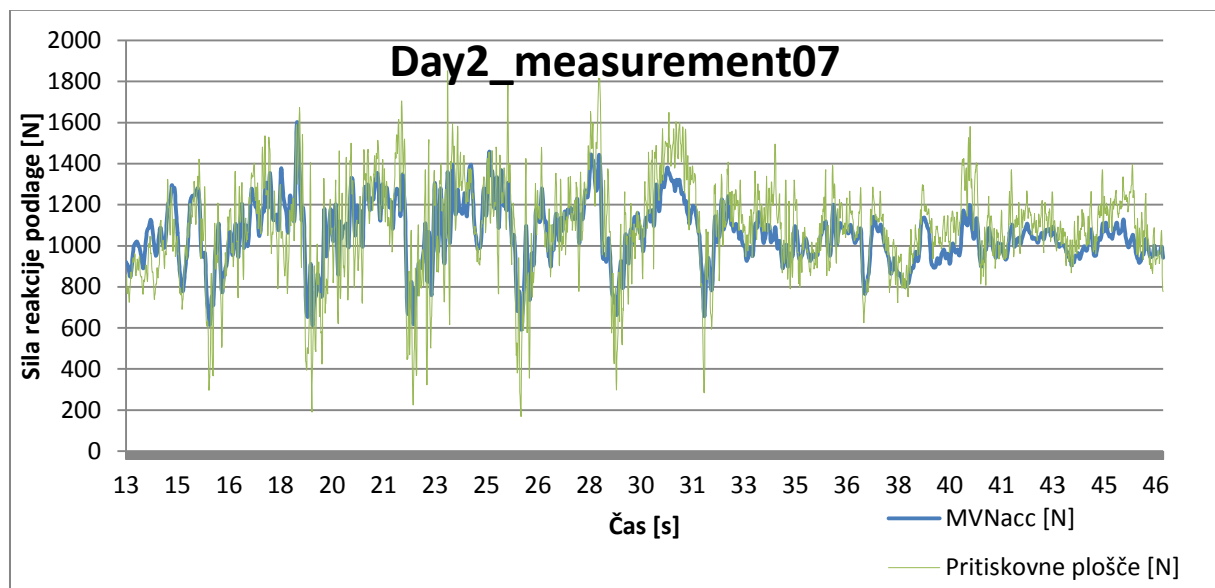
Tabela 3:
Paired Samples T-test, smučanje s krajšimi zavoji s kombinirano tehniko.

Paired Samples Test								
	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair 1 MVNacc - PressurePlates	162,0402107	-206,5163519	3,3369912	-168,5826613	-155,4977601	48,559	-3829	,000

Tabela 3 prikazuje statistične vrednosti Paired Samples T-testa za smučanje s krajšimi zavoji s kombinirano tehniko.

S 5 % tveganjem lahko trdimo, da povprečni vrednosti sistema MVN in sistema pritiskovnih plošč nista enaki.

3.2 SMUČANJE Z DALJŠIMI ZAVOJI Z ZAREZNO TEHNIKO



Slika 6: Grafični prikaz daljših zavojev z zarezno tehniko.

Smučanje z daljšimi zavoji z zarezno tehniko je pokazalo še vedno zelo visoko korelacijo ($r=0,859$). Na Sliki 6 je jasno viden tudi prehod na položnejši del smučišča pri 32 s meritve. Tudi smučanje na položnejšem terenu je pokazalo podobno visoko korelacijo ($r=0,812$).

