

# Az excentrikus edzés és az egésztest vibráció hatása az izom mikrostruktúrájára és az energia felhasználására

Doktori értekezés

**Ureczky Dóra**

Testnevelési Egyetem  
Doktori Iskola



Témavezető: Dr. Tihanyi József egyetemi tanár, DSc

Hivatalos bírálók: Dr. Gyimes Zsolt egyetemi docens, PhD  
Dr. Wielhelm Márta egyetemi tanár, PhD

Szigorlati bizottság elnöke: Dr. Sipos Kornél professzor emeritus, PhD  
Szigorlati bizottság tagjai: Dr. Pavlik Gábor professzor emeritus, DSc  
Dr. Kiss Rita egyetemi docens, DSc  
Dr. Tóth Orsolya főiskolai docens, PhD

Budapest  
2014

## **Tartalomjegyzék**

<b>1. RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE.....</b>	<b>4</b>
<b>2. BEVEZETÉS .....</b>	<b>6</b>
2.1. IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	8
2.1.1. <i>Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat.....</i>	<i>8</i>
2.1.2. <i>Vibrációs edzéses vizsgálat .....</i>	<i>19</i>
<b>3. CÉLKITŰTÉSEK .....</b>	<b>28</b>
3.1.1. <i>Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat.....</i>	<i>28</i>
3.1.2. <i>Vibrációs edzéses vizsgálat .....</i>	<i>28</i>
3.2. HIPOTÉZISEK .....	28
3.2.1. <i>Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat.....</i>	<i>28</i>
3.2.2. <i>Vibrációs edzéses vizsgálat .....</i>	<i>29</i>
<b>4. ANYAG ÉS MÓDSZER .....</b>	<b>30</b>
4.1. HAT NAPOS EXCENTRIKUS EDZÉSES VIZSGÁLAT .....	30
4.1.1. <i>Vizsgált személyek.....</i>	<i>30</i>
4.1.2. <i>Vizsgálati protokoll.....</i>	<i>30</i>
4.1.3. <i>Az excentrikus edzésben használt berendezés .....</i>	<i>31</i>
4.1.4. <i>Az excentrikus edzés leírása .....</i>	<i>33</i>
4.1.5. <i>A térdfeszítő izmok edzésnapokra vonatkozó erő kifejtésének meghatározása.....</i>	<i>35</i>
4.1.6. <i>A kreatin kináz (CK) és a laktát dehidrogenáz (LDH) szintének meghatározása .....</i>	<i>37</i>
4.1.7. <i>Izomminta vétel (biopszia) .....</i>	<i>37</i>
4.1.8. <i>Fluoreszens immunhisztokémiai festés .....</i>	<i>38</i>
4.1.9. <i>Statisztikai elemzés .....</i>	<i>40</i>
4.2. VIBRÁCIÓS EDZÉSES VIZSGÁLAT .....	41
4.2.1. <i>Vizsgált személyek .....</i>	<i>41</i>

4.2.2. Vizsgálati protokoll .....	41
4.2.3. Egésztest vibráció .....	42
4.2.4. <sup>31</sup> P MR spektroszkópia .....	43
4.2.5. A <sup>31</sup> P MRS vizsgálat menete .....	45
4.2.6. Statisztikai elemzés.....	45
<b>5. EREDMÉNYEK.....</b>	<b>47</b>
5.1. HAT NAPOS EXCENTRIKUS EDZÉSES VIZSGÁLAT .....	47
5.1.1. Izomfájdalom, izommerevség (DOMS).....	47
5.1.2. Enzim aktivitás .....	47
5.1.3. A forgatónyomaték-idő görbén meghatározott csúcsforgatónyomaték edzésnapj átlaga 48	
5.1.4. A forgatónyomaték-idő görbékről meghatározott átlag forgatónyomaték edzésnapj átlaga 49	
5.1.5. A forgatónyomaték változása az egyes edzésnapok között.....	50
5.1.6. Összefüggés a forgatónyomaték csökkenés és növekedés mértéke között. ....	51
5.1.7. A vastus laterális rostösszetétele .....	52
5.1.8. Összefüggés a rostösszetétel és a CK koncentráció között.....	52
5.1.9. Összefüggés a rostösszetétel és a LDH koncentráció között .....	52
5.1.10. A forgatónyomaték és a rostösszetétel közötti összefüggés.....	53
5.1.11. A szarkoplazmában megjelenő fibronektin és a rostösszetétel kapcsolata .....	55
5.1.12. A szarkoplazmában megjelenő fibronektin és a kreatin kináz aktivitás kapcsolata .....	56
5.2. VIBRÁCIÓS EDZÉSES VIZSGÁLAT .....	58
5.2.1. Az inorganikus foszfát (Pi) spektrumterületének változása a vibrációs kezelések hatására 58	
5.2.2. Az inorganikus foszfát (Pi) spektrumterületének változása relaxált izomban egy perces izometriás kontrakció után .....	59
5.2.3. A kreatinfoszfát (PCr) spektrumterületének változása a vibrációs kezelések hatására ...	61

5.2.4.	<i>Inorganikus foszfát és kreatinfoszfát arány (Pi/PCr)</i> .....	62
5.2.5.	<i>ATP spektrumterületek</i> .....	63
5.2.6.	<i>Az összes ATP és a kreatinfoszfát aránya</i> .....	64
5.2.7.	<i>A csoportok összehasonlítása</i> .....	65
<b>6.</b>	<b>MEGBESZÉLÉS</b> .....	<b>66</b>
6.1.	HAT NAPOS EXCENTRIKUS EDZÉSES VIZSGÁLAT .....	66
6.1.1.	<i>DOMS direkt és indirekt jelei</i> .....	66
6.1.2.	<i>DOMS és a rostösszetétel közötti kapcsolat</i> .....	69
6.1.3.	<i>Az izom rostösszetétel és az erő kifejtő képesség helyreállása közötti kapcsolat</i> .....	73
6.1.4.	<i>Vizsgálat jelentősége és korlátai</i> .....	75
6.2.	VIBRÁCIÓS EDZÉSES VIZSGÁLAT .....	76
6.3.	HIPOTÉZISEK BEVÁLÁSÁNAK VIZSGÁLATA .....	83
6.3.1.	<i>Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat</i> .....	83
6.3.2.	<i>Vibrációs edzéses vizsgálat</i> .....	83
<b>7.</b>	<b>KÖVETKEZTETÉSEK</b> .....	<b>85</b>
7.1.	HAT NAPOS EXCENTRIKUS EDZÉSES VIZSGÁLAT .....	85
7.2.	VIBRÁCIÓS EDZÉSES VIZSGÁLAT .....	86
<b>8.</b>	<b>ÖSSZEFOGLALÁS</b> .....	<b>87</b>
<b>9.</b>	<b>IRODALOMJEGYZÉK</b> .....	<b>89</b>
<b>10.</b>	<b>SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE</b> .....	<b>115</b>
10.1.	DISSZERTÁCIÓHOZ KAPCSOLÓDÓ CIKKEK: .....	115
<b>11.</b>	<b>KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS</b> .....	<b>116</b>

## ***1. Rövidítések jegyzéke***

A, B, C, F, G, H, L, M, N excentrikus edzésben résztvevő személyek és kódjaik  
D, E, I, K, O, P excentrikus edzéses vizsgálatban a kontroll csoport tagjai és kódjaik  
ATP adenzintrifoszfát  
 $\alpha$ ATP alfa-adenozintrifoszfát  
 $\beta$ ATP beta-adenozintrifoszfát  
 $\gamma$ ATP gamma-adenozintrifoszfát  
CK kreatin kináz  
PCr kreatin foszfát  
dM forgatónyomaték növekedés mértéke  
DOMS delayed onset of muscle soreness  
EC excentrikus edzést folytató csoport  
FT% gyors rost százalékos aránya  
IGF-1 Insulin-like growth factor 1  
KC kontroll csoport (hat napos excentrikus edzéses vizsgálat esetén)  
K kontroll csoport (vibrációs edzéses vizsgálat esetén)  
LDH laktát dehidrogenáz  
MHC miozin nehéz lánc  
Mp csúcsforgatónyomaték  
MRI képkötő mágneses rezonancia eljárás  
fMRI funkcionális mágneses rezonancia  
MRS mágneses rezonancia spektroszkóp  
N-3 az edzés megkezdése előtti 3. nap  
N1 1. edzésnap  
N2 2. edzésnap  
N3 3. edzésnap  
N4 4. edzésnap  
N5 5. edzésnap  
N6 6. edzésnap  
N7 az edzések befejezését követő nap  
Pi inorganikus foszfát/nem organikus foszfát

ST% lassú rost százalékos aránya

V20-40 vibrációs csoport, 20 Hz-es, majd 40 Hz-es vibrációs edzésben vettek részt

V40-20 vibrációs csoport, 40 Hz-es, majd 20 Hz-es vibrációs edzésben vettek részt

WBV egésztest vibráció

## **2. Bevezetés**

Az élsportolók erőfejlesztő edzésében évtizedek óta alkalmazzák azokat a gyakorlatokat, amelyek az izom erőteljes megnyújtását is magában foglalja, azaz az ízületek kinyújtását megelőzi az ízületek behajlása. Az izmok erőteljes megnyújtás alatti kontrakcióját excentrikus kontrakciónak nevezik. Az excentrikus kontrakció során az izmok feszülése jelentősen megnövekszik és nagyobb, mint izometriás vagy koncentrikus kontrakciónál. Ebből kiindulva kezdték alkalmazni az úgynevezett excentrikus erőedzéseket. A vizsgálatok és a gyakorlati tapasztalatok bizonyították, hogy az izomerő, elsősorban a robbanékonyerő növekedése excentrikus edzéssel jelentősen nagyobb, mint izometriás vagy koncentrikus kontrakciókat tartalmazó gyakorlatokat alkalmazva. Ezzel együtt a sportolók azt is tapasztalták, hogy a felkészülés elején az excentrikus edzéseket izomfájdalom, izommerevség kíséri az két-három napig. Ezt a jelenséget a magyar nyelvben izomláznak nevezik. A jelenség okait több mint száz éve kutatják, de csak az utóbbi húsz, harminc évben vált intenzívvé a vizsgálódás köszönhetően a korszerű vizsgálati módszerek és eszközök elterjedésének. Ma már elfogadott, hogy az izomlázat a szokatlan ingerek és a mozgások során történő izomnyújtás okozza. Világossá vált, hogy az izomláz okozta fájdalmat a nyújtás során keletkező mikrosérülések okozzák. Viszonylag kevés figyelem irányult a több napon keresztül alkalmazott excentrikus edzések hatásának vizsgálatára. A Semmelweis Egyetem Testnevelési és Sporttudományi Kar Biomechanika laboratóriumában tíz évvel ezelőtt kezdődtek el ezek a vizsgálatok. Ezeknek a kutatásoknak a során vetődött fel a kérdés, hogy a több napos excentrikus edzés vajon egységesen vagy szelektíven hat a gyors és lassú izomrostokra a különböző rostösszetételű izmokban. Amennyiben feltételezzük, hogy az excentrikus edzés elsősorban a robbanékonyerőt fejleszti, akkor az is feltételezhető, hogy az excentrikus edzések elsősorban a gyorsrostokra vannak hatással. Minthogy az emberi izmok kevert rostösszetételűek felmerült a kérdés, hogy az excentrikus edzés a gyors vagy a lassú izmokban okoz jelentősebb mikrosérülést.

A mechanikai vibráció alkalmazása a sportolók edzésében, különböző mozgásszervi betegségek kezelésében és rehabilitációjában az utóbbi tizenöt évben vált elterjedtté. Leggyakrabban az úgynevezett egésztest vibrációnak a hatását vizsgálták a vibrációt érő izmok erő kifejtésére, a fizikai teljesítményre és az egyensúlyozó képességekre. A kezdeti vizsgálatok többségében arról számoltak be, hogy a kis

amplitúdójú (2-6 mm) és relatíve nagy frekvenciájú (20-50 Hz) vibrációs intervenciók után a vizsgált személyek nagyobb erő kifejtésre voltak képesek, mint a vibráció előtt. Ezt a hatást a vibráció által kiváltott tónusos vibráció reflex okozta izomfeszülésnek növekedésnek tulajdonították. Ezt követően jelentős számú vizsgálatot végeztek különböző vibrációs terhelést alkalmazva különböző populációkból vett mintákon. Ma már jelentős azoknak a vizsgálatoknak a száma, amelyek arról számolnak be, hogy bizonyos esetekben a mechanikai vibráció nem minden esetben okoz erő és fizikai teljesítménynövekedést a vibrációt követően, illetve néhány kutató azt is kimutatta, hogy ugyanazon vibrációs terhelésű edzés jelentős visszaesést eredményezett a fizikai teljesítményben. A teljesítménycsökkenést a kutatók többsége a vibráció okozta fáradásnak tulajdonította. Az irodalmi adatok azonban nem egységesek abban a vonatkozásban, hogy a fáradás idegrendszeri vagy izom eredetű. Néhány esetben kizárták az idegrendszer fáradását. Ugyanakkor közvetlen bizonyítékaink nincsenek arra, hogy a vibráció okozta teljesítménycsökkenésnek izomenergetikai okai vannak. A <sup>31</sup>P MR spektroszkópia lehetőséget biztosít arra, hogy a bioenergetikai változásokat közvetlenül vizsgálhassuk. Eleddig egy vizsgálatot végeztek ezzel a korszerű vizsgálati eljárással, de csak egy, viszonylag alacsony frekvenciánál vizsgálták a vibráció hatását az izmok energia metabolizmusára.

Minthogy a vibrációs frekvencia nagyságának jelentős befolyása van az izmok feszülési állapotára, feltételezhető, hogy különböző nagyságú frekvenciát alkalmazó vibrációs edzés különböző módon hat mind az idegrendszerre, mind az izmok nagy energiájú foszfátvegyületeinek mennyiségére, illetve változására. Ennek a feltételezésnek a megvizsgálásra terveztük meg második kutatási projektünket.



## **2.1. Irodalmi áttekintés**

### **2.1.1. Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat**

#### **2.1.1.1. Izomkontrakció**

Az izom ingerlés hatására aktív állapotba kerül, amely azt jelenti, hogy a két kontraktilis fehérje, az aktin és miozin filamentum egymáshoz kapcsolódik a miozin molekulák feji (kereszthidak) részén keresztül (Huxley A. F. and Niedergerke 1954, Huxley H. and Hanson 1954). A kereszthidak ATP jelenlétében az ATP bontásával mechanikai munkát végeznek, erőt fejtenek ki. Az izomnak ezt az aktív állapotát nevezik izomkontrakciónak.

Amennyiben az izmok két vége rögzített, és a külső erő nagyobb, mint amit az izom kifejteni képes adott hosszon, akkor az izom hossza változatlan marad miközben feszülése növekszik. Ezt a kontrakciót nevezik izometriás kontrakciónak. Az izmon belül az izom funkcionális egységeit, a szarkomereket, a kereszthidak rövidítik (Spudich 2001), miközben megnyújtják a velük sorban elhelyezkedő passzív elasztikus elemeket. Nevezetesen, a kereszthidak munkát végeznek a sorba kapcsolt elasztikus elemeken.

Abban az esetben, amikor az izom nagyobb erőt tud kifejteni, mint a külső erő, az izom hossza csökken. Ekkor a szarkomerek rövidülése hosszabb lesz, mint izometriás kontrakció alatt. Mechanikai értelemben a kontraktilis elemek végeznek munkát a külső környezeten. Ezt a kontrakciót nevezik koncentrikus kontrakciónak.

Amikor az izom aktív állapotban van és egy külső erő nagyobb erőt fejt ki, mint az izom adott hosszon, akkor az izom megnyúlik, miközben feszülése növekszik. Az izom megnyúlása mindaddig tart, míg az izom erőfejlesztésének nagysága egyenlő nem lesz a külső erővel. Mechanikai értelemben a külső erő végez munkát az izmon. A külső erő által felhasznált energia egy része elasztikus energiaként tárolódik az izom passzív elasztikus elemeiben. Ezt a kontrakciót nevezik excentrikus kontrakciónak. Amennyiben a külső erő elveszti összes energiáját, az izom rövidülhet (koncentrikus kontrakció) felhasználva a tárolt elasztikus energia egy részét munkavégzésre. Az excentrikus és koncentrikus kontrakció összekapcsolódását nyújtásos-rövidüléssel ciklusnak nevezi az irodalom.

### 2.1.1.2. *Excentrikus kontrakció*

Az excentrikus kontrakciónak két fázisát különböztetik meg.

1. Az izom ingerlését követően az izom feszülése növekszik, általában hosszváltozás nélkül.
2. Ezt követően a külső erő hatására az izom passzívan nyúlik, miközben feszülése tovább növekszik (Katz 1939, Stauber 1989).

Az izom excentrikus kontrakcióját vizsgáló kutatások arról számoltak be, hogy az izmok feszülése (maximális excentrikus ereje) nyújtás alatt 1,2-1,8-szorosa a maximális izometriás erőnek (Edman 1999, Hill 1938, Katz 1939, Singh and Karpovich 1966, Stauber 1989). A feszülés növekedés mértékét több tényező befolyásolja.

1. A passzív párhuzamos és sorba kapcsolt elasztikus elemek mechanikai tulajdonságai, a megnyújtás mértéke és az izomhossz, amelyen a nyújtás kezdődött (Edman 1999). Minél nagyobb hosszon kezdődik a nyújtás, annál nagyobb a feszülés növekedése. Nyugalmi hosszánál nagyobb hosszon megnyújtva az izmot, az izom feszülés 1,8-szor, nyugalmi hosszánál kezdődő nyújtás során 1,6-szor, nyugalmi hosszánál rövidebb hosszon alkalmazott nyújtásnál 1,4-szer nagyobb a maximális izometriás erőnél (Edman 1999). Ezek az adatok arra az esetre érvényesek, amikor a nyújtás amplitúdója kicsi. Amennyiben a nyújtás mértéke nagy terjedelmű, és a szarkomerek hossza is növekszik a nyújtás alatt, akkor a párhuzamos elasztikus elemek ellenállása növeli az izom feszülését. A legújabb vizsgálatok azt feltételezik, hogy a feszülés növekedéséhez a legnagyobb mértékben a titin megnyúlása járul (Labeit and Kolmerer 1995, Wang et al. 1993).
2. Ha a nyújtás rövid, és nyugalmi hossz környékén kezdődik, akkor a feszülés növekedése elsősorban a sorba kapcsolt elemek megnyújtásának a következménye, amelyek közül az ínak fejtik ki a legnagyobb ellenállást a megnyújtó erőkkkel szemben (Roberts 2002). Ebben az esetben a szarkomerek hossza általában nem változik, bizonyos esetekben akár rövidülhetnek a szarkomerek is (Biewener et al. 1998, Griffiths 1991, Prilutsky et al. 1996, Roberts et al. 1997). Minthogy a kontraktilis elemek feszülése hasonló mértékben növekszik, mint a sorba kapcsolt elemeké, nagy nyújtóerő hárul a

szarkomereket határoló „Z” lemezekre is, amelyek szintén elasztikus elemként működnek.