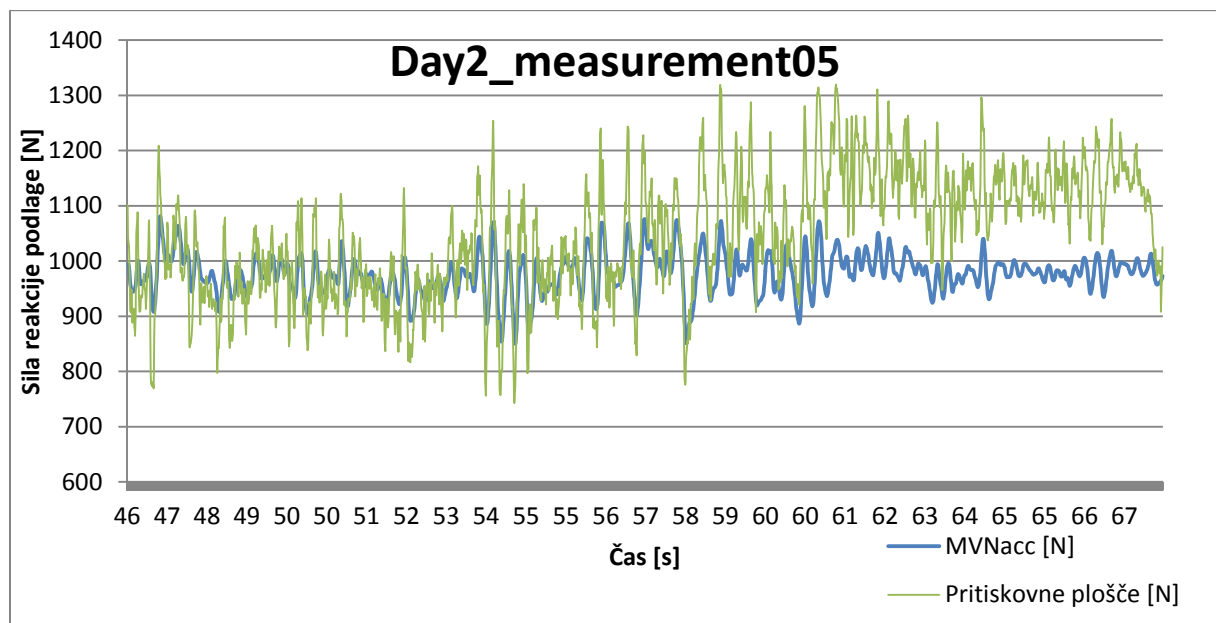
Tabela 4:
Paired Samples T-test, smučanje z daljšimi zavoji z zarezno tehniko

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	MVNacc [N] - Prit_plosce [N]	-32,9881466	135,5017915	2,1344821	-37,1729117	-28,8033814	15,455	,000	

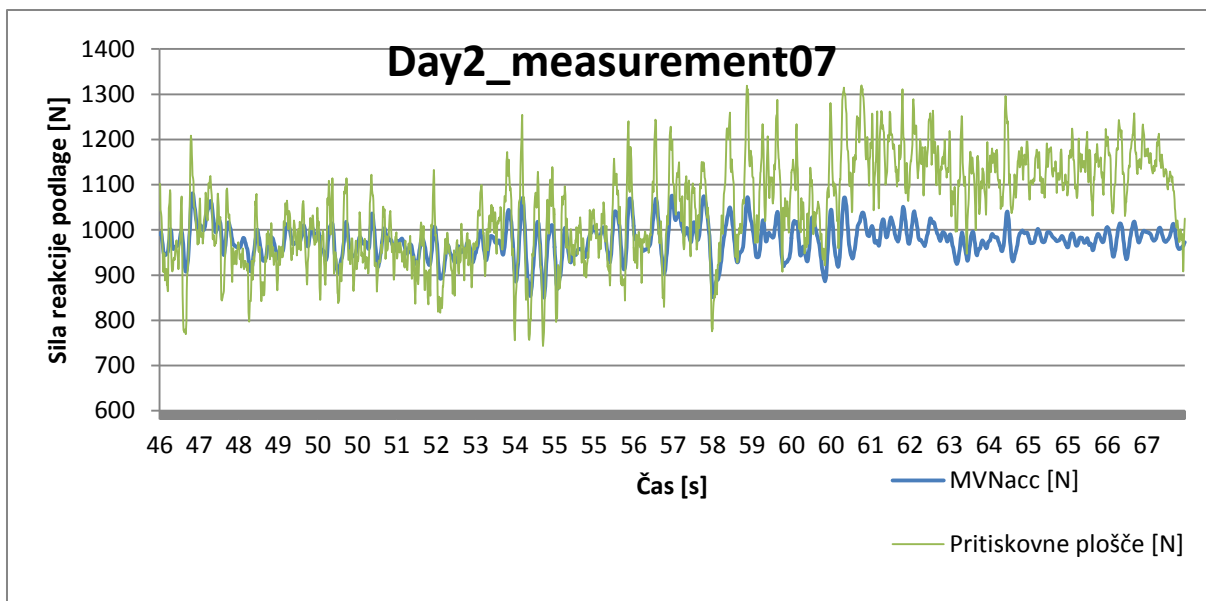
Tabela 4 prikazuje statistične vrednosti Paired Samples T-testa.