3. A nyújtás sebessége is befolyásolja a feszülés növekedésének mértékét, bár a nyújtás sebességének növelése egy bizonyos határon túl hatástalan a feszülés növekedésének nagyságára (Hill 1938, Katz 1939).
4. A közelmúltban közölt vizsgálatok eredményei arra mutatnak rá, hogy az excentrikus kontrakció alatti feszülés növekedésnek oka nem csak a passzív elemek megnyújtása, hanem a kereszthidak kapcsolódásának száma is megnövekszik, amely feltétlenül szükséges a kontraktilis elemek feszülésének növekedéséhez, hogy feszülésük azonos legyen a sorba kapcsolt elemek feszülésével (Linari et al. 2000).
5. Akaratlagos izomkontrakciók során - amennyiben az izmok nyújtása akkor következik be, amikor az izom feszülése alacsony - a nyújtás hatására jelentősen megnövekszik az izom feszülése, amely csak részben tulajdonítható a passzív elasztikus elemek megnyújtásának. Amennyiben a cél az, hogy az izom a legnagyobb ellenállást fejtsse ki a külső erővel szemben, akkor új motoros egységeket kell bekapcsolni ahhoz, hogy a sorba kapcsolt elasztikus elemek feszülése megnövekedjen, és ellenállást tudjanak kifejteni a külső erővel szemben. Ha az izom megnyújtása nagy sebességgel történik, akkor a nyújtási reflex révén is bekapcsolódhatnak új motoros egységek, illetve a működő motoros egységek kisülési frekvenciája is megnövekedhet. Ez a változás magyarázhatja a nagyobb számú kereszthid kapcsolatát, amelyhez az is szükségeltetik, hogy excentrikus kontrakció alatt 38 százalékkal több kalciumion legyen a szarkoplazmában (Gordon and Ridgway 1993).

### **2.1.1.3. Excentrikus edzés**

Minthogy az excentrikus kontrakció során az izom feszülése jelentősen nagyobb, mint izometriás vagy koncentrikus kontrakció alatt, feltételezhető volt, hogy az izomerő növelésére célszerű olyan erőfejlesztő gyakorlatokat alkalmazni, amely magába foglalja az izom megnyújtását. Jelentős számú vizsgálatot végeztek annak megállapítására, hogy csak excentrikus kontrakcióval végzett edzés mennyivel nagyobb erőnövekedést okoz, mint az izometriás vagy a koncentrikus gyakorlatok. Csaknem valamennyi kutató azt

találta, hogy az excentrikus kontrakcióval végrehajtott (Roig et al. 2010) erőedzés nagyobb erőnövekedést eredményezett, mint a koncentrikus, vagy izometriás edzés, akár szubmaximális (Hortobagyi et al. 1996b), akár maximális terhelést alkalmaztak (Dibble et al. 2006, Duchateau and Baudry 2013, Dudley et al. 1991, Engardt et al. 1995, Hortobagyi and DeVita 2000, Hortobagyi et al. 1996a, Hortobagyi et al. 1998, Hortobagyi et al. 1996b, Isner-Horobeti et al. 2013, Komi and Buskirk 1972, Lastayo et al. 2010). Hortobagyi et al. (1996a) azt is kimutatták, hogy az excentrikus edzés nem csak az excentrikus erőre, de az izometriás és koncentrikus erő kifejtésre is jelentős hatással van. Az excentrikus edzés jelentősebb erőnövelő hatása neurális (Sale 1988) és kontrakció szabályozási tényezőknek (pl.  $Ca^{++}$  ion transzport) tudható be (Gordon and Ridgway 1993, Linari et al. 2000).

Az utóbbi húsz év kutatásai egy másik tényezőre is felhívják a figyelmet, amely az excentrikus kontrakciót magában foglaló edzések okozta jelentős erőnövekedést jól megmagyarázza. Nevezetesen az izmok megnyújtása mikrosérüléseket okoz az izom finom szerkezetében, és az izomméretet szabályozó gének működése úgy változik, hogy a kontraktilis fehérjék proliferizációját támogató gének hatása kerül túlsúlyba (Costa et al. 2007, 2009).

#### **2.1.1.4. Az izom mikrosérülése (izomláz)**

A magyar nyelvben használt izomláz, a fizikai terhelést követő izomfájdalmat jelenti. A nemzetközi irodalomban delayed onset of muscle soreness (DOMS) néven ismeretes, amely egy tünetegyüttest jelöl, amely az izmok merevségében és fájdalmában jelentkezik (Cheung et al. 2003, Connolly et al. 2003, Murayama et al. 2000). Az izomfájdalom a fizikai terhelést, edzést követő 12 óra után válik érezhetővé, és 24-72 óráig tart. Ezt követően az izomláz automatikusan megszűnik (Chen and Nosaka 2006, Mair et al. 1995, Nosaka et al. 2001a, b, Vaczi et al. 2011). Az izomláz eddigi ismereteink szerint nem szüntethető meg külső hatásokra. A leggyakrabban alkalmazott masszázis időlegesen valamelyest csökkentette az izomfájdalmat és az izomduzzanatot, de nem szüntette meg az izomláz kiváltó okokat (Ernst 1998, Hilbert et al. 2003, Zainuddin et al. 2005). Mint ahogy feltételezték, és a későbbiekben igazolták is, az izomfájdalmat az izomban a gyulladás okozza, ezért a fájdalom

csökkentésére hűtést, jegelést alkalmaztak, de ez a kezelés sem szüntette meg az elhúzódó izomfájdalmat (Howatson and Van Someren 2003, Isabell et al. 1992). Hasonlóképpen az izommerevség megszüntetésére alkalmazott stretching (Cheung et al. 2003), a homeopátiás módszerek (Vickers et al. 1997), az ultrahangkezelés (Craig et al. 1999), az elektromos stimuláció (Allen et al. 1999, Butterfield et al. 1997), a C-vitamin kúra (Close et al. 2006, Thompson et al. 2003, 2004), vagy az elektromágneses kezelés (Jeon et al. 2014) sem hozott eredményt a tünetek csökkenésében.

A fentiekből is következik, hogy az izomláz kialakulásának okai és megszűnése autonóm folyamatok irányítása alatt áll. Több évtizedes vizsgálódás után ma már elfogadott elmélet, hogy az izomláz, amelynek tüneteit az előző paragrafusban leírtunk, az izom mikrosérüléseit követő jelenségek. Az izomsejt mikrosérülése természetes velejárója az izmot érő szokatlan erőhatásoknak, amelyek csaknem kizárólag olyan munkavégzés után jelentkeznek, amelyek az izmok megnyújtását magukba foglalják. Ilyen lehet például a lejtőn lefelé futás, a lépcsőn lefelé járás, amelyeknél a talajjal történő ütközés nagyobb, mint a síkon történő járásnál, futásnál (Eston et al. 1996). A talajjal történő ütközés az ízületek behajlásával jár, következésképpen az izmokat gyors, erőteljes nyújtás éri (Friden et al. 1981, Schwane and Armstrong 1983, Schwane et al. 1983, Stauber et al. 1990).

#### **2.1.1.5. A mikrosérülések indirekt és direkt jelzői**

Bár az izomláz jelensége több, mint száz éve leírásra került (Hough 1900), a kiváltó okokat csak harminc évvel ezelőtt kezdték el behatóan vizsgálni. Mai ismereteink alapján indirekt és direkt izomláz jelzőket különböztetünk meg. Az indirekt markerek többféle ok együttes hatásaként jelennek meg, éppen ezért nem minden esetben adnak pontos felvilágosítást az izom mikrosérüléséről és annak a súlyosságának fokáról.

##### **2.1.1.5.1. Indirekt markerek**

1. Izomfájdalom. Az izomfájdalom fokát tíz fokozatú skálán vizsgálják. Az egyes fokozatban nincs izomfájdalom, a tízes fokozatnál nyugalomban is kellemetlen fájdalmat éreznek a személyek. Az izomra gyakorolt nyomás, az izom

akaratlagos megfeszítése gyakran nehezen elviselhető fájdalmat okoz. Feltételezik, hogy a sérülés helyén felszaporodó makrofágok, a struktúrából kiváló fehérje részecskék okozta gyulladás, savasodás ingerli az érzőidegeket, és ez váltja ki a fájdalom érzetét (Armstrong R. B. et al. 1991, Lieber and Friden 1999, McNeil and Khakee 1992). Mindazonáltal ki kell hangsúlyozni, hogy ez az izomláz jelző bár a fájdalom valós, de a fokának besorolása szubjektív.

2. A kialakuló izomfájdalommal egyidejűleg az izom erő kifejtésének nagysága csökken (Cheung et al. 2003, Clarkson et al. 1992, Connolly et al. 2003, Gibala et al. 1995, Hortobágyi et al. 1998, Nosaka and Clarkson 1995), amely az esetek többségében az izomnyújtást követő két-három napon belül megszűnik, és az erő kifejtés nagysága fokozatosan visszatér a kiindulási szintre. Meg kell azonban jegyezni, hogy számos vizsgálatban azt találták, hogy az izom maximális ereje akár hónapokkal később is kisebb volt, mint az izomnyújtást, illetve excentrikus edzés megkezdése előtt (Foley et al. 1999, Newham et al. 1987, Nosaka et al. 1991). Feltételezhetően ennek vizsgálati modell okai is lehetnek.
3. Számos kutató figyelte meg, hogy az excentrikus edzést követően a motoros kontroll gyengült (Leger and Milner 2001, Miles et al. 1997, Pearce et al. 1998).
4. Az izomfehérjék (kreatin kináz, mioglobinn, az izom nehéz lánc részecskéi) megjelenése a vérben (Brown et al. 1997, Clarkson et al. 1986, Kirwan et al. 1986, MacIntyre et al. 2001, Sorichter et al. 1997). A kreatin kináz (CK) felszaporodása a vérben a legjellegzetesebb és legnagyobb mérvű. A CK szintje a vérben a normálisnak több százszorosa is lehet. Ezenkívül a laktát dehidrogenáz (LDH) mennyisége is megnő a vérben, bár nem olyan drámaian, mint a CK-é. A CK gyors és nagy mennyiségű megjelenését a kutatók a sejtmembrán integritásának megváltozásából származó permeabilitás növekedésnek tudják be (Armstrong R. B. et al. 1991, Lieber and Friden 1999, McNeil and Khakee 1992). A szokatlan ingert jelentő excentrikus edzés után a vérben kimutatható CK és LDH felszaporodását használják a kutatók a mikrosérülések kimutatására, amelyet ma már indirekt jelzőnek (markernek) tekintenek.

#### **2.1.1.5.2. Az izom mikrosérülésének direkt jelzői**

1. A szarkomereket határoló „Z” lemezek szakadása, szerkezetének felbomlása (Friden and Lieber 1998, Friden et al. 1983) amely az izomnyújtást követően azonnal kimutatható biokémiai módszerekkel (Koh and Escobedo 2004);
2. A sejt membrán integritásának megváltozása (Armstrong R. B. et al. 1991, Lieber and Friden 1999, McNeil and Khakee 1992), amelyet fény és elektron mikroszkópos képeken jól fel lehet ismerni;
3. A miofibrillumok szabályozottságát és integritását stabilizáló (Carlsson and Thornell 2001, Thornell et al. 1997) desmin csökkenés, illetve eltűnése a miofibrillumokból (Friden and Lieber 1998, 2001, Lieber et al. 1996, Small et al. 1992).
4. Az izomműködéshez szükséges energiaszolgáltató anyagok csökkenése (Evans 1991, Ferry et al. 1992).
5. A kalcium ionok abnormális felszaporodása a szarkoplazmatikus retikulum sérülése miatt (Armstrong R. B. 1990), amely meggátolja a kalcium ionok felvételét. A kalcium ionok kiáramlását a sejt közötti állományba a szarkolemma sérülése okozza (Armstrong R. B. 1990, Byrd 1992, Ebbeling and Clarkson 1989, Evans and Cannon 1991).
6. Az izom nyújtása közben, illetve az excentrikus edzés során, illetve azt követően létrejövő változások az izom ultrastruktúrájában nem csak fehérjék kiáramlását jelenti, de olyan anyagok, fehérjék beáramlását is, amelyek a regenerálódást, a struktúra újra építését indítják el. Ezek a beáramló fehérjék, amelyek közül, jelenlegi ismereteink szerint, a fibronectin a legjelentősebb, szintén direkt jelzői az izomsérülésnek (Crenshaw et al. 1993, Holmbom 1997, Lieber et al. 1996, Thornell et al. 1992, Yu et al. 2002).

#### **2.1.1.6. Módszerek az izomláz kiváltására**

Az izomláz tanulmányozására a kutatók különböző modelleket, elméleteket állítottak fel és a jelenség okait jól körülhatárolt paradigmák mentén vizsgálták. Mind in vitro, mind in vivo állat és humán vizsgálatokat végezve jutottak alapvető felismerésre.

### **2.1.1.7. Egy sorozat nyújtás alkalmazása**

Az izomláz kiváltása a legkönnyebben nem anti-gravitációs izmokban lehetséges, mint például a karhajlító izmokban (Chleboun et al. 1998, Howell et al. 1993, Jones et al. 1987, Murayama et al. 2000, Nosaka et al. 2001a). Amennyiben az inger szokatlan volt a személyek számára, és a nyújtás nagy terjedelmű (minimálisan 90 fokos mozgásterjedelem), akkor viszonylag kisszámú ismétlésszám is elegendőnek bizonyult a DOMS jelenség kiváltására, de az ismétlésszám növelésével az izomláz indirekt mutatói jelentősebb változást okoztak (Nosaka et al. 2001a).

### **2.1.1.8. Ismételt excentrikus edzés**

Jelentős számú vizsgálatot végeztek annak megállapítására, hogy a megismételt excentrikus edzés ugyanazon hatást váltja ki az izomban, mint az első edzés (Chen 2003, Chen and Nosaka 2006, Clarkson and Tremblay 1988b, Faulkner et al. 1992, Foley et al. 1999, Haddad and Adams 2002, Hortobagyi et al. 1998, McHugh et al. 1999, Newham et al. 1987, Nosaka and Clarkson 1995, Nosaka et al. 2001a, Pizza et al. 1996, Sacco and Jones 1992). A vizsgálatok egyértelműen azt mutatták, hogy a megismételt excentrikus edzés úgynevezett protektív hatást vált ki, ami azt jelenti, hogy az izmok adaptálódnak az izom erőteljes megnyújtásához, vagyis ugyanaz az edzés már nem szokatlan inger a szervezet számára. A protektív mechanizmus létrejöttét több folyamatnak tulajdonítják a kutatók. Egyik elmélet szerint az izom mikrosérülését követően azonnal megkezdődik az izom regenerálódása. Nevezetesen, az izomszerkezet újbóli felépítése, amelynek hormonális és gén expressziós háttere van (Yu et al. 2002, 2003). Ez a folyamat összefüggésben van azzal a génexpressziós változással, ami a növekedést szabályozó gén, a miosztatin aktivációjának csökkenésével van kapcsolatban (Joulia et al. 2003, Langley et al. 2002, McCroskery et al. 2003), amelyet az izom sérülése vált ki (Costa et al. 2007). A másik elképzelés szerint az excentrikus edzés hatására felszaporodnak az izom gyulladási folyamatait gátló anyagok az epimiziumban, ezért a megismételt excentrikus kontrakciók során csökkentik vagy megakadályozzák az izom mikrosérülését (Malm et al. 2004).



### **2.1.1.9. Több napos excentrikus edzés**

Minthogy a sport gyakorlatában az edzések során az izmokat minden nap érik erőteljes nyújtások, az utóbbi időben több vizsgálatot is végeztek annak megállapítására, hogy a mindennapos excentrikus edzés milyen hatást vált ki az izomban (Chen and Hsieh 2000, 2001, Costa et al. 2007, 2009, Hortobagyi and DeVita 2000, Hortobagyi et al. 2001, Vaczi et al. 2009, 2011). Valamennyi vizsgálatban hat (Costa et al. 2007, Vaczi et al. 2009) vagy hét napos (Hortobagyi and DeVita 2000, Hortobagyi et al. 2001, Vaczi et al. 2011) excentrikus edzést alkalmaztak és a kontrakciók száma nem változott az egyes alkalmakkor. Az ízületi szögtartomány változó volt, amely során az izmok nyújtásra kerültek. A kis terjedelmű nyújtások esetén a DOMS indirekt markerek (CK, LDH) változása és az izomerő csökkenése kisebb (Vaczi et al. 2009, 2011), mint a nagy terjedelmű nyújtások alkalmazásakor (Chen and Hsieh 2001, Costa et al. 2007) volt. Hasonlóan a kis intenzitású és terjedelmű edzés (Hortobagyi and DeVita 2000, Hortobagyi et al. 2001) hatása a mikrosérülés kialakulására kisebb volt, mint a nagy intenzitású és terjedelmű izomnyújtásoknál (Chen and Hsieh 2001, Costa et al. 2007). A vizsgálatok többsége arra a megállapításra jutott, hogy az izmok izometriás ereje csökkent az edzést követő 48-72 órában, majd emelkedni kezdett az edzésperiódus végéig. Az egy excentrikus edzés hatással ellentétben a kreatin kináz aktivitása a legtöbb esetben nőtt egészen az edzésperiódus végéig (Costa et al. 2007). Valamennyi tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy a mindennapos excentrikus edzés nem növeli az izom mikrosérülését és nem befolyásolja az izom regenerálódását. A kutatási eredményekből az a következtetés is levonható, hogy a CK nem jelzi közvetlenül az izomsérülés fokát.