S 5 % tveganjem lahko trdimo, da povprečni vrednosti sistema MVN in sistema pritiskovnih plošč nista enaki.

3.3 VOŽNJA NARAVNOST IN ZAUSTAVLJANJE V PLUŽNI POLOŽAJ



Slika 7: Grafični prikaz vožnje naravnost in zaustavljanja v plužni položaj; day2_measurement05



Slika 8: Grafični prikaz vožnje naravnost in zaustavljanja v plužni položaj; day2_measurement07

Na Slikah 7 in 8 so grafično prikazane izmerjene sile: v začetnem delu za vožnjo naravnost in v zadnjem delu za zaustavljanje v plužni položaj. Iz grafa lahko razberemo, da sile, izmerjene s sistemom pritiskovnih plošč, beležijo višje sile pri zaustavljanju v plužni položaj. Razlog za višje izmerjene sile lahko poiščemo v strižnih silah, ki se ustvarijo ob potisku smuči v klinast in kasneje v plužni položaj. Leteh sistem MVN ne beleži, posledično so izmerjene nižje sile s sistemom MVN.

Tabela 5:
Paired Samples T-test, vožnja naravnost in zaustavljanje v plužni položaj.

Paired Samples Test								
	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair 1	MVNacc [N] - Prit_plosce [N]	-69,6006240	87,3163803	1,7134039	-72,9604003	-66,2408476	-40,621	,000

Tabela 5 prikazuje statistične vrednosti Paired Samples T-testa za vožnjo naravnost in zaustavljanje v plužni položaj.

S 5 % tveganjem lahko trdimo, da povprečni vrednosti sistema MVN in sistema pritiskovnih plošč nista enaka.

4. RAZPRAVA

Dobljeni podatki iz šestih meritev, ki jih predstavlja šest voženj, kažejo visoko stopnjo povezanosti med inercialnim sistemom MVN in sistemom pritiskovnih plošč. Glede povezanosti izstopata le dve vožnji, kjer je bila smučarska oprema drugačna. Smučar je bil opremljen s širšimi smučmi, pri katerih se pojavljajo drugačne ročice in posledično drugačni navori kot pri smučeh z ožjimi dimenzijami. Posledica širših smučí so popačeni izmerjeni podatki iz sistema pritiskovnih plošč. Za ostale vožnje je značilna zelo visoka korelacija. Pomeni, da odstopanja v silah nastajajo zgolj zaradi sistemskih napak. Do sistemskih napak pa lahko pride zaradi procesa kalibracije, sinhronizacije in obdelave podatkov.

Čeprav je korelacija za vožnjo naravnost in zaustavljanje v plužni položaj dosegala podobne vrednosti korelacije, je bilo mogoče opaziti odstopanje sil pri zaustavljanju v plužni položaj. Razlika v silah je vidna pri višje izmerjenih sil iz sistema pritiskovnih plošč oziroma nižje izmerjenih sil inercialnega sistema MVN. Sklepamo lahko, da je razlog v modeliranju človeka, kjer sistem opravlja nekakšno notranje glajenje podatkov, v napakah pri modeliranju segmentnih mas človeka in opreme ter poenostavitvah izračunavanja sile reakcije podlage le s pomočjo težišča telesa in ob zanemarjanju zračnega upora. Posebej opazna razlika je posledica v merjenju strižnih sil, ki nastanejo, ko smučar potisne smučí iz paralelnega položaja v plužni položaj. Sile, ki nastanejo ob takem načinu vožnje, inercialni sistem, ki beleži le pospeške telesnih segmentov, ne zazna. Posledica so nižje izmerjene sile inercialnega sistema. Sklepamo, da inercialni sistem ni primeren za merjenje sil pri zaustavljanju v plužni položaj.