### **2.1.1.10. Az izmok rostösszetétel és excentrikus edzés okozta mikrosérülés**

Régóta ismert, hogy egyes izmok zömében vagy teljes egészében lassú (I típus), vagy gyors (II típus) rostokból épülnek fel (McPhedran et al. 1965b). Az izmok többsége azonban úgynevezett kevert rostösszetételű, azaz mind lassú mind gyors izomrostokat tartalmaznak különböző arányban (McPhedran et al. 1965a).

A lassú rostokat az alacsony ingerküszöbű, kis, hosszú kontrakciós idejű és kevésbé fáradékony motoros egységek idegezik be. A gyorsrostok a magas ingerküszöbű, nagy,

rövid kontrakciós idejű, de fáradékony motoros egységekhez tartoznak. A rostösszetételtől függetlenül a motoros egységek méretelv alapján kerülnek bekapcsolásra (Henneman et al. 1965). A legújabb kutatási eredmények azt bizonyítják, hogy a motoros egység bekapcsolási sorrend az ideg elektromos ingerlése esetén is a méretelv szerint történik (Gregory and Bickel 2005). A motoros egység bekapcsolási sorrend és a munkát végző izomrostok típusa azonban megváltozhat bizonyos körülmények között, legalábbis néhány kutatási eredmény ezt sugallja. A motoros egységek bekapcsolásának sorrendiségét és mennyiségét az izomkontrakciók típusa is befolyásolja. Moritani et al. (1987) vizsgálatai azt jelezték, hogy excentrikus kontrakció alatt kevesebb motoros egység került bekapcsolásra, mint koncentrikus kontrakció során, ami indokolhatja, hogy az izmok elektromos aktivitása kisebb excentrikus kontrakcióban, mint koncentrikus kontrakcióban (Komi and Buskirk 1972). Egy másik megközelítésben a kutatók azt vélelmezték, hogy az excentrikus kontrakció során elsősorban a gyors motoros egységek járulnak hozzá az erő kifejtés növekedéséhez (Howell et al. 1995, McHugh et al. 2002). Ugyanakkor mások vizsgálati eredményeikből azt a következtetést vonták le, hogy excentrikus kontrakció során a motoros egység bekapcsolódási sorrend módosul, ami a nagy, gyors motoros egységek szelektív bekapcsolását jelenti (Howell et al. 1995, Nardone and Schieppati 1988, Nardone et al. 1989). A motoros egység aktivációt vizsgáló kutatók ezzel némileg ellentétes megfigyelésről számoltak be. Nevezetesen az excentrikus kontrakció alatt azt mutatták ki, hogy a motoros idegek kisülése az alacsonyabb frekvenciák irányába tolódott el (Duchateau and Baudry 2013).

A lassú és gyors izomrostok felépítése alapvetően nem különbözik egymástól. A szarkomerek szerkezete és a kontraktilis fehérje állomány is ugyanolyan. Ugyanakkor korábbi vizsgálatok azt mutatták ki, hogy a szarkomereket határoló „Z” lemezek vastagsága különböző. A gyorsrostok „Z” lemeze vékonyabb (30-50 nm), mint a lassúrostokban (100 nm) (Eisenberg 2010, Friden et al. 1983, Horowitz 1992). A lassú és gyors izomrostok kontraktilis tulajdonságaiban is találhatók jellegzetes különbségek. Nevezetesen a keresztídhíd ciklus különbözik a két rosttípusban (Reggiani et al 1997; He et al. 2000). Mindezekből a különbségekből feltételezhető volt, hogy a nyújtás okozta mikrosérülések másképpen érintik a lassú és gyorsrostokat.

Ennek a feltételezésnek a bizonyítására számos vizsgálatot végeztek állat és humán modellben. Az esetek többségében arról számoltak be a kutatók, hogy a gyorsrostokból felépülő izmok, illetve IIa és IIx nehéz meromiozint tartalmazó rostok érzékenyebben reagáltak a nyújtásos kontrakciókra, mint a lassú rostok, mind humán (Cermak et al. 2013, Friden et al. 1983, Friedmann et al. 2004, Jones et al. 1986), mind állati izmokon végezve a vizsgálatokat (Lieber and Friden 1988, Macaluso et al. 2012, Vijayan et al. 2001), vagy másfajta vizsgálati modellt alkalmazva (Hanke et al. 2010). Mindazonáltal vannak kísérletes bizonyítékok arra, hogy az excentrikus edzés, vagy az izom sorozatos megnyújtása elsősorban a lassúrostokban váltanak ki mikrosérüléseket (Armstrong R. B. et al. 1983, Hody et al. 2013, Mair et al. 1995, Vijayan et al. 2001).

Az előzőekben kutatók vizsgálataikat többségében zömében gyorsrostokból, vagy lassúrostokból felépülő izmokon végezték és így nem tudták megállapítani, hogy a kevert rostösszetételű izmokban mindkét izomrosttípusra egy időben kiterjedő nyújtás melyik izomrostban okoz jelentősebb szerkezeti változásokat és milyen mértékben. Mindezidáig egy olyan humán vizsgálatot közöltek, amelyben a DOMS indirekt jelzői és az izom százalékos rostösszetétele között kerestek kapcsolatot (Magal et al. 2010). Nem találtak szignifikáns kapcsolatot a rostösszetétel és a CK aktivitás között, amely az izom excentrikus kontrakcióit követő 24. órában volt a legmagasabb. Ugyanakkor szignifikáns összefüggést mutattak ki a rostösszetétel és az izomfájdalom között. Meg kell azonban jegyezni, hogy a CK aktivitás az izomnyújtásnak köszönhetően csupán a kétszeresére emelkedett, ami csupán töredéke azoknak az adatoknak, amit az irodalomban találni, és ami közvetett úton utal az izomnyújtás okozta mikrosérülésre. A tíz fokozatú skálával mért izomfájdalom hatos erősségű volt, ami szintén azt mutatja, hogy az alkalmazott izomnyújtási paraméterek túl alacsonyak voltak (30 fok/s állandó sebesség, 3x50 excentrikus kontrakció, a nyújtási tartomány nem ismert). Ezek a mért adatok arra utalnak, hogy az alkalmazott edzés nem okozhatott jelentős sérülést a sejtmembránban és a szarkolemmában. Ebből adódóan fenntartással kell fogadnunk azt a következtetést, hogy a gyorsrostok reagáltak érzékenyebben az izom nyújtására.

*Összefoglalóan levonható az a következtetés, hogy a több napos, egymást követő excentrikus izommunka nem okoz további izomsérülést és az izom regenerálódása genetikus szabályozás alatt áll. Ugyanakkor nem világos, hogy a kevert rostösszetételű*

*izmokban mely izomrost típusok reagálnak érzékenyebben az izom nyújtására, és vajon a gyors és lassúrostok ugyanazon periódusban szenvednek-e mikrosérülést és vajon a regenerálódásuk kezdete ugyanazon időpontra esik-e. Úgy tűnik, hogy a fibronectin megjelenése a szarkoplazmában az egyes izomrostokban jó jelzője annak, hogy az izomnyújtás mely rosttípusban okozott szerkezeti változást.*

## **2.1.2. Vibrációs edzéses vizsgálat**

### **2.1.2.1. A mechanikai vibráció**

Földi környezetben a rezgés természetes jelenség. Szinte minden testnek van úgynevezett naturális rezgési frekvenciája. Ezt a jelenséget évszázadok óta ismeri az emberiség. Ezek a rezgések vibrációs hatást fejtenek ki az emberi szervezetre, amelynek káros és hasznos hatása is lehet attól függően, hogy a vibráció mekkora és milyen terhelést jelent a szervezet számára. A rezgéseket keltő eszközök elterjedésével, a vibráció sokkal gyakrabban, és huzamosabban éri a mozgatórendszert, mint a történelem korábbi szakaszaiban. Az elmúlt évszázadban jelentős számú kutatást végeztek annak kiderítésére, hogy milyen esetekben fejt ki káros hatást a vibráció, és milyen esetekben fejlesztő, illetve gyógyító hatású.

Ma már széles körben elfogadott, hogy azokban a foglalkozásokban, ahol mindennapos, a tartós nagy amplitúdójú (1-3 cm) és kis frekvenciájú (5-10 Hz) vibráció éri a testet, a hatás elsősorban káros hatást fejt ki a mozgatórendszerre. A káros hatások akkor jelentkeznek, amikor a vibráció ülőhelyzetben éri a testet (pl. autóvezetés, helikoptervezetés) (Magnusson et al. 1998, Seidel and Heide 1986). Ha a vibráció nem minden nap, csak alkalmanként hat a testre, akkor akár a hatás pozitív is lehet. Egy közelmúltban megjelent tanulmány arra mutatott rá, hogy 4,5-6 Hz-es vibráció pozitív hatással volt az ütéstérfogatra és megnövelte a metabolikus választ (Maikala and Bhambhani 2008).

Az utóbbi húsz évben jelentős számú vizsgálatot végeztek az egésztest vibráció (WBV) fizikai teljesítményre gyakorolt hatását illetően. Az esetek többségében a fizikai teljesítmény, az izometriás és dinamikus erő növekedéséről számoltak be a kutatók a vibrációt követő egy órán belül (Bazett-Jones et al. 2008, Bosco et al. 1999a, Cochrane and Stannard 2005, Issurin and Tenenbaum 1999, Mileva et al. 2006, Tihanyi J. et al.

2010b, Tihanyi T. K. et al. 2007). Ezt a hatást akut visszamaradó hatásnak nevezi az irodalom. A vibráció akut teljesítményt növelő hatását a kutatók többsége a neurális rendszer facilitációjának tudja be (Cochrane et al. 2004, Delecluse et al. 2003, Issurin and Tenenbaum 1999), amelyet kutatási eredmények bizonyítanak (Bongiovanni and Hagbarth 1990, Rittweger 2010). Ugyanakkor néhány esetben a kutatók arról számoltak be, hogy a WBV nem okozott teljesítményjavulást, vagy éppen a teljesítmény visszaesése következett be, amelyet a vibráció idegrendszeri gátlására vezettek vissza (de Ruitter et al. 2003, Erskine et al. 2007, Herda et al. 2009). Egy másik elképzelés szerint a teljesítmény visszaesését neuromuszkuláris fáradás idézi elő. A fáradás e felfogás szerint annak tudható be, hogy a vibráció hatására a nagy ingerküszöbű, gyors motoros egységek kerülnek bekapcsolásra, amelyek a kis terhelésű vibráció hatására is gyorsan fáradnak (Bongiovanni et al. 1990, Henneman et al. 1965, McPhedran et al. 1965a, b).

#### ***2.1.2.2. A vibráció hatásmechanizmusa***

##### ***2.1.2.2.1. Neurális hatás, neurális adaptáció***

A vibráció kiváltja az úgynevezett tónusos vibrációs reflexet (Hagbarth et al. 1976), amelynek következtében megnövekszik az izmok aktivációja és ezáltal az izomorsók ingerlékenysége megnövekszik, amely magyarázza a vibráció alatti (Bosco et al. 1999a, Cardinale and Lim 2003, Cardinale et al. 2006, Issurin 2005, Issurin et al. 1994) és közvetlen az utáni teljesítménynövekedést (Bosco et al. 1998, Cormie et al. 2006).

Minthogy a vibráció alatt az izomrostokat nagyon kis amplitúdójú, de nagyon gyors nyújtás éri, a vibrációs edzés speciális excentrikus edzésnek is felfogható, amely neurális úton növeli meg az izom feszülését a vibráció alatt.

##### ***2.1.2.2.2. Hormonális hatás***

Jelentős számú kutatás számolt be arról, hogy az egésztest vibráció akut tesztoszteron (Bosco et al. 1996, 2000) és növekedési hormon (Bosco et al. 1996, Cardinale et al. 2006, 2010, Di Loreto et al. 2004, Erskine et al. 2007, Giunta et al.

2013) szintemelkedést okoz. Feltehetően a tesztoszteron megnövekedett szintjének abban lehet szerepe, hogy az ingerület átvitelt felgyorsítja, és ez által növeli meg a dinamikus erőkifejtést (Crewther et al. 2006, Kraemer and Ratamess 2005). Ugyanakkor jelentős számú azoknak a kutatásoknak a száma is, amelyekben nem találtak szignifikáns tesztoszteron hormonnövekedést (Cardinale et al. 2006, Di Loreto et al. 2004, Erskine et al. 2007, Gyulai et al. 2013, Kvorning et al. 2006). Ezekből az eredményekből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az egésztest vibrációnak nem minden esetben van specifikus hatása a tesztoszteron hormontermelésre. A vibráció növekedési hormontermelésre gyakorolt hatása is ellentmondásos, mivel néhány kutatásban nem sikerült hormontermelés növekedést kimutatni (Cardinale et al. 2006, Di Loreto et al. 2004, Goto and Takamatsu 2005) valószínűleg a növekedési hormon pulzatív szekréciója miatt (Corpas et al. 1993). Ugyanakkor úgy tűnik, hogy az egésztest vibrációnak jelentős hatása van a növekedési hormon és az inzulinhoz hasonló növekedési hormon tengelyre (GH-IGH1)(Cardinale et al. 2010).

#### ***2.1.2.3. A vibrációs paraméterek befolyása***

A vibrációs terhelést alapvetően a vibrációs frekvencia nagysága, a vibrációs amplitúdó és a frekvencia hatásából származó gyorsulás határozza meg (Luo et al. 2005). További befolyásoló tényezők az egésztest vibráció alatti testhelyzet (Gyulai et al. 2013), az izomkontrakció fajtája (izometriás, vagy dinamikus), a vibráció időtartama, a vibrációs hatások gyakorisága és az egyes alkalmazások közötti pihenőidő. A vibráció hatását továbbá befolyásolhatja a személyek edzettségi és egészségi állapota (Delecluse et al. 2003, Tihanyi J. et al. 2010b, Tihanyi T. K. et al. 2007).

##### ***2.1.2.3.1. Vibrációs frekvencia***

Úgy tűnik, hogy a vibráció frekvenciája az egyik legfontosabb tényező, amely különböző módon hat az egyes személyekre. Az optimális frekvencia meghatározására számos vizsgálat született. Egyes feltételezések szerint ez a frekvencia 27 Hz (Bosco et al. 1998), mások azt találták, hogy ennél kisebb (Cardinale and Lim 2003, Tihanyi J. et al. 2010b), vagy nagyobb frekvencia alkalmazása (Bogaerts A. et al. 2007, 2009,

Bruyere et al. 2005, Delecluse et al. 2003, Rees et al. 2008, Roelants et al. 2004a, 2004b) is akut teljesítményjavuláshoz vezet. Feltételezhetően a vizsgálatban részt vevő személyek edzettségi állapota alapvetően meghatározza a vibráció frekvenciáját. Ezt a feltevést igazolja, hogy Delecluse et al. (2003) 40 és 50 Hz-es frekvenciájú edzés után talált szignifikáns javulást vágtafutóknál, Tihanyi et al. (2007) 20-25 Hz vibrációs frekvenciát alkalmazva akut stroke betegekben jelentős javulást értek el a térdfesztés erő kifejtésében. Ma egyre elfogadottabb nézet, hogy a vibrációs paramétereket, amely mindenki esetében a legnagyobb változást okozza az izomerőben és a fizikai teljesítményben egyénre szabottan kell meghatározni (Bongiovanni et al. 1990, Cardinale and Bosco 2003, Cardinale and Lim 2003, Di Giminiani et al. 2009, Zange J et al. 2009). Úgy tűnik, hogy a legnagyobb hatást kiváltó vibrációs frekvencia 20-50 Hz között változik. A gyógyászatban és a fizikai rehabilitációban ennél magasabb frekvenciát alkalmaztak, de a rehabilitáció sikeressége nem volt egyértelmű (van Nes et al. 2006).

#### **2.1.2.3.2. Vibrációs amplitúdó és gyorsulás**

A vibráció szinuszos rezgéshullámokat kelt, amelynek amplitúdója a vibrációs eszköz fajtájától és a frekvencia nagyságától függ. Az amplitúdó nagyságát kétféle módon határozzák meg: 1. a félhullám magassága; 2. a csúcstól csúcsig tartó távolság. Az esetek többségében a második meghatározást alkalmazzák. A vibrációs amplitúdó 1 és 10 mm között változott a legtöbb vizsgálat esetében. A vizsgálati eredmények nem egységesek abban, hogy létezik-e optimális amplitúdójú vibráció. Torvinen et al. (2002) azt közölték, hogy a 4x1 perces 4 mm-es amplitúdójú vibráció szignifikáns izometriás és dinamikus erőnövekedést okozott, míg a 2 mm-es vibrációnak nem volt hatása az erőnövekedésre a vibrációt követő 10 percben. Ezzel ellentétben de Ruitter et al. (2003) hasonló vibrációs frekvenciát (30 Hz) és ismétlésszámot (5x1 perc), de 8 mm-es vibrációt alkalmazva az izomerő csökkenését mutatta ki.

A vibrációs frekvencia és az amplitúdó együttesen határozzák meg a vibráció keltette gyorsulást, amely a vibrált testrészre vagy az egész testre hat. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a frekvencia növelésével az amplitúdó csökken, és a gyorsulás növekszik (Di Giminiani et al. 2009). A releváns irodalomban közölt vizsgálatokban a

gyorsulás nagysága 3,5 és 15 g között változott (Cardinale and Bosco 2003, Di Giminiani et al. 2009). Mindezidáig a kutatók a gyorsulásnak nem tulajdonítottak jelentőséget és ezért a terhelést nem gyorsulás alapon határozták meg.

#### **2.1.2.3.2. A vibráció időtartama és ismétlésszáma**

A vizsgálatok egy részében 2x5x1 perces, azaz tíz perces terhelésű vibrációt alkalmaztak, amely az esetek egy részében jelentős akut visszamaradó teljesítménynövekedést illetve erőnövekedést eredményezett (Bosco et al. 1999b, Bosco et al. 2000). Mások azonban arról számoltak be, hogy a hasonló időtartamú vibrációs kezelés visszaesést eredményezett a fizikai teljesítményben (Erskine et al. 2007). Jelentős azonban azoknak a vizsgálatoknak a száma is, amelyekben ennél rövidebb időtartamú volt a vibrációs kezelés (Cochrane et al. 2008a, 2008b, de Ruiter et al. 2003, Raphael et al. 2013, Torvinen et al. 2002). Ebben az esetben is találtak vibráció utáni teljesítménynövekedést (Torvinen et al. 2002) és csökkenést is (Cochrane et al. 2008a, 2008b, de Ruiter et al. 2003, Raphael et al. 2013). Feltételezhető, hogy nem csak a vibráció időtartama, a vibrációs frekvencia és amplitúdó az, amely befolyásolja a hatást, hanem ezek kombinációja, a személyek edzettségi állapota és az izomkontrakció fajtája is (izometriás, dinamikus) (Rittweger et al. 2001, 2002).

#### **2.1.2.4. Az akut visszamaradó hatás időtartama**

A mechanikai vibráció akut visszamaradó hatását tanulmányozó vizsgálatok kezdetben nem fordítottak gondot arra, hogy felfedjék, mennyi ideig marad fenn a vibráció pozitív hatása a fizikai teljesítményre. Az esetek többségében a fizikai tesztek közvetlenül a vibrációs kezelés befejezése után végeztették el, de nem határozták meg az időtartamot. Torvinen et al. (2002) voltak az elsők, akik megvizsgálták, hogy a vibrációt követő tíz percen belül a hatás megmarad-e vagy változik. Eredményeik alapján azt a következtetést vonták le, hogy a vibrációt követő 2. és 60. percben elvégzett teszt eredménye nem különbözött egymástól.



#### **2.1.2.5. A vibráció okozta fáradás**

Abban az esetben, amikor az egésztest vibráció jelentős erőnövekedést eredményezett tesztgyakorlatokban, a kutatók feltételezték, hogy ez a hatás a tónusos vibrációs reflexnek tulajdonítható elsősorban, amely stimuláló hatást fejt ki a neurohormonális rendszerre. Felvetődött a kérdés, hogy mi okozza ugyanazon, vagy hasonló vibrációs terhelésnél az erő és a fizikai teljesítmény visszaesését. Kézenfekvő volt feltételezni, hogy az izmok fáradása az ok. Jelentős számú vizsgálatot végeztek annak megállapítására, hogy a fáradás centrális vagy perifériás eredetű.

#### **2.1.2.6. A vibráció hatása az idegrendszerre**

A kutatók többsége azt hipotetizálta, hogy a fáradás centrális eredetű (Erskine et al. 2007, Rittweger et al. 2000, 2003, Torvinen et al. 2002). Torvinen et al. (2002) szerint a vibráció alatti átlag EMG frekvencia csökkenése a fáradás jele. Rittweger et al. (2003) arról számolt be, hogy a vibráció megváltoztatta a motoros egységek bekapcsolódási sorrendjét és a medián EMG frekvencia megnövekedett a vibrációt követő erő kifejtések alatt. Az egésztest vibráció idegrendszeri fáradást és fizikai teljesítmény visszaesést gerjesztő hatását azonban nehéz megmagyarázni, hiszen a legutóbbi vizsgálatok arra mutatnak rá, hogy a vibráció alatt az izmok elektromos aktivitása növekszik az alkalmazott rezgési frekvencia függvényében (Bongiovanni et al. 1990, Bosco et al. 1999a, Cardinale and Bosco 2003, Cardinale and Lim 2003, Di Giminiani et al. 2009, 2013). Mindazonáltal elképzelhető, hogy öt vagy tíz egyperces vibráció hatására a kezelést követően az izmok elektromos aktivitása csökken, és a teljesítmény visszaesik. A közelmúltban Maffioletti et al. (2013) a vibráció centrális fáradást okozó hatását vizsgálva azt találták, hogy az ötször egy perces súlyterheléssel végzett kezelés után az izometriás erő és a felugrási magasság szignifikánsan csökkent, ugyanakkor az elektromos ingerléssel kiváltott kontrakciók esetén nem, az M-hullám nem módosult, ami azt jelenti, hogy az ingerület átvitel nem károsodott. A szerzők eredményeikből azt a következtetést vonták le, hogy a vibráció okozta teljesítmény visszaesés a perifériás (izom) fáradás következménye.

### **2.1.2.7. A vibráció hatása az energia metabolizmusra**

Viszonylag kevés számú vizsgálat foglalkozott a vibráció okozta energia felhasználással. Rittweger et al. (2001) különböző testhelyzetben és plusz terheléssel végzett vizsgálatában a vibrációnak specifikus energia felhasználását mutatta ki, amely fokozódott a vibrációs frekvencia növelésével. Az oxigén felvétel és a vibrációs frekvencia között lineáris kapcsolatot találtak (Rittweger et al. 2002), amelyből arra következtettek, hogy az energia felhasználás  $2.5 \mu\text{l kg}^{-1}$ -al növekszik vibrációs ciklusonként 5 mm-es vibrációs frekvenciánál. Az oxigén szükséglet és az amplitúdó között nem lineáris kapcsolatot találtak, amelyből arra következtettek, hogy az amplitúdó növelése nagyobb mértékű oxigén szükségletnövekedést igényel, mint a frekvencianövelése.

A vibráció hatását a nagy energia tartalmú foszfátvegyületek felhasználására csupán egy vizsgálat kutatta (Zange J. et al. 2008). A fokozott ATP felhasználás okozta kreatin foszfát (PCr) csökkenését az intracelluláris térben csak akkor tapasztalták, amikor az artéria elszorításával gátolták a vérkeringést. Ebből arra a következtetésre jutottak, hogy az izom perfúzió fontos a vibráció során. Ezzel kapcsolatosan a kutatók azt mutatták ki, hogy a vibráció hatására megnő a véráramlás sebessége (Kerschán-Schindl et al. 2001) és növekszik az izom hőmérséklete (Cochrane et al. 2008a). A véráramlás javulását segíti az érfalak rugalmasságának növekedése a vibráció hatására (Otsuki et al. 2008). Mindazonáltal a kutatók azt is kimutatták, hogy a véráramlás fokozódása a vibrációs frekvencia és idő függvénye (Cardinale et al. 2007).

Amint látható, az izom vibráció alatti és az azt követő izomkontrakciók alatti energia metabolizmusát gyakorlatilag nem vizsgálták annak ellenére, hogy az elmúlt húsz évben lehetőség nyílt mágneses rezonancia spektroszkópiával vizsgálni a nagy energiatartalmú foszfátvegyületek mennyiségének, valamint az ATP és kreatinfoszfát (PCr) arányának változását.

### **2.1.2.8. <sup>31</sup>P-MR spektroszkópia, mint vizsgálati módszer**

A Mágneses Rezonancia nem invazív vizsgálati módszer, fájdalommentes, szükség szerint megismételhető az eljárás. Képpalkotó Mágneses Rezonancia eljárás (MRI) segítségével bármilyen síkban többirányú felvételeket készíthetünk az emberi testről,

látható a csont, szalag, ízület, lágy részek, folyadék, izom, porc, csontvelő. Funkcionális Mágneses Rezonancia (fMR) lehetővé teszi a szervek különböző funkcióinak, véráramlásának vizsgálatát. Mágneses Rezonancia Spektroszkóp (MRS) segítségével pedig bizonyos metabolitok koncentrációját mérhetjük. Működési elve: erős, külső mágneses tér tengelye körül a mágneses vektorok adott frekvenciával pörögnek. Ez a Larmor frekvencia, mely a külső mágneses tér erejével egyenesen arányos. A különböző mikrokörnyezetben lévő magok rezonancia frekvenciája kicsit eltér. Emiatt egyes kötések, illetve metabolitok a spektrum eltérő helyein jelennek meg (Chemical Shift). A csúcsok alatti terület a mennyiséggel, míg a felszélesség a T2 relaxációs idővel arányos.

#### ***2.1.2.9. <sup>31</sup>P-MR spektroszkópia alkalmazása különböző edzéshatásoknál és kontrakció típusoknál***

A különböző típusú izommunkák energia felhasználását több tanulmány is vizsgálta. A vizsgálatokat többféle módon oldották meg. Mivel az MR készülék termébe mágnesezhető anyag nem vihető be, ezért az izommunkát a termen kívül végeztették el a személyekkel, majd ezt követően került sor az MR spektroszkópiára (Yanagisawa et al. 2003). Egy másik változatban a mozdítandó súlyokat a termen kívül helyezték el, és a súlyok mozdítása kötelek segítségével történt, miközben a személyek az MR készülékben voltak (Barker et al. 2008). Az utóbbi években olyan ergométereket készítettek, amelyek nem mágnesezhető anyagból készültek, ezért az erő kifejtéseket az MR-ben végezték el a személyek, az erő adatok rögzítése a termen kívüli számítógépen történt (Giannesini et al. 2005, Mattei et al. 1999).

Az izommunka hatására az izomban az energiát szolgáltató foszfát tartalmú vegyületek mennyisége, aránya megváltozik. Azonban ez a változás nem egyforma a különböző típusú és időtartamú kontrakciók esetén. Walkerék (1998) azt találták humán vizsgálatban a gastrocnemius izomban, hogy a kreatin foszfát és a nem organikus foszfát arány (PCr/Pi) ( $8.3 \pm 0.9$  vs  $10.4 \pm 1.7$ ) valamint a kreatin foszfát és ATP arány (PCr/ATP) ( $3.68 \pm 0.36$  vs  $4.07 \pm 0.27$ ) szignifikánsan nőtt, de csak abban a csoportban, ahol a koncentrikus izommunka mellett excentrikus izommunka is volt. A koncentrikus csoportban nem volt változás megfigyelhető.

Vizsgálták a koncentrikus, excentrikus és izometriás erő kifejtés energiaköltségét, és összehasonlították az ezen kontrakciók közben kifejtett erővel. Azt találták, hogy a koncentrikus izommunkánál arányosan nő a kifejtett erő nagysága az energia felhasználással, míg izometriás és excentrikus izommunka esetén nem (Menard et al. 1991).

Yanagisawa et al. (2003) a Pi/PCr arányában nem találtak különbséget koncentrikus-excentrikus, 5x12 ismétléses plantar flexió hatására. Walkerék (1998) azonban szintén koncentrikus és excentrikus izommunkát is magában foglaló edzésnél, ugyanazon izomcsoportnál a Pi/PCr arányban csökkenést találtak. Valószínűleg a különbséget az adja, hogy az edzés intenzitásában vagy terjedelmében eltértek (Yanagisawa et al. 2003).

Vibráció hatását ez idáig mindössze egyetlen human tanulmány vizsgálta az energia metabolizmusra. Zange et al. (2009) 20 Hz vibrációs frekvenciát használt a plantar flexor izmok stimulálására normális artériás véráramlásnál és az artéria leszorításával előidézett véráramlás restrikció alatt. A vibráció egy nem mágnesezhető pedál segítségével történt, amely rezegtetése az MR termen kívül elhelyezett pneumatikus vibrációs berendezéssel történt. A vibráció alatt a személyek a bokahajlító izmokkal három perces izometriás kontrakciót végeztek vibrációval és anélkül, amelyet 10 perc után megismételtek.

A plantar flexor izomban a vibráció hatására az ATP mennyisége nem változott az izometriás kontrakció alatt. Abban az esetben, amikor a vibrációt összekapcsolták az artéria leszorításával az ATP fogyasztás 60 százalékkal megnőtt, amely a vér pH és a PCr csökkenésével járt együtt.

*Összefoglalóan elmondható, hogy az irodalom nem egységes abban, hogy a vibráció utáni akut erő és fizikai teljesítménycsökkenés idegrendszeri vagy izomszövet eredetű. A vibráció a nagy energiatartalmú foszfátvegyületek mennyiségének és arányára gyakorolt hatására csak közvetett úton következtethetünk. A rendelkezésre álló <sup>31</sup>P-MR spektroszkópia vizsgálatok szinte hiányoznak a probléma tanulmányozására.*

### **3. Vizsgálati célok**

#### **3.1.1. Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat**

- A hat napos maximális akaratlagos excentrikus erő kifejtés hatására kialakuló izomszerkezeti, valamint forgatónyomaték változások kimutatása, rostösszetétel megállapítása.
- Az izomsérülés direkt és indirekt markereinek napi változásának meghatározása.
- Az izomsérülést jelző markerek és az izomrost összetétel közötti kapcsolat feltárása.
- A szarkoplazmában megjelenő fibronectin alapján az egyes rosttípusok sérülésre való hajlandóságának megállapítása az edzés harmadik napján és az edzés befejezését követő napon.

#### **3.1.2. Vibrációs edzéses vizsgálat**

- Az egésztest vibráció hatásának megállapítása az térdfesztető izom nagy energiataralmú foszfátvegyületeinek mennyiségére és változására.
- A 20 és 40 Hz frekvenciájú vibráció hatásának vizsgálata a makroerg foszfátvegyületek MR spektroszkópiás spektrumterületeire.
- A statikus izomerő kifejtés elkülönült hatásának vizsgálata a térdfesztető izmok bioenergetikájára.

### **3.2. Hipotézisek**

#### **3.2.1. Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat**

- Feltételeztük, hogy a hatnapos, hosszú izomnyújtást magába foglaló excentrikus edzés hatására az izomsérülést mutató indirekt markerek jelentős növekedést mutatnak, de az erőkifejtés visszaesésének és növekedésének folyamatát nem változtatják meg.
- Feltételeztük, hogy a vérben meghatározott CK és LDH aktivitás, továbbá az izomfájdalom nem hozható kapcsolatba az izom rostösszetételével, mert a CK aktivitásváltozás csak egyik jelzője az izomrost-sérülésnek és nem izomrost típus specifikus.
- Feltételeztük, hogy az erővisszaesés mértéke és az azt követő erőnövekedés mértéke szignifikáns kapcsolatban van a rostösszetétellel. Ennek a hipotézisnek az alapjául az szolgált, hogy a nyújtás hatására a nagy, magas ingerküszöbű, de fáradékony motoros egységek rostjai dominánsak az egyes izomkontrakciók alatti feszülés növekedésében. Az erőkifejtésből fokozatosan kieső gyorsrostok helyét a lassú rostok veszik át, és az edzés folyamatában ezek a rostok is szerkezeti változáson mennek keresztül.
- Ezzel összefüggésben feltételeztük, hogy a fibronectin az excentrikus edzés első napjaiban elsősorban a gyorsrostokban, majd a lassú rostokban is megjelenik.

### **3.2.2. Vibrációs edzéses vizsgálat**

- Feltételeztük, hogy 20 Hz vibrációs kezelés nem okoz jelentős változást az izom energia metabolizmusában, összhangban Zange et al. (2009) eredményével.
- Feltételeztük, hogy a 40 Hz frekvenciás vibráció nagyobb ATP felhasználást igényel, mint a 20 Hz-es és ezért az ATP/PCr arány csökkenni fog.
- Feltételeztük, hogy a háromszor egy perces vibráció hatására a nagy energiatartalmú foszfát vegyületekben jelentős változás áll be, amennyiben a fáradás perifériás és nem centrális eredetű.

## **4. Anyag és módszer**

### **4.1. Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat**

#### **4.1.1. Vizsgált személyek**

A vizsgálatban 15 egészséges férfi vett részt, akik nem végeztek excentrikus edzést a vizsgálatot megelőző hat hónapban (életkor:  $22.5 \pm 1.64$  év, testsúly:  $82.2 \pm 8.01$  kg, testmagasság:  $180,0 \pm 5.08$  cm). A vizsgálatra önként jelentkező személyek közül kilencet („A, B, C, F, G, H, L, M, N” személyek) randomizáltan az excentrikus edzést folytató csoportba (EC), hatot („D, E, I, K, O, P” személyek) a kontrol csoportba (KC) osztottunk be. A vizsgálat megkezdése előtt szóban tájékoztattuk a személyeket a vizsgálat menetéről, veszélyeiről és előnyeiről. A személyek közül senki sem vonta vissza jelentkezését a tájékoztató után és a vizsgálatban való részvételüket a vizsgálat leírását tartalmazó tájékoztató aláírásával erősítették meg. A személyeket ezután tájékoztattuk a vizsgálat megkezdésének időpontjáról és arra kértük őket, hogy két héttel a vizsgálat megkezdése előtt és az utolsó vizsgálatig eltelt idő alatt ne végezzenek szokatlan, izomnyújtással járó intenzív edzést. A vizsgálatot az Egyetem Tudományos és Kutatásetikai Bizottsága hagyta jóvá. A vizsgálati személyek közül egy olyan nagy izomfájdalomról számolt be, hogy a 3. napot követően az edzést nem tudta folytatni. Vér és izombiopszia vétel azonban nála is megtörtént. A vizsgálatot a Helsinkii Dekrétum előírásait betartva terveztük és végeztük el.

#### **4.1.2. Vizsgálati protokoll**

Az excentrikus edzést hat egymást követő napon végeztettük a vizsgálatban részt vevő személyekkel (N1, N2, N3, N4, N5, N6), amely minden esetben 15 izomnyújtást jelentett egy sorozatban minden személy esetében. Minden nap hat sorozatban alkalmaztuk a 15 izomnyújtást, amely összességében 90 izomnyújtást jelentett (1. táblázat). Három nappal az edzés megkezdése előtt került sor az első izombiopszia vételre (N-3). A vizsgált személyek minden nap reggeli ébredés után tízfokozatú skálán jelölték az izomfájdalom, merevség mértékét (DOMS). Az izombiopszia mintavételt a

harmadik edzésnapon valamint a vizsgálat hetedik napján megismételtük. Vérvételre az első és harmadik edzésnapon, valamint a vizsgálat hetedik napján került sor.

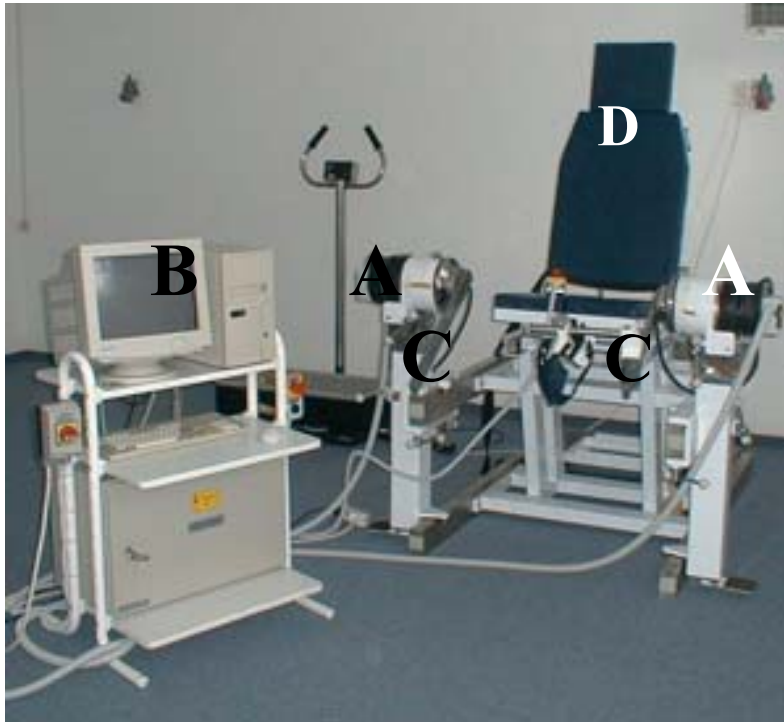
1. táblázat. Vizsgálati protokoll. Az N a vizsgálat napjait jelöli. N-3 az edzést megkezdése előtti harmadik napot jelenti, amikor az első biopsziavétel történt. N1, N2, N3, N4, N5, N6 az edzés napjai. N7 az edzést bejezését követő napot jelöli, amikor a harmadik biopsziavétel, az utolsó vérvétel és az utolsó izomfájdalom szubjektív megítélése (DOMS) történt.