Na podlagi dobljenih rezultatov so cilji raziskovalnega dela doseženi. Z raziskovalnim delom smo pokazali, da je sistema med seboj s primerno obdelavo mogoče uspešno primerjati. Sile, izmerjene z inercialnim sistemom MVN, so primerljive s sistemom pritiskovnih plošč.

Po preteklih ugotovitvah je bilo pričakovati, da se bodo sile obnašale podobno. Iz tega naslova je bila oblikovana hipoteza, da sta sistema med primerljiva za merjene sile reakcije podlage. Hipoteza je na podlagi statističnih in grafičnih analiz potrjena.

5. SKLEP

V raziskovalnem delu smo preverjali primerljivost inercialnega sistema MVN in sistema pritiskovnih plošč. Izhodišče za raziskovalno delo predstavlja problem izbire najustreznejšega načina za merjenje sile reakcije alpskega smučanja na terenu. V preteklosti je bilo narejeno že veliko biomehanskih analiz, vendar še nobena ni medsebojno primerjala sistema pritiskovnih plošč in inercialnega sistema MVN. Inercialni sistem MVN, ki temelji na senzorjih gibanja, je najnovejši način merjenja sil. Na podlagi izmerjenih pospeškov telesnih segmentov je mogoče s pomočjo modeliranja sil po Newtonovih zakonih izračunati silo, s katero podlaga pritiska na smučarja.

Namen raziskovalnega dela je bil predstaviti različne že uporabljene in analizirane sisteme merjenja sil v alpskem smučanju in primerjati inercialni sistem MVN s sistemom pritiskovnih plošč. Cilj je bila uspešna izvedba primerjave sistemov za merjenje sil pri alpskem smučanju – ta cilj je bil dosežen. Sistema je bilo mogoče uporabiti za merjenje enake oziroma vsake vožnje.

Preizkušanec raziskave, smučar, bivši član nemške ekipe demonstratorjev, je bil opremljen istočasno s sistemom pritiskovnih plošč in z inercialnim sistemom MVN. Izvedenih je bilo 6 voženj oziroma meritev. Analizirani so bili različni načini smučanja (smučanje v daljših zavojih z uporabo zarezne tehnike, smučanje v kratkih zavojih z uporabo kombinirane tehnike, vožnja naravnost v paralelnem položaju smuči in zaustavljanje v plužni položaj). Podatki so bili sinhronizirani na podlagi gibalne akcije (udarec v tla z levo nogo) pred spustom po klancu navzdol. Dobljeni podatki so pokazali statistično pomembno povezanost med sistemoma. Izstopale so le meritve, kjer so bile uporabljene široke smuči, kjer so navori drugačni; posledice tega so nižje izmerjene sile s sistemom pritiskovnih plošč. Pomembno ugotovitev tudi predstavlja podatek, da se je sistem MVN pokazal kot manj primeren za merjenje sil pri zaustavljanju v plužni položaj.

Meritve lahko ocenimo kot regularne in brez motečih dejavnikov. Kljub temu bi v prihodnje bilo smiselno opraviti nadaljnje raziskovanje na področju merjenja sil iz različnih tipov smuči. Na podlagi dveh meritev ni smotno sklepati, da sistem pritiskovnih plošč ni primeren za merjenje sil na širokih smučeh. Vsekakor je pomembno, da se natančno izmerijo vsi tipi smuči, tako tekmovalni kot rekreativni. Merjenje sil ni v pomoč le izboljševanju vrhunškega športa, temveč tudi preprečevanju poškodb vse bolj množičnega rekreativnega športa.