	N-3	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7
Edzés		6x15	6x15	6x15	6x15	6x15	6x15	
DOMS		x	x	x	x	x	x	x
Biopszia	x			x				x
Vérvétel		x		x				x

#### 4.1.3. Az excentrikus edzésben használt berendezés

Az excentrikus edzést a Multicont II, komputer által vezérelt dinamométer (Mediagnost, Budapest és Mechatronic Kft, Szeged) segítségével végeztük (1. ábra). A kezelői software a vezérlő és a kiértékelő programot tartalmazza. A vezérlő program egy közbeiktatott elektromos hajtáson keresztül két elektromos szervomotort (Mavilors AC Servo-motor, M10, Spain) vezérel, amelyek az ülő, illetve fekvő felület két oldalán helyezkednek el és mind függőleges, mind vízszintes irányban állítható fém bakokon rögzítettek (1. ábra). A motorok a programnak megfelelően mozgatják a dinamométer acélból készült karját (600 x 50 x 10 mm) a motor forgástengelye körül. Az acélkarok erőkarokként funkcionálnak, amelyek segítségével a vizsgált izmok forgatónyomatéka mérhető és rögzíthető. Az acélkarokhoz elcsúsztatható végtagartók, acélból készült és szivaccsal bélelt mandzsetták tartoznak.





1. ábra

Multi-cont II. komputerizált dinamométer

A= elektromos szervomotorok

B= dinamométerrel összekötött számítógép vezérlő

C= forgatónyomatékot mérő karok

D= eszköz pad része

A dinamométer mérőegysége három fő komponensből áll. 1. Szervomotor(ok), (Típus: MA-10, maximális sebesség: 6000 rpm, maximális folyamatos nyomaték: 5.8 Nm, rövid idejű nyomaték: 40.7 Nm). 2. Hajtás (Típus: FAD 25, reduktós arány: 59, névleges kimeneti nyomaték: 460 Nm, maximális rövid idejű kimeneti nyomaték: 971 Nm). 3. Mérőcella, amelyben két acélkorongot nyolc kis flexibilitású és nagy érzékenységgű, radiálisan elhelyezkedő lamella köti össze. Minden második lamellára nyúlásmérő ellenállás került felragasztásra (Érzékenység: 0.5 Nm, mérési nyomatékhatár: 500 Nm). Ennek az elhelyezésnek köszönhetően csak az erőkarok síkjában kifejtett forgatónyomaték kerül mérésre. A mintavételi frekvencia 1kHz.

A hajtásba beépített potenciométer segítségével a programban meghatározott ízületi szögek 0.01 radián pontossággal beállíthatók és a szögelfordulások az idő

függvényében regisztrálhatóak. A szervomotor sebességét a program a pozíció-idő függvény alapján vezéri. A karok állandó sebességgel és állandó gyorsulással mozgathatók. A maximális sebesség 300 fok/s. A forgatónyomaték, a szögváltozás és szögsebesség adatok digitális formában kerülnek rögzítésre a PC-ben, továbbá online vizualizálhatók a komputer képernyőjén. Ez a funkció lehetővé teszi a vizsgált személy és a vizsgálatvezető részére, hogy azonnal visszajelzést kapjanak a feladat végrehajtásáról.

Az excentrikus kontrakciók során az ízület behajlítása, azaz az aktivált izom nyújtása állandó szögsebességgel és a motorokba tárolt energia felhasználásával történik. Az állandó szögsebességek nulla és 300 fok/s között állíthatók be. Az adatok rögzítése után a program kiválasztja minden egyes kontrakció során elért csúcsgörgetőnyomatékot és kiszámolja az átlag forgatónyomatékot az alábbi képlet alapján:

$$Mm = \frac{\sum_{i=1}^N M(i)}{N}$$

ahol, N a mozgás teljes ideje alatt digitálisan rögzített minták száma, M(i) a mért nyomaték adat az i-edik minta esetében a nyomaték-idő függvényben. A nyomaték adatok minden egyes ms-ban rögzítésre kerülnek.

Ezen kívül a program kiszámolja a kontrakció alatti munkavégzés nagyságát a következő képlet alapján:

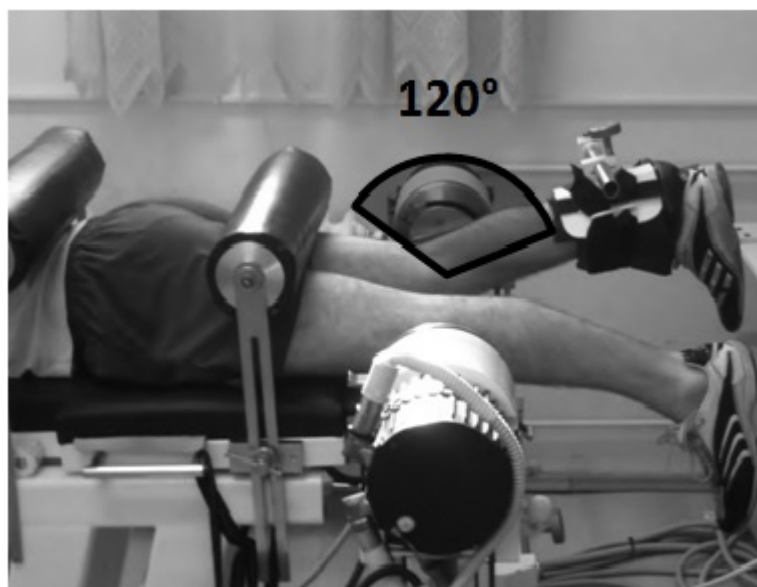
$$W = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M_{(\varphi)} \cdot d\varphi$$

ahol M a dφ szögváltozásra jutó forgatónyomaték változás.

#### **4.1.4. Az excentrikus edzés leírása**

A vizsgálatban résztvevők 10 percen keresztül melegítettek be kerékpár ergométeren, majd további öt percen keresztül nyújtó gyakorlatokat végeztek az alsó végtagi izmokkal. Az edzés hat egymást követő napon keresztül napi 15 excentrikus kontrakcióból állt. Az izomnyújtások a nem domináns oldali alsó végtag térdfesztő

izmán történtek. A vizsgált személyek hason fekvésben foglaltak helyet az eszköz pad részén (2. ábra). A nyújtóhatásnak kitett láb lábszárát az elektromos motor által forgatott karhoz rögzítettük boka felett úgy, hogy a térd lateromediális tengelye egybeessen a motor forgástengelyével. A test padon történő elmozdulásának elkerülése végett a személyek combját a farizomhoz közel egy szivaccsal borított fémhenger segítségével az eszközhöz szorítottuk. Továbbá a személyek a berendezés két oldalán elhelyezkedő fogantyúba fogódzkodva álltak ellent a csúszó elmozdulásnak. Amikor a vizsgálatban résztvevők kényelmesen elhelyezkedtek a dinamométeren, bemelegítésként 15 excentrikus kontrakciót végeztek közepes intenzitással, miközben információkkal láttuk el őket, hogy mikor kell a forgató kar ellen erőt kifejteni, és mikor van a pihenő szakasz. A térdízület hajlítása 10 fokban kezdődött és 130 fokig tartott, az ízületi mozgástartomány 120 fokos volt a térdfeszítő izmok nyújtása alatt (2. ábra).



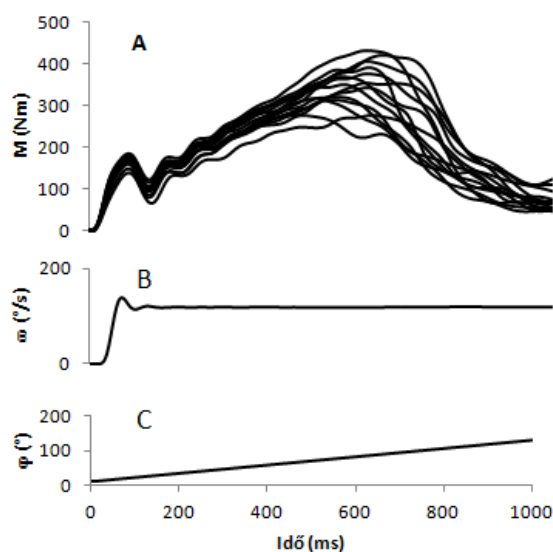
2. ábra. A vizsgálati személy elhelyezkedése a dinamométeren. A térd hajlítása 10°-nál kezdődött, a térd behajlítása 120°-os szögtartományban történt.

A bemelegítő kontrakciókat követően arra kértük a vizsgálati személyeket, hogy amikor a motor a kiinduló helyzetbe forgatta a lábat, haladéktalanul fejtsenek ki erőt maximális intenzitással az erőkarra, és amikor a motor hajlítani kezdte a térdízületet, maximálisan álljanak ellent a forgató erőnek, azaz próbálják megállítani a kar forgását, amely természetesen nem volt lehetséges, mert az ízület behajlítása állandó

szögsebességgel történt, ami 120 fok/s volt. Az izmok nyújtása akkor kezdődött, amikor a vizsgálati személyek 20 Nm forgatónyomatékot fejtettek ki statikus körülmények között. Az egyes excentrikus kontrakciók végén a motor a kiinduló helyzetbe forgatta vissza a lábat, majd pihenőidő nélkül kezdődött a következő kontrakció. Minden kontrakció alatt tároltuk a forgatónyomaték, szögelfordulás és szögsebesség adatokat az idő függvényében. A mintavételi frekvencia 1 kHz volt. Az edzés hat napon keresztül napi 6x15 maximális erő kifejtésű excentrikus kontrakcióból állt. A sorozatok közt két perc pihenő telt el. A kísérletvezető folyamatosan biztatta a személyeket, hogy a lehető legnagyobb erőt fejtsék ki a személyek.

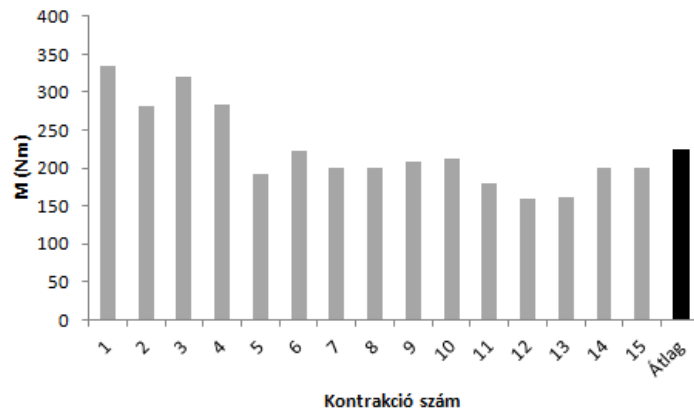
#### 4.1.5. A térdfesztítő izmok edzésnapokra vonatkozó erő kifejtésének meghatározása

Minden excentrikus kontrakció alatt a program eltárolta forgatónyomaték-idő görbét (3. ábra).



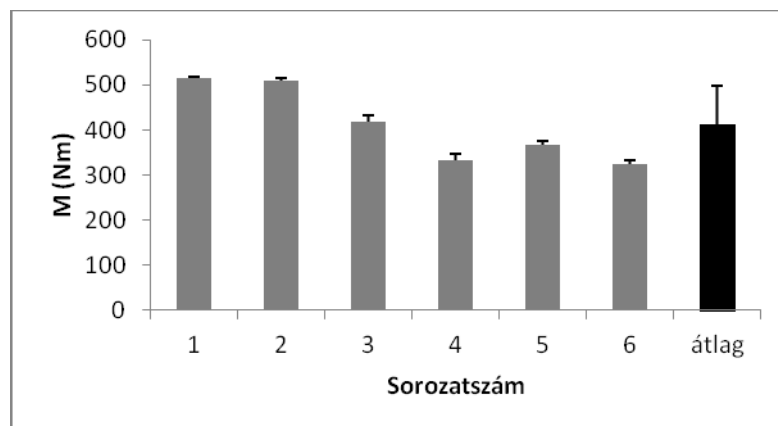
3. ábra. Egy sorozat 15 kontrakciójának jellegzetes forgatónyomaték-idő (A), szögsebesség-idő (B) és szögelfordulás-idő (C) görbéi.

A forgatónyomaték-idő görbéken meghatároztuk a legnagyobb forgatónyomatékot és kiszámítottuk a sorozat átlag forgatónyomatékát (4. ábra).



4. ábra. Egy személy egy sorozatában az excentrikus kontrakciók maximális forgatónyomatéka és átlaga.

Egy edzés maximális forgatónyomatékainak átlagát úgy számoltuk ki, hogy az egyes sorozatok átlagának az átlagát vettük (5. ábra).



5. ábra. Egy vizsgálati személy egy edzésén a hat sorozat átlag csúcsforgatónyomatéka (szürke oszlopok) és az edzés átlag forgatónyomatéka (fekete oszlop).

Az egy edzésre számított átlag forgatónyomatékok változásával jellemeztük az excentrikus edzés hatását az izmok erő kifejtésének változására. A kiértékelésnél az első és a harmadik, a harmadik és a hatodik, valamint az első és a hatodik edzés átlagait hasonlítottuk össze.

A dinamométer kiértékelő programja minden egyes kontrakcióra kiszámította az átlag forgatónyomatékot és a kontrakció alatti munkavégzést. Egy edzés átlagának

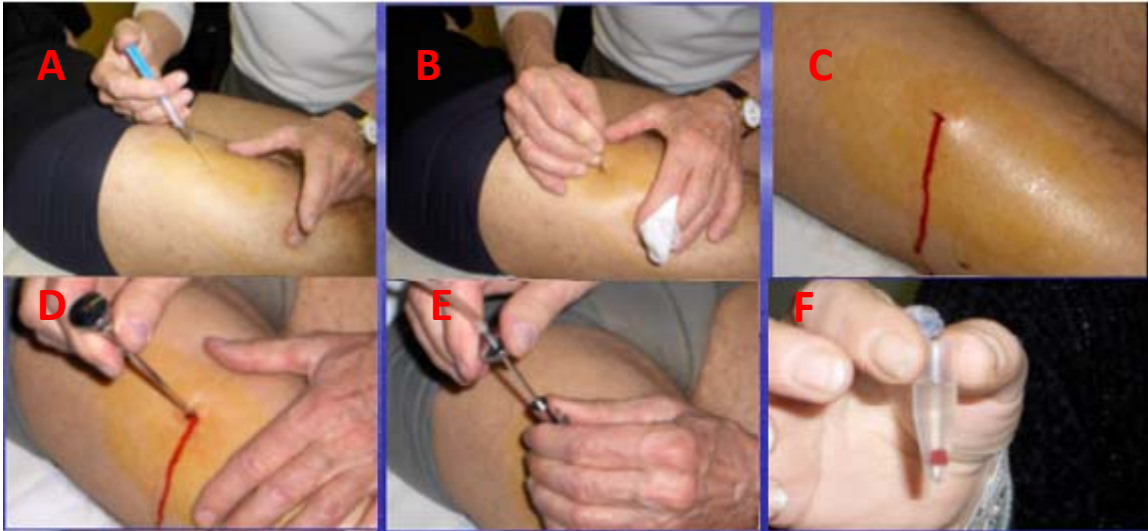
kiszámításakor hasonló módon jártunk el, mint a csúcsforgatónyomatékok kiszámításánál.

#### **4.1.6. A kreatin kináz (CK) és a laktát dehidrogenáz (LDH) szintének meghatározása**

A CK és LDH enzimek aktivitásának meghatározására 10 ml vénás vért gyűjtöttünk az antecubitális vénából. Az első vérvételre az első napon az excentrikus edzés előtt, a harmadik napon az edzést követően és 24 órával az utolsó edzés után (hetedik nap) került sor. A szérum elkülönítése után -80 fokon tároltuk az enzim aktivitások méréséig. A vérmintákat standard CK és LDH kitekkel és (Diagnosticum Zrt and Dialab Ltd, Budapest, Hungary) klinikai kémiai elemző készülékkel (Hitachi 902) elemeztük.

#### **4.1.7. Izomminta vétel (biopszia)**

Az izommintát az edzett láb vastus laterális izmából vettük három nappal az edzések megkezdése előtt, a harmadik edzésnapon az edzést követően, valamint az utolsó edzést követő napon (N7). A bőrfelület megtisztítása és fertőtlenítés után a biopsziára kijelölt helyet érzéstelenítettük (1%-os lidokain). Ezt követően steril szikével 0,8-1,0 cm-es vágást ejtettünk a bőrön és az izombőnyén. A nyíláson át vezettük be a Bergström biopsziás tűt (Bergstrom 1975). A tűre applikált szívó eszközzel az izomdarabkát a tűbe szívtuk és lemetszettük (Bergstrom 1975, Evans et al. 1982). Egy tűbemenettel három mintát vettünk az izom különböző mélységéből. Egy-egy izomminta rizsszem nagyságú volt és megközelítőleg 40-60 mg súlyúak voltak. Az így nyert izommintát hét százalékos formaldehid oldatba helyeztük, majd paraffinba ágyasztuk (6. ábra). A paraffinba ágyazott mintákból 4 mikrométer vastagságú sorozat metszeteket készítettünk mikrotommal. A metszeteket üveglemezekre helyeztük, amelyeken az immunhisztokémiai festéseket végeztük.

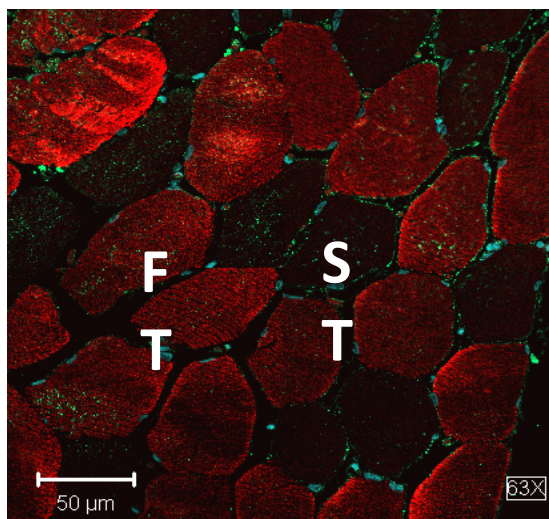


6. ábra. Izommintavétel menete. A - a bőrfelület tisztítása, fertőtlenítés után érzéstelenítés; B - a bőrfelület megnyitása; C - vérzés csillapítás; D- 5mm-es Bergström biopsziás tű izomba vezetése; E - az izomdarab kimetszése vákuumos technikával; F - az izomminta formaldehid oldatba helyezése

#### 4.1.8. Fluoreszens immunhisztokémiai festés

##### 4.1.8.1. *A gyors és lassú rostok elkülönítése*

IGF-1 antitestet használtunk a gyors és lassú rostok elkülönítésére (Monoclonal anti-Myosin, Skeletal, Fast; antibody produced in mouse, 1:400, Cat. number: M4276, Sigma, secondary antibody Alexa Fluor 488 goat anti-rabbit IgG, Alexa Fluor 546 goat anti-mouse). Az izommintákban a gyors és lassú rostok fluoreszens festést alkalmazva különböző színnel aktiválódtak (7. ábra).



7. ábra. A gyorsrostok (FT) piros színnel festődtek, míg a lassú rostok (ST) nem festődtek. A rostok szélén és belsejében a zöld színű pontok a fibronectin jelenlétét jelzik. A rostok szélein a sejtmagok kék színnel jelentek meg.

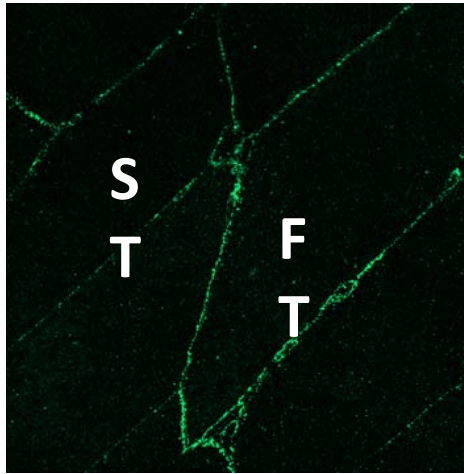
#### **4.1.8.2. Az izmok rostösszetételének meghatározása**

A minták elemzéséhez LSM510 META konfokális fluoreszns mikroszkópot használtunk. Az egyes metszetekről fényképfelvételeket készítettünk, amelyekben 200-300 izomrost volt található. Minden esetben és személyenként három metszetet vizsgáltunk meg, amelyeket az izom különböző helyeiről vettünk. Megszámoltuk a gyors és lassúrostokat és az összes megszámlolt rost százalékos arányában határoztuk meg (FT% és ST%).

#### **4.1.8.3. Fibronectin és sejtmag meghatározás**

Immunhisztokémiai festést alkalmaztunk, hogy kimutassuk a fibronectint (polyclonal, rabbit antihuman, DakoCytomation, A 0245). A sejtmagok festése Hoechst magfestéssel történt (Hoechst 33342; 1:1000). A fibronectin megjelenésének mennyiségi meghatározására nem volt alkalmunk. Ezért a mikroszkópos metszetek fényképeit két, egymástól független kutató vizsgálta meg. A kutatók feladata az volt, hogy megvizsgálják, mely rostokban volt felfedezhető fibronectin és ezek a rostok milyen típusúak voltak. Amennyiben mindkét típusú rostban megjelent a fibronectin, akkor százalékos arányban fejeztük ki, hogy melyik rosttípus és hány százalékban volt érintett (8. ábra).





8. ábra. A fibronektin megjelenése a sejten belül (zöld szín). A fibronektin az ép sejtekben a sejtmembránban található. Mikrosérülés esetén a sejten belül is megjelenik.

#### 4.1.9. Statisztikai elemzés

Átlagot és szórást számítottunk a kreatin kináz (CK), laktát dehidrogenáz (LDH), forgatónyomaték és rostösszetétel változókat illetően. A vizsgálati és kontroll csoport átlagait kétmintás Student t-tesztel, az edzések közötti különbségeket pedig megismételt mérések ANOVA-val hasonlítottuk össze. A változók közötti kapcsolatot Pearson-féle korrelációs számítással határoztuk meg. A különbségeket, az edzésre bekövetkezett változásokat, illetve a változók közötti kapcsolatot szignifikánsnak tekintettük  $p < 0,05$  szintnél. Az izomminták esetében az antitest reakcióval megfestett minták különbségét kvalitatív módon határoztuk meg. A statisztikai eljárásokat Statistica 7.0 program segítségével végeztük.

## **4.2. Vibrációs edzéses vizsgálat**

### **4.2.1. Vizsgált személyek**

Vizsgálatunkban 15 edzett személy vett részt. 7 nő és 8 férfi (életkor:  $19,7 \pm 0,8$  év, testmagasság:  $175,3 \pm 9,2$  cm, testtömeg:  $68,8 \pm 9,7$  kg). A vizsgálat megtervezésekor egyetemi hallgatókat toboroztunk a vizsgálatban való részvételre. A jelentkezett hallgatókat tájékoztattuk a vizsgálat menetéről, felhívva figyelmüket az esetleges veszélyekre. Ezek után a vizsgálatra jelentkezett hallgatók írásban nyilvánították ki, hogy önként vesznek részt a vizsgálatban, amit bármikor önszántukból megszakíthatnak. A vizsgált személyeket véletlenszerűen három csoportra osztottuk úgy, hogy a sportági és nemi eloszlás megközelítőleg egyenlő legyen mindhárom csoportban. Öt személy került a kontroll csoportba (KC). Tíz személyt a vizsgálati csoportba osztottunk be, akik közül öt 20 Hz majd 40 Hz frekvenciájú vibrációban (V20-40), öt személy 40 Hz majd 20 Hz frekvenciájú vibrációban (V40-20) részesült.

### **4.2.2. Vizsgálati protokoll**

A vizsgált személyek bemelegítés után MR készülékben helyezkedtek el és a bal oldali térdfeszítő izmukat vizsgáltuk. Az MR gépben 5 perces 31P-MRS mérést követően 1 perces maximális izometriás izomfeszítést végeztek, majd az izometriás erő kifejtés után közvetlenül 5 perces 31-P-MRS mérés következett. Így összesen 11 percet töltöttek az MR gépben 1-1 mérés alkalmával. Ezt követően a kontroll csoport (KC) tagjai félguggolás pozícióban helyezkedtek el a vibrációs eszközön és ebben a helyzetben maradtak egy percig vibráció nélkül. Ezt a procedúrát még kétszer ismételtük meg egy perces pihenőkkel, így összesen öt percet vett igénybe az edzés. A pihenő idő alatt a személyek egy székre ültek és izmaikat teljesen relaxálták. A vizsgálati csoport tagjai azonos testhelyzetben álltak a vibrációs eszközön, de vibrációban részesültek. Az első 3x1 perces vibrációt követően a személyek ismét MR spektroszkópos vizsgálaton estek át (11 perc). A vibráció befejezése és a spektroszkópos vizsgálat megkezdése között három perc telt el. Ezt követően megismételtük az kontroll/vibrációs procedúrát (5 perc). A kontroll/vibrációs kezelést ismét MR spektroszkópia követte (11perc) (9. ábra).

<b>MR gépben töltött idő</b>	11 perc		11 perc		11 perc
<b>WBV</b>		5 perc		5 perc	
<b>Előkészület a 31P-MRS-re</b>			3 perc		3 perc

9. ábra. A vizsgálati protokoll és időbeli lefolyása. MR gépben töltött idő (31P-MRS mérés), WBV- egésztest vibráció és MRS-re előkészület

### 4.2.3. Egésztest vibráció

#### 4.2.3.1. Vibrációs eszköz

A mechanikai vibrációhoz Nemes-Bosco vibrációs platformot használtunk (OMP, Rieti, Italy). A platform mérete 0,5x0,4x0,2 m a platform csúcstól csúcsig számított függőleges mozgása 5 mm, a rezgés frekvenciája 0 és 100 Hz között változtatható 1 Hz-ként. A vibrációs eszköz vészkapcsolóval felszerelt, a vizsgált személy bármikor kikapcsolhatta a készüléket. A vibrációs eszköz az MR szoba melletti helységben volt, ahonnan a lehető legrövidebb idő alatt jutottak el az MR szobába.

#### 4.2.3.2. Vibrációs kezelés

A vibrációs csoportba tartozó személyek vállszélességű állásban, térdízületüket 100 fokban behajlítva álltak a vibrációs platformon. Kezüikkel a készülék fogódzkodóját fogták a vibráció alatt (10. ábra).



10. ábra. A vibrációs eszköz és a személy elhelyezkedése a készüléken.

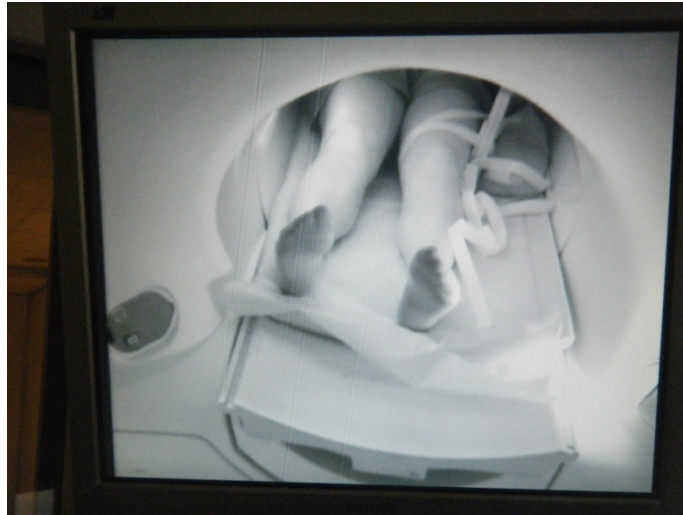
A V20-40 csoport tagjai bemelegítés után 3x1 perc vibrációban részesültek. A vibrációs frekvencia 20 Hz volt. A vibrációs terhelések között 1 perces szünetet tartottunk, amely alatt a személyek ülésben teljesen relaxálták izmaikat. Ez a csoport a második vibrációs periódusban 3x1 perces vibrációt kapott 40 Hz frekvenciával, egy perces pihenőidővel. A V40-20 csoport tagjai hasonló vibrációs kezelésben részesültek, de az első periódusban a vibrációs frekvencia 40 Hz, a másodikban 20 Hz volt.

A kontroll csoportba sorolt személyek bemelegítés után vállszélességű állásban, térdízületüket 100 fokban behajlítva helyezkedtek el a vibrációs eszközön, amely helyzetet 1 percig kellett tartaniuk, de nem részesültek vibrációs kezelésben. A sorozat szám azonos volt a vibrált személyekével, azaz 2x3x1 perc.

#### 4.2.4. <sup>31</sup>P MR spektroszkópia

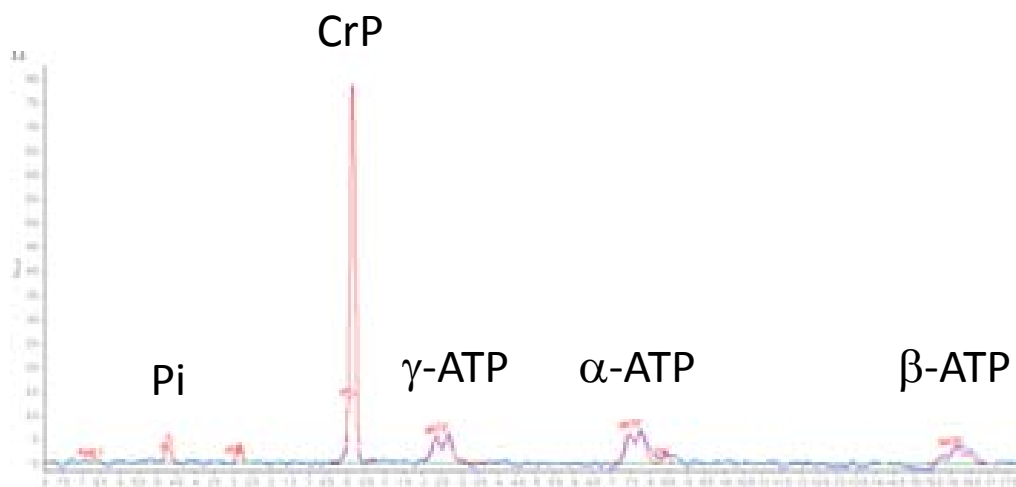
A vizsgálatban részt vevő személyek térdfeszítő izmának energia metabolizmusát 3T mágneses rezonancia spektroszkóppal vizsgáltuk (Philips Achieva 3.0 T). A személyek hanyattfekvésben helyezkedtek el az MR készülékben (11. ábra). Első lépésben a baloldali vastus laterális izom többszeletes, gyors MR képeit készítettük el abból a célból, hogy megkeressük azt a legnagyobb izomvastagságú helyet, amely fölé felhelyezzük a spektroszkóp mágnes tekercsét. A 10 cm átmérőjű felszíni tekercset megközelítőleg a vastus laterális középső harmadára rögzítettük fel. Az elhelyezkedést a bőrön bejelöltük, hogy a második és harmadik mérésnél ugyanazon helyre kerüljön a tekercs. MR gépbe fekvést követően minden alkalommal MRI segítségével ellenőriztük,

hogy a vizsgált terület izom legyen (3x4x8 cm-es csont, bőr és zsírszövetmentes terület). A spektroszkópos vizsgálatot a következő paraméterekkel végeztük el: pulzus időtartam = 500  $\mu$ s, ismétlési idő = 2 s, sweep szélesség = 32 kHz, 4,096 adatpont, dwell idő = 128 ms, flip szög = 60°. A foszfor metabolitok spektrumát az izom 3x4x8 cm-es térfogatában határoztuk meg.



11. ábra. A vizsgált személy elhelyezkedése az MR készülékben. A baloldali vastus laterális izmon rögzítettük a mágneses tekercset.

A  $^{31}\text{P}$  MR spektrumról az alábbi változókat határoztuk meg: nem organikus foszfát (Pi), kreatin foszfát (PCr), alfa-adenozintrifoszfát ( $\alpha$ ATP), beta-adenozintrifoszfát ( $\beta$ ATP), gamma-adenozintrifoszfát ( $\gamma$ ATP) (12. ábra). A foszfát vegyületek mennyiségét és változását a görbe alatti területekkel jellemeztük.



12. ábra. Egy vizsgálati személy nyugalmi  $^{31}\text{P}$  mágneses rezonancia spektruma.

#### **4.2.5. A $^{31}\text{P}$ MRS vizsgálat menete**

##### ***4.2.5.1. Első $^{31}\text{P}$ MR spektroszkópia***

A vizsgálati személyek hanyattfekvésben, nyújtott térizülettel feküdtek az MR készülékben. Az instrukciókat az MR szobán kívül elhelyezkedő vizsgálatvezető mikrofonon keresztül adta. Az első feladat a térdfesztítő izom teljes relaxálása volt mialatt a spektroszkópia folyt. A mérés öt percig tartott (1. mérés). Ezt követően a vizsgálati személyeknek neutrális ízületi szöghelyzetben maximális izometriás erőt kellett kifejteni egy percen keresztül, majd ismét spektroszkópiát végeztünk (2. mérés).

##### ***4.2.5.2. Második $^{31}\text{P}$ MR spektroszkópia***

A vibrációs kezelést követően a személyek a lehető legrövidebb idő alatt visszatértek az MR szobába és befeküdtek a készülékbe és felrögzítettük a mágnes tekercset, MRI segítségével beállítottuk a pontos helyet Ez a folyamat maximum három percig tartott. Ezt követően a személyek izmárol öt perces spektroszkópiát készítettünk relaxált állapotban (3. mérés) és maximális izometriás utáni relaxált állapotban (4. mérés).

##### ***4.2.5.3. Harmadik $^{31}\text{P}$ MR spektroszkópia***

A második vibrációs kezelést követően a személyek visszatértek az MR készülékbe és a korábbi módszert követve készítettük el a spektroszkópos vizsgálatot (5. és 6. mérés).

#### **4.2.6. Statisztikai elemzés**

A vizsgálati személyek, és emiatt a felhasználható adatok korlátozott mennyisége miatt Shapiro-Wilk's  $W$  normalitás tesztet végeztünk. A minták jellemzésénél alapstatisztikákat használtunk, ezért a kiválasztott változók átlagát és a szórását meghatároztuk. A különbségvizsgálatnál paraméteres egy és kétmintás T-próba és nem paraméteres Wilcoxon és Mann-Whitney  $U$  próba illetve egyváltozós

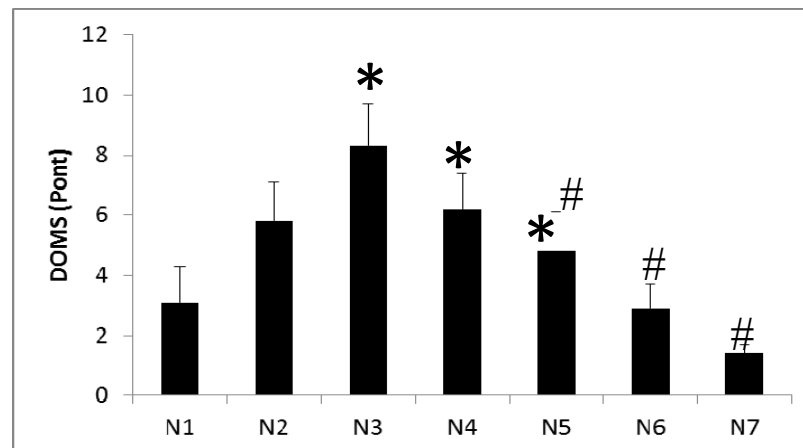
variacionaalízis (post hoc test: Tukey HSD) és nem paraméteres Kruskal-Wallis ANOVA felhasználásával határoztuk meg a szignifikáns eltéréseket. Paraméters Pearson-féle és nem paraméteres Spearman-féle korrelációt alkalmaztunk a változók közötti kapcsolatok vizsgálatánál. A számításokat a Statistica 8.0 (Statsoft. Inc.) és Microsoft Excel programok felhasználásával végeztük. A szignifikancia szintet  $p < 0,05$ -nél határoztuk meg.