6. VIRI

- Barelle, C., Ruby, A. in Tavernier, M. (2004). Experimental Model of the Aerodynamic Drag Coefficient in Alpine Skiing. *Journal of applied biomechanics*, 20, 167–176.
- Brandenberger, H. (1934). *Skimechanik*. Rapperswil: Ra-Verlag.
- Brodie, M. (2009). *Optimisation of Performance in Alpine Ski Racing with Fusion Motion Capture* (Raziskovalno poročilo). Wellington: Massey University.
- Brodie, M. A., Walmsley, A. in Page, W. (2008a). Fusion motion capture: a prototype system using inertial measurement units and GPS for the biomechanical analysis of ski racing. *Journal of Sports Technology*, 1(1), 17–28.
- Brucker, P. U., et al. (2014). Alpiner Skireiten- und Skileistungssport. *Unfallchirurg* 2014, 117, 24–32.
- Buhl, D., Fauve, M in Rhyner, H. (2001). The kinetic friction of polyethylene on snow: the influence of the snow temperature and the load. *Cold Regions Science and Technology*, 33, 133–140.
- Casolo, V., Lorenzi, V., Vallatta, A. in Zappa, B. (1997). Simulation techniques applied to skiing mechanics. V *Science and Skiing* (116–130). London: E & FN Spon.
- Colbeck, S. C. in Perovich, D. K. (2004). Temperature effect of black versus white polyethylene bases for snow skis. *Cold Region Science and Technology*, 39, 33–38.
- de Leva, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, 29 (9), 1223–1230.
- Ethara, Y., Fujimoto, H., Miyazaki, S., ochimaru, M., Tanaka, S. in Yamamoto, S. (1997). Comparison of the performance of 3D camera systems II. *Gait and Posture*, 5, 251–255.
- Gilgien, M., Spörri, J., Chardonens, J., Kroöll, J. in Müller, E. (2013). Determination of External Forces in Alpine Skiing Using a Differential Global Navigation Satellite System. *Sensors*, 13, 9821–9835.
- Hatze, H. (1966). Die biomechanische und physikalische Grundlegung der Hangschrägfahrstellung im Schilauflauf. *Leibesübung-Leibeserziehung*, 20(9), 1–3.

- Hébert-Losier, K., Supej, M. in Holmberg, H. (2013). Biomechanical Factors Influencing the Performance of Elite Alpine Ski Racers. *Sports Medicine*, 44 (4), 519–533.
- Heinrich, D., Mössner, M., Kaps, P. in Nachbauer, W. (2010). Calculation of the contact pressure between ski and snow during a carved turn in Alpine skiing. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20, 485–492
- Howe, J. (1983). *Skiing Mechanics*. Laporte, CO: Poudre.
- Kaps, P., Nachbauer, W. in Mössner, M. (1996). Determination of kinetic friction and drag area in alpine skiing. *Ski Trauma and Skiing Safety ASTM*, 10, 165–177.
- Kiefmann, A., Krinninger, M., Lindemann, Senner, V. in Spitzenfeil (2006). A New Six Component Dynamometer for Measuring Ground Reaction Forces in Alpine Skiing. *The Engineering of Sport* 6, 2, 87–92.
- Klous, M., et al. (2010). Collecting kinematic data on a ski/snowboard track with panning, tilting, and zooming cameras: Is there sufficient accuracy for a biomechanical analysis? *Journal of Sports Sciences*, 28 (12), 1345–1353.
- Klous, M., Müller, E. in Schwameder, H. (15. 9. 2014). Three-Dimensional Lower Extremity Joint Loading in a Carved Ski and Snowboard Turn: A Pilot Study. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2014, 1–13.
Pridobljeno 17. 09. 2015, iz
<http://www.hindawi.com/journals/cmmm/2014/340272/>
- Kugovnik, O., Supej, M. in Nemec, B. (2003). *Biomehanika alpskega smučanja*. Ljubljana: Fakulteta za šport, Inštitut za šport.
- Lešnik, B. in Žvan, M. (2007). *Naše smučine: teorija in metodika alpskega smučanja*. Ljubljana: SZS – ZUTS.
- Lind, D. in Sanders, S. P. (1997). *The Physics of Skiing*. New York: Woodbury.
- Luinge, H. J. (2002). *Inertial sensing of human movement*. Neobjavljena doktorska disertacija, Enschede: Univerza Twente.
- Margane, J., Trzecinski, L., Babel, S. in Neumaier, A. (1998). A mechanical apparatus executing turns on carver skis. V *Proceedings I of the XVI ISBS Symposium 1998* (285–289). Konstanz: Universitätsverlag Konstanz.
- Meyer, F., Le Pelley, D. in Borrani, F. (2012). Aerodynamic modeling of alpine skiers performing giant slalom turns. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44 (6), 1109–1115.