## 5. Eredmények

### 5.1. Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat

#### 5.1.1. Izomfájdalom, izommerevség (DOMS)

A tízfokozatú skálán kifejezett izomfájdalom, izommerevség szubjektív megítélése azt mutatta, hogy 12 órával az első edzés után jelentkeztek a DOMS tünetek. A DOMS kétszeresére növekedett a második napon, és a maximális értékét a harmadik napon érte el, amely szignifikánsan nagyobb volt, mint az első napon ( $p < 0,05$ ). Ezt követően a DOMS értékek fokozatosan csökkentek, de a negyedik és ötödik edzésnapon is még szignifikánsan nagyobbak voltak, mint az első napon ( $p < 0,05$ ). Az ötödik napon a fájdalom és az izommerevséget jelző átlag érték már szignifikánsan kisebb volt, mint a harmadik napon ( $p < 0,05$ ). A hetedik napon a fájdalom csaknem teljesen eltűnt (13. ábra).



13. ábra. DOMS átlag és szórás értékei az excentrikus edzés során. A csillagok szignifikáns különbséget jeleznek az első mérés átlagához viszonyítva. # szignifikáns csökkenést jelent a maximális DOMS értékhez viszonyítva.

#### 5.1.2. Enzim aktivitás

A 2. táblázat mutatja a CK koncentrációt, mely a normál tartományban volt edzések előtt (N1), de a harmadik (N3) és a hetedik (N7) napon a kiinduló érték 70,6 és



75,5-szörösére emelkedtek. A változás mértéke szignifikáns volt mindkét esetben ( $p < 0,001$ ).

Az LDH koncentrációja a vérben edzések előtt nem volt emelkedett. A harmadik edzésnapon a mért érték 1,5-szeresére emelkedett ( $p = 0,013$ ), a hetedik napon is még szignifikánsan magasabb volt, mint az alapmérés átlaga ( $p = 0,014$ ) (2. táblázat).

2. táblázat. A vizsgálatot megelőző, a harmadik és a hetedik napon meghatározott CK és LDH koncentráció átlag és szórás értékei.

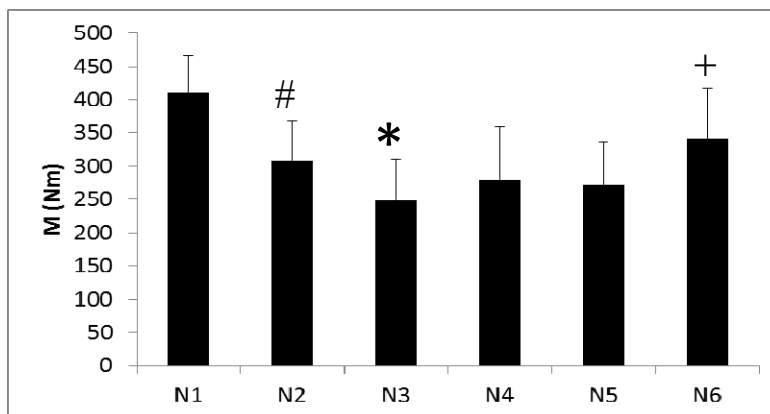
	N1	N3	N7
CK (IU/L)	165.4	11684.6*	12483.3*
	±65.8	±29425.9	±17249.8
LDH (IU/L)	283.0	417.9*	400.4*
	±58.6	±300.4	±87.7

\* szignifikáns különbség az N1 alapadathoz képest ( $p < 0,003$ )

### 5.1.3. A forgatónyomaték-idő görbén meghatározott csúcsforgatónyomaték edzésnapj átlaga

A csúcsforgatónyomatékok átlaga, amelyeket az excentrikus kontrakciók alatt határoztunk meg, minden edzésen folyamatos csökkenést mutatott az első három nap során. Az első edzésnapj csúcsforgatónyomatékhoz ( $411,0 \pm 55,1$  Nm) viszonyítva a második napon teljesített a forgatónyomaték ( $309,2 \pm 59,8$  Nm) 24,8 %-kal kisebb volt, ami szignifikáns különbséget jelent ( $p < 0,005$ ). A harmadik edzésnapon tovább csökkent a forgatónyomaték elérve a legkisebb értéket ( $249,1 \pm 62,0$  Nm) az edzések folyamatában, amely 39,4 %-kal volt kevesebb, mint az első napon mért csúcsforgatónyomatékok átlaga. A különbség a két átlag között szignifikáns ( $p < 0,001$ ). Ezt követően a negyedik edzésnapon a forgatónyomaték ( $280,6 \pm 78,2$  Nm) 12,6 százalékos növekedést mutatott. Az ötödik edzésnapon a forgatónyomaték nem változott szignifikánsan ( $272,3 \pm 64,9$  Nm). A hatodik edzésnapon 25,3 %-kal volt nagyobb a csúcsforgatónyomatékok átlaga ( $341,3 \pm 74,8$  Nm) az ötödik napéhoz viszonyítva és 37,0 %-kal volt nagyobb, mint a harmadik edzésnapon mért legkisebb forgatónyomaték ( $p < 0,02$ ). A hatodik edzésnapon a csúcsforgatónyomaték bár jelentős

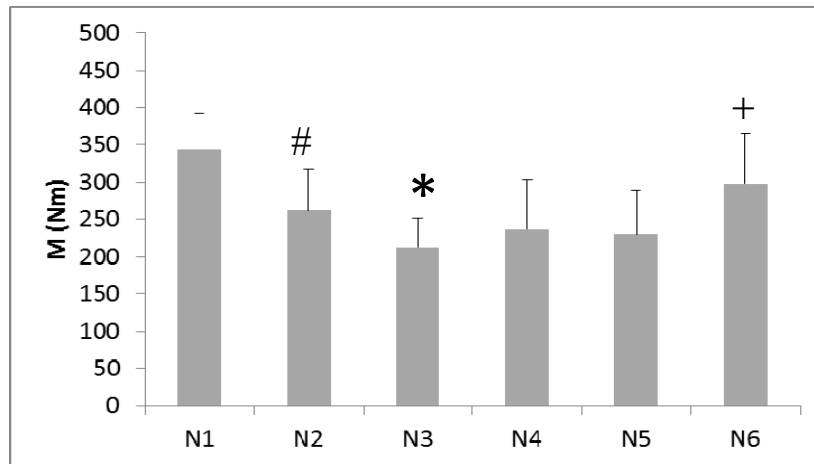
növekedést mutatott, de nem érte el az első edzésen számított átlagot. Igaz, a különbség nem volt szignifikáns a két átlag között (14. ábra).



14. ábra. A csúcspörgőmomentum átlagok változása a hat napos excentrikus edzések során. A vízszintes tengelyen az edzésnapok találhatóak. A \* szignifikáns különbséget jelent az első edzés és a harmadik edzés, a # az első és második, + a harmadik és hatodik edzés forgómomentumai között.

#### 5.1.4. A forgómomentum-idő görbékről meghatározott átlag forgómomentum edzésnapj átlaga

Az egyes edzésnapokon teljesített átlag forgómomentumok átlaga hasonlóan a csúcspörgőmomentumokhoz, az első edzést követő két napban fokozatosan csökkent. Az első ( $336,1 \pm 51,5$  Nm) és második ( $248,8 \pm 65,7$  Nm) edzésnapj átlagok között 24,1 % különbség volt ( $p < 0,01$ ). Az átlag forgómomentum is a harmadik edzésnapon volt a legkisebb ( $201,6 \pm 47,0$  Nm), ami 18,6 %-kal volt kisebb, mint az előző napi, és 38,8 %-kal kisebb ( $p < 0,001$ ), mint az első napi átlagforgómomentum. Ezt követően a forgómomentum átlagok folyamatosan emelkedtek (N4:  $236,2 \pm 66,5$  Nm; N5:  $230,6 \pm 58,5$  Nm). Az utolsó edzésnapon (N6) teljesített átlag forgómomentum ( $290,73 \pm 76,37$  Nm) 39,6 %-kal volt nagyobb, mint a harmadik napon mért legkisebb átlagforgómomentum ( $p < 0,001$ ), de 15,6 %-kal kisebb, mint az első edzésen számított érték. A különbség az első és a hatodik edzésnapj átlag forgómomentuma között azonban nem szignifikáns (15. ábra).



15. ábra. Az átlag forgatónyomaték átlagok változása a hat napos excentrikus edzések során. A vízszintes tengelyen az edzésnapok találhatóak. A \* szignifikáns különbséget jelent az első edzés és a harmadik edzés, a # az első és második, + a harmadik és hatodik edzés forgatónyomatékai között.

### 5.1.5. A forgatónyomaték változása az egyes edzésnapok között

A változások különbségét az első, az excentrikus edzés által nem befolyásolt forgatónyomaték és a legjobban befolyásolt edzés eredmény (N3) között, valamint a regenerálódást jellemző harmadik és hatodik edzésnap forgatónyomatékai között számoltuk ki. A regenerálódás mértékét az első és hatodik nap forgatónyomatékának különbsége jelzi. Mint, ahogy az előző paragrafusokban láttuk, szignifikáns különbség volt az első és a harmadik, valamint harmadik és hatodik napi forgatónyomatékok között mind a csúcsgörgőnyomatékokat (Mp), mind az átlag forgatónyomatékokat (Ma) tekintve.

Az első és harmadik edzésnap csúcsgörgőnyomaték változása (N3-N1) közötti különbség jelentősen nagyobb volt, mint a különbség a harmadik és hatodik edzésnap forgatónyomatéka között. A növekedés mértéke az utolsó három edzésnapon csak 55,6 százaléka volt az első három napon bekövetkezett csökkenésnek. Ennek ellenére a változások mértéke nem volt szignifikáns. Ennek oka feltehetően az adatok nagy variabilitása volt.

Az átlagforgatónyomatékok esetében is hasonló eredményt kaptunk. A forgatónyomaték visszaesése az első edzésről a harmadik edzésre 65,6 százalékkal nagyobb volt, mint a forgatónyomaték növekedésének mértéke a harmadik naptól a hatodik napig ( $p < 0,05$ ).

3. táblázat. A csúcsporgatónyomaték (Mp) az 1., 3., 6. edzésnapon, valamint a csúcsporgatónyomaték különbsége az 1. és 3. edzésnap, a 3. és 6. edzésnap, valamint az 1. és 6. edzésnap közt.

		N1	N3	N6	N3-N1	N6-N3	N1-N6
Mp (Nm)	átlag	411,0	249,1 a	339,2 b	-161,9	90,1	-71,8
	szórás	55,1	62,0	78,2	64,0	45,1	95,2
Ma (Nm)	átlag	344,9	208,3 a	290,7 b	-136,5	82,4 c	-54,2
	szórás	47,3	45,3	76,4	57,8	46,8	94,9

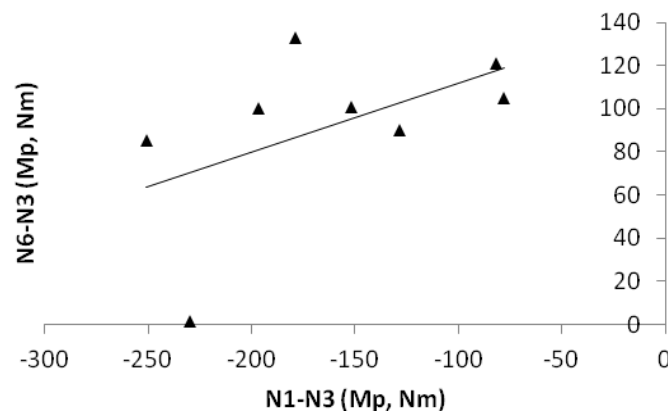
a szignifikáns különbség N1 és N3 között ( $p < 0,001$ )

b szignifikáns különbség N3 és N6 között ( $p < 0,001$ )

c szignifikáns különbség N3-N1 és N6-N3 között ( $p < 0,05$ )

### 5.1.6. Összefüggés a forgatónyomaték csökkenés és növekedés mértéke között.

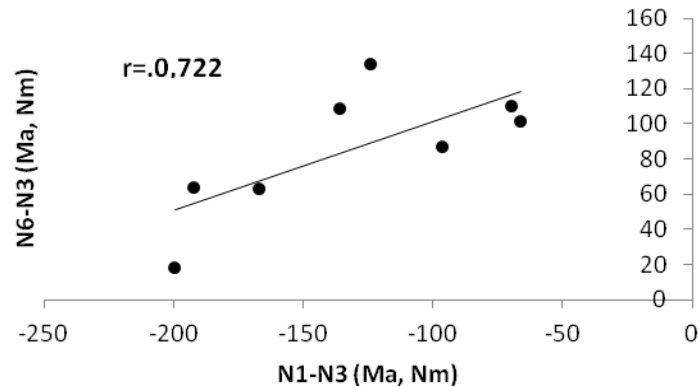
Annak megállapítására, hogy az excentrikus edzés okozta forgatónyomaték csökkenés (N1-N3) és a regenerálódást jelző forgatónyomaték növekedés között van-e kapcsolat, lineáris korrelációszámítást végeztünk. A csúcsporgatónyomaték esetében nem találtunk szignifikáns kapcsolatot a két változó (N1-N3 és N6-N3) között (16. ábra).



16. ábra. Összefüggés a csúcsporgatónyomaték csökkenése és növekedése között.

Az átlag forgatónyomaték csökkenése (N1-N3) és növekedése között (N6-N3) a kapcsolat szignifikáns volt ( $r = -0,72$ ,  $p < 0,05$ ), amely azt jelenti, hogy minél nagyobb

excentrikus edzés okozta forgatónyomaték visszaesés, annál kisebb a regenerálódás alatti forgatónyomaték növekedés (17. ábra).



17. ábra. Összefüggés az átlag forgatónyomaték csökkenése (N1-N3) és növekedése (N6-N3) között. A kapcsolat a két változó között szignifikáns ( $p < 0,05$ ).

#### 5.1.7. A vastus laterális rostösszetétele

A vastus laterális izom középső harmadából, három különböző helyről vett izommintában meghatározott átlag lassúrostok százalék aránya (ST%) az első biopsziában  $44,2 \pm 11,2$  % volt. A második és harmadik biopsziás mintában az ST %  $41,4 \pm 11,8$  % és  $42,5 \pm 15,1$  % volt. A különbségek a rostösszetételben a különböző időpontokban nyert biopsziás mintában nem voltak szignifikánsak. Az összehasonlítás alapjául az első biopsziás minta lassúrost százalékát választottuk.

#### 5.1.8. Összefüggés a rostösszetétel és a CK koncentráció között

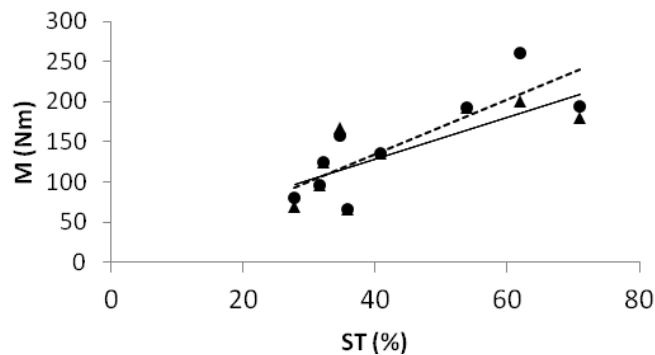
Az ST% és harmadik és hetedik napon meghatározott CK koncentráció között egyik esetben sem találtunk szignifikáns kapcsolatot ( $r = -0,025$  és  $r = 0,019$ ). Hasonlóan nem találtunk szignifikáns kapcsolatot az ST% és az edzés okozta CK koncentráció változások között.

#### 5.1.9. Összefüggés a rostösszetétel és a LDH koncentráció között

Az ST% és az LDH koncentráció valamint az LDH koncentrációváltozás között nem volt szignifikáns kapcsolat. Ez az eredmény azt jelzi, hogy az LDH enzim edzéshatásra bekövetkező mennyiségének változása nem izom rostösszetétel függő.

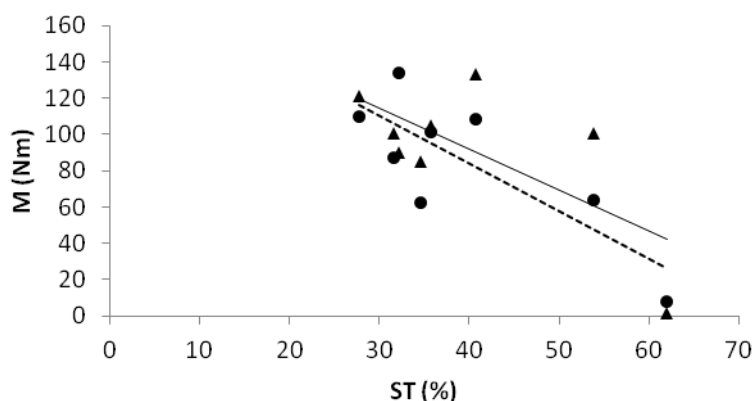
### 5.1.10. A forgatónyomaték és a rostösszetétel közötti összefüggés

A vastus laterális izom rostösszetétele és a térdfeszítő izmok által az izomkontrakciók alatt kifejtett csúcsforgatónyomaték és az átlag fogató nyomaték között nem volt szignifikáns kapcsolat egyik vizsgált edzésnapon sem (N1, N3, N6). Amikor a forgatónyomaték változással hoztuk összefüggésbe a rostösszetételt, akkor szignifikáns kapcsolatot találtunk a csúcsforgatónyomaték N1 és N3 közötti csökkenés mértéke között ( $r=0,76$ ,  $p<0,02$ ). Hasonlóan szignifikáns kapcsolatot találtunk az átlagforgatónyomaték csökkenése és az ST% között ( $r=0,81$ ,  $p<0,01$ ) (18.ábra).