- Müller, E. (1994). Analysis of the biomechanical characteristics of different swinging techniques in alpine skiing. *Journal of Sports Sciences*, 12, 261–278.
- Müller, E. in Schwameder, H. (2003). Biomechanical aspects of new techniques in alpine skiing and ski-jumping. *Journal of Sports & Science*, 21, 679–692.
- Nordt, A., Springer, G. S. in Kollár, L. P. (1999). Simulation of a turn on alpine skis. *Sports Engineering*, 2, 181–199.
- Raschner, C. et al. (2007). Technique analysis in junior slalom ski racing through pressure distribution measurements. V *Proceedings of the 4th International Congress on Science and Skiing* (157). Oxford: Meyer & Meyer Sport Ltd.
- Schaff, P. S., Schattner, R., Kulot, M. in Hauser, W. (1989). Influences on the foot pressure pattern in ski boots. V *Skiing trauma and safety: Seventh International Symposium* (137–145). Philadelphia: ASTM.
- Schreiber, P., Schwameder, H. in Müller, E. (2006). Characteristics of the force application point - a method to identify learning process in alpine skiing? V *Proceedings of the XXIV International Symposium on Biomechanics in Sports Vol. 2* (564–567). Salzburg: University of Salzburg.
- Schwartz, M. H., Trost, J. P. in Wervej, R. A. (2004). Measurement and management of errors in quantitative gait data. *Gait & Posture*, 20, 196–203.
- Senner, V., Schaff, P. in Hauser, W. (1991). A new artificial leg for ski boot testing. V *Skiing trauma and safety: Eighth International Symposium* (200–207). Philadelphia: ASTM.
- Spitzenfeil, P., Huber, A. in Waibel, K. (2009). Mechanical load and muscular expenditure in alpine ski racing and implications for safety and material considerations. V *Science and skiing IV* (479–486). Maidenhead: Meyer & Meyer Ltd.
- Strausky, H., Krenn, J. R., Leitner, A. in Aussenegg, F.R. (1998). Sliding plastics on ice: fluorescence spectroscopic studies on interfacial water layers in the μm thickness regime. *Applied Physics B*, 66, 599–602.
- Stricker, G. et al. (2010). Determination of forces in alpine skiing and snowboarding: Validation of a mobile data acquisition system. *European Journal of Sport Science*, 10(1), 31–41.
- Supej, M. (2008). Differential specific mechanical energy as a quality parameter in racing alpine skiing. *Journal of Applied Biomechanics*, 24, 121–129.

- Supej, M. (2010). 3D measurements of alpine skiing with an inertial sensor motion capture suit and GNSS RTK system. *Journal of Sports Sciences*, 28(7), 759–769.
- Supej, M. (2011). *Biomehanika 1 – učbenik za študente Fakultete za šport* [Elektronski vir]. Ljubljana: Fakulteta za šport, Inštitut za šport.
- Supej, M. in Holmber, H. (2010). How Gate Setup and Turn Radii Influence Energy Dissipation in Slalom Ski Racing. *Journal of Applied Biomechanics*, 26, 454–464.
- Supej, M., Kugovnik, O. in Nemec, B. (2004). Modelling and Simulation of two Competition Slalom Techniques. *Kinesiology*, 36(2), 119–130.
- Supej, M. et al. (2013). Aerodynamic drag is not the major determinant of performance during giant slalom skiing at the elite level. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 23 (1), 38–47.
- Urabe, Y., Ochi, M., Onari, K., & Ikuta, Y. (2002). Anterior cruciate ligament injury in recreational alpine skiers: Analysis of mechanisms and strategy for prevention. *Journal of Orthopedic Science*, 7, 1–5.
- Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement, Fourth Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.