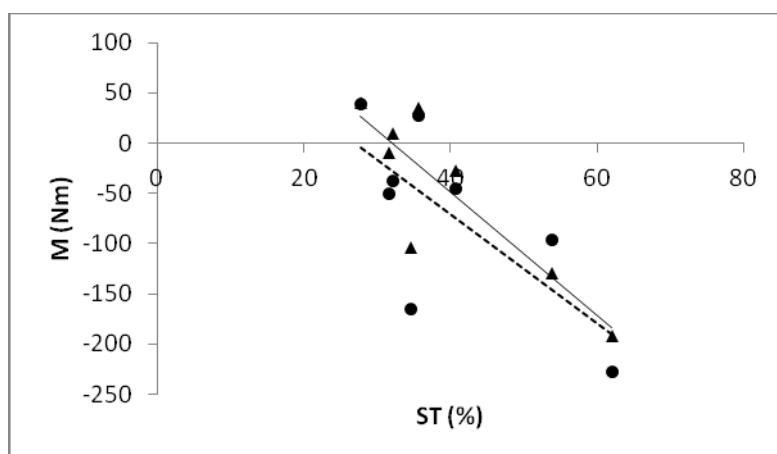
18. ábra. A rostösszetétel (ST%) és a csúcs-, és átlagforgatónyomaték visszaesése (N1-N3) között. Az egyenesek a lineáris regressziós egyenest reprezentálják. A fekete körök és a szaggatott vonal az átlag, a háromszögek és a teljes vonal a csúcsforgatónyomaték és az ST% kapcsolatát mutatja.

A harmadik edzést követően a forgatónyomaték fokozatosan növekedett és a hatodik edzésnapon jelentősen nagyobb volt, mint a harmadik edzésnapon. A növekedés mértékét a hatodik és a harmadik napon teljesített forgatónyomaték különbsége adta. A forgatónyomaték növekedés nagysága és az ST% között szignifikáns kapcsolatot találtunk mind a csúcsforgatónyomatékot ( $r=-0,76$ ,  $p<0,02$ ), mind az átlagforgatónyomatékot ( $r=-0,80$ ,  $P<0,01$ ) tekintve. Ez azt jelentette, hogy a zömében lassú rostokból felépülő izmokban kisebb volt a forgatónyomaték növekedése, mint a gyors izmokban (19. ábra).



19. ábra. Kapcsolat a rostösszetétel (ST%) és a csúcs-, és átlagforgatónyomaték növekedése (N6-N3) között. Az egyenesek a lineáris regressziós egyenest reprezentálják. A fekete körök és a szaggatott vonal az átlag, a háromszögek és a teljes vonal a csúcsforgatónyomaték és az ST% kapcsolatát mutatja.

Amint korábban bemutattuk, a hatodik edzésnapon a csúcs és átlag forgatónyomaték jelentősen nagyobb volt, mint a harmadik napon, de nem érte el az első edzésnap átlag értékeit. Az első és hatodik edzésnap forgatónyomatékainak különbsége szignifikáns kapcsolatot mutatott a rostösszetétellel (ST%). A csúcsforgatónyomaték és az ST% közötti összefüggés korrelációs koefficiense  $r=0,84$  ( $p<0,01$ ), az átlag forgatónyomaték és az ST% összefüggése  $r=0,87$  volt ( $p<0,01$ ). az összefüggést azt jelenti, hogy a zömében gyors rostokból felépülő izmok regenerálódása a folyamatos excentrikus edzések alatt is gyorsabb volt, mint a lassú izmoké (20. ábra)

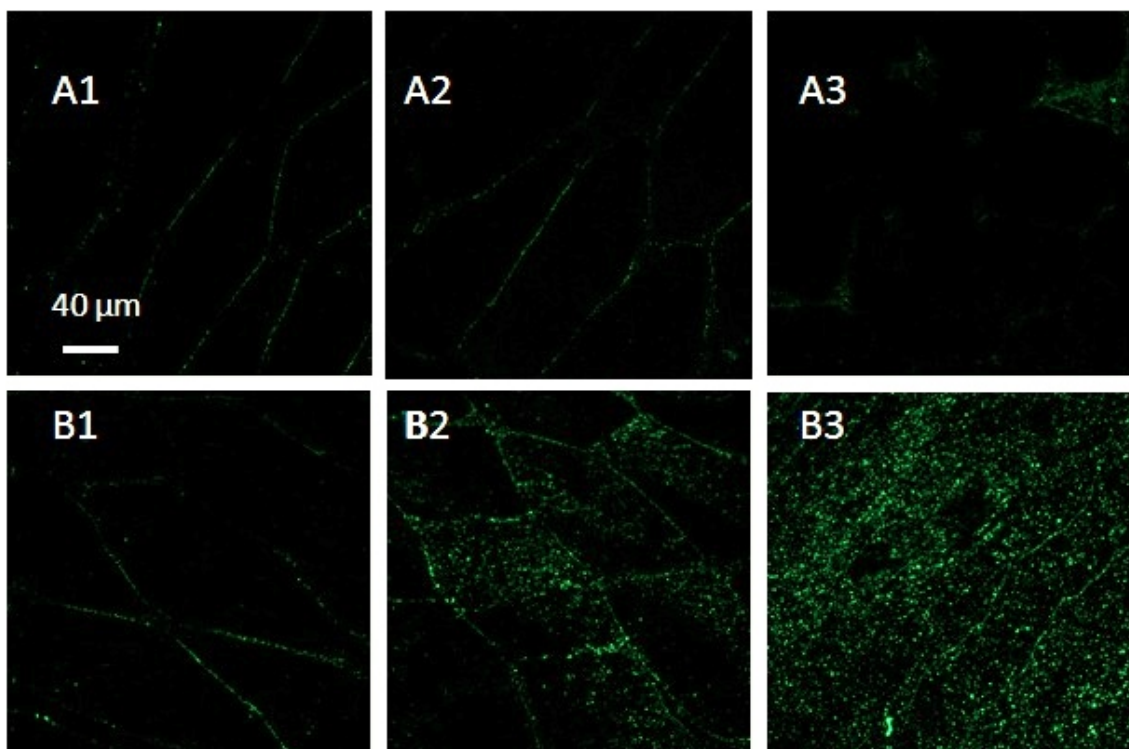


20. ábra. Az első (N1) és a hatodik (N6) edzésnapon teljesített és a csúcs-, és átlag forgatónyomaték különbség (N6-N1) átlagának kapcsolata a rostösszetétellel (ST%). Az

egyenesek a lineáris regressziós egyenest reprezentálják. A fekete körök és a szaggatott vonal az átlag, a háromszögek és a teljes vonal a csúcsforgatónyomaték és az ST% kapcsolatát mutatja.

#### 5.1.11. A szarkoplazmában megjelenő fibronectin és a rostösszetétel kapcsolata

A fibronectin mennyiségét, sűrűségét nem állt módunkban kvantifikálni. Mint ahogy a módszerek fejezetben leírtuk, három, a vizsgálatban részt nem vevő, de szakértő kutató vizsgálta meg a mintákat. Megnézték, hogy a lassú a gyors, vagy mindkét típusú rostban megjelent-e a szarkoplazmát kitöltő fibronectin. A 21. ábra két személynek az első (N-3), második (N3) és a harmadik (N7) biopsziából nyert izommetszetét mutatja immunhisztokémiai festést követően. Az „A” személy esetében csak a harmadik biopsziás mintában találtunk olyan rostokat, amelyekben a fibronectin aktiválódott. A „B” személynél már a második biopsziában (N3) is jelentős számú rostban megjelent a fibronectin, a harmadik biopsziában (N7) pedig csaknem valamennyi rostban jelen volt. A „B” személy vastus laterális izmában találtuk a legtöbb lassú rostot (72%), és a CK koncentrációja is a legmagasabb volt.





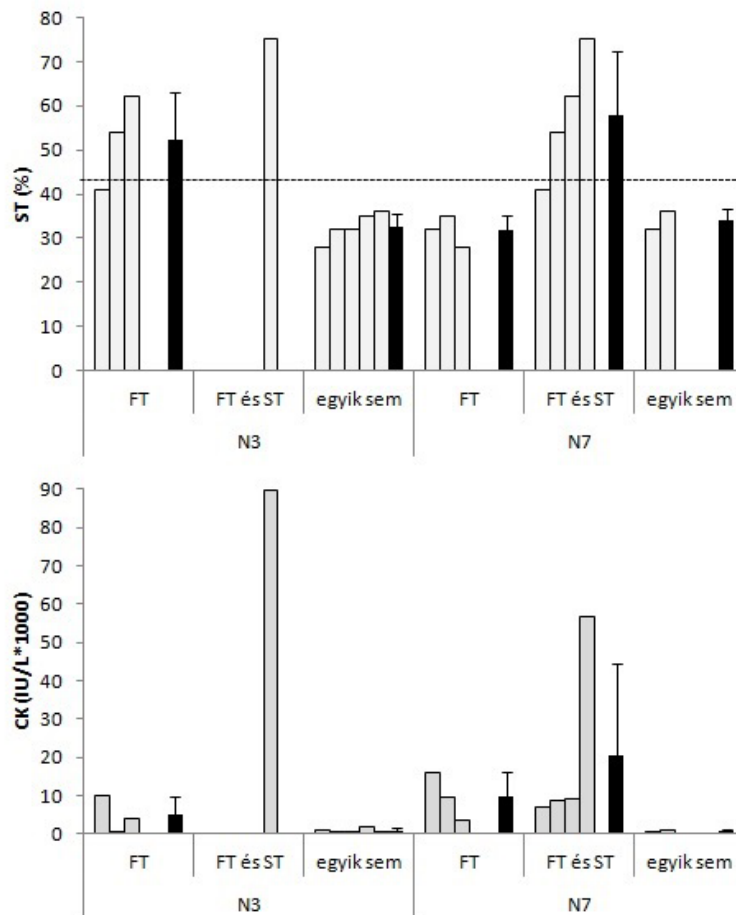
21. ábra. A zölddel festődő pontok a sejteken belül jelzik a fibronectin jelenlétét. Az „A” személy izomsejtjeiben csak kismérvű fibronectin látszik a harmadik (A3) biopsziás mintában. A „B” személy izomrostjaiban az excentrikus edzés hatására a második biopsziás mintában már jelentős számú a fibronectin jelenlét, ami a vizsgált mintában már majdnem minden rostra kiterjedt annak ellenére, hogy a harmadik nap után a nagy izomfájdalom miatt nem tudta folytatni az edzéseket.

A következő lépésben azt néztük meg, hogy a rostösszetétel függvényében mely izomrost típusokban jelent meg a fibronectin elsősorban. A 22. ábrán látható, hogy a harmadik edzésnapon (N3) a fibronectin elsősorban a gyorsrostokban jelent meg három személynél, akiknek az ST% a csoport átlagánál (39,8%) nagyobb volt. A legtöbb lassú rosttal rendelkező személy esetében mindkét izomrostban, de nagyobb százalékban a gyors rostokban festődött a fibronectin. Az átlagnál kevesebb ST%-kal rendelkező izmokban (öt személy) nem volt fibronectin felfedezhető egyetlen izomrostban sem. Az utolsó edzést követő napon (N7) nyert izommintában megnövekedett azoknak a személyeknek a száma (négy személy), akiknek mindkét rosttípusban aktiválódtak a fibronectin antitestek. Ezeknek a személyeknek a ST %-a nagyobb volt, mint a csoport átlag. Csak a gyorsrostokban találtunk fibronectint annál a három személynél, akiknek az izmában legkevesebb volt a lassú rost. Két személynél, akik szintén gyors rost dominanciával rendelkeztek, nem találtunk fibronectint a szarkoplazmában.

#### **5.1.12. A szarkoplazmában megjelenő fibronectin és a kretin kináz aktivitás kapcsolata**

A 21. ábra alsó panelje a fibronectin jelenlétét mutatja az izmokban CK aktivitás függvényében. Bár nem találtunk szignifikáns kapcsolatot a rostösszetétel és a CK koncentráció, valamint a koncentrációváltozás között, az ábra tanúsága szerint azokban az izmokban nagyobb a CK aktivitás, ahol mindkét izomrost típusban megjelent a fibronectin (N7) és ezekben az izmokban a csoport átlagnál nagyobb volt az ST%. A 3. napon kismértékben volt csak kimutatható fibronectin festődés a szarkoplazmában, kivéve egy személynél, aki a legmagasabb lassú rost aránnyal rendelkezett, valamint nála extrém magas volt a CK aktivitás is (89,700 IU/L). Ez a személy nem tudta

folytatni a vizsgálatot. Ennél a személynél a gyors rostok sérültek inkább, de pár lassú rostban is kimutatható volt a fibronectin a 3. napon.



22. ábra. Felső oszlopdiaagram: a fibronectin festődése a sejteken belül a rostösszetétel függvényében a harmadik és a hetedik napon. Alsó oszlopdiaagram: CK koncentráció a rostösszetétel függvényében a harmadik és hetedik napon. Az oszlopok a CK koncentrációt mutatják és a hozzá tartozó izom rostösszetétele, a rostok fibronectin festődése a felső oszlopdiaagramról olvasható le.

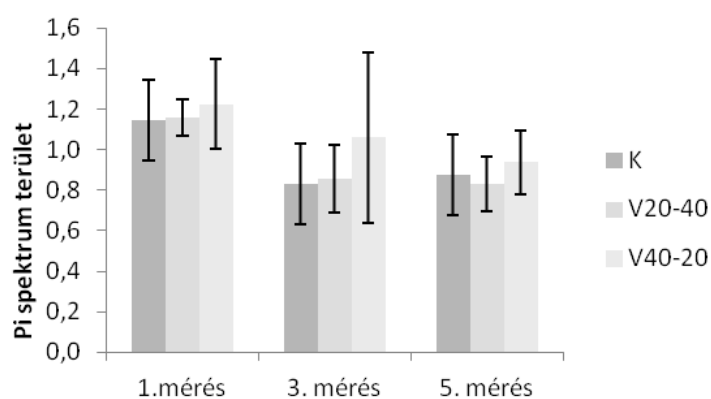
## 5.2. Vibrációs edzéses vizsgálat

### 5.2.1. Az inorganikus foszfát (Pi) spektrumterületének változása a vibrációs kezelések hatására

Az első <sup>31</sup>P-MRS vizsgálat a vibrációs kezelés előtt történt, amely adatok az összehasonlítás alapjául szolgáltak. Az alapadatokat tekintve nem találtunk szignifikáns különbséget a három csoport között, amikor a spektroszkópia a nyugalomban lévő izmon történt. Az első vibrációs/kontroll kezelés után a Pi mindhárom csoportban csökkent (23. ábra). A csökkenés mértéke: K: 27,5%; V20-40: 26,0%; V40-20:13,5%. A második vibrációs kezelést követő Pi spektrum nagysága a kontroll csoportban és a V20-40 csoportban változatlan maradt, a V40-20 csoportban 23,5 %-kal csökkent az alapadathoz viszonyítva. A változás mértéke csupán a V20-40 csoportban volt szignifikáns (F=8,8; p=0,005) a második (p<0,01) és harmadik (p<0,01) mérési eredményt összehasonlítva az első mérés eredményével (4. táblázat).

4. táblázat. A Pi spektrumterület átlag és szórás értékei az első, második és harmadik <sup>31</sup>P MR spektroszkópia során. Piros számok jelzik a szignifikáns különbséget.

	K	V20-40	V40-20
1. mérés	1,14±0,07	1,16±0,09	1,23±0,22
3. mérés	0,83±0,32	0,86±0,17	1,06±0,42
5. mérés	0,88±0,30	0,83±0,14	0,94±0,16



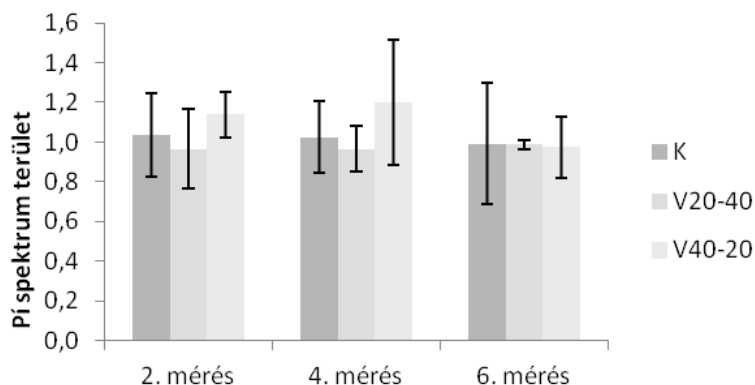
23. ábra. A Pi terület átlag és szórás értékei az első, második és harmadik <sup>31</sup>P MR spektroszkópia során.

## 5.2.2. Az inorganikus foszfát (Pi) spektrumterületének változása relaxált izomban egy perces izometriás kontrakció után

Az első és második vibrációs kezelés után az egy perces teszt feszítést követően (4. és 6. mérés) egyik csoportban sem találtunk szignifikáns változást a Pi területben az alapadatokhoz (2. mérés) viszonyítva (K:  $F=0,04$ ,  $p=0,96$ ; V20-40:  $F=0,04$ ,  $p=0,96$ ; V40-20:  $F=1,50$ ,  $p=0,26$ ) (5. táblázat, 24. ábra).

5. táblázat. A Pi spektrumterület átlag és szórás értékei az első, második és harmadik  $^{31}\text{P}$  MR spektroszkópia során az egy perces izometriás kontrakció után.

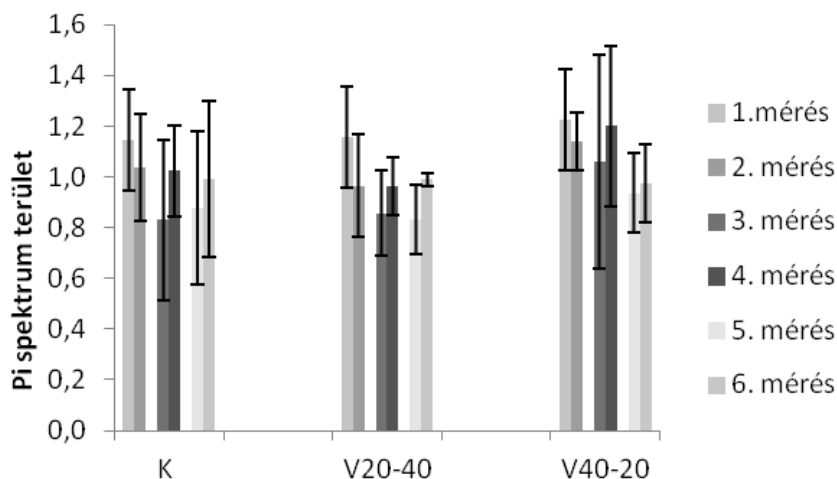
	K	V20-40	V40-20
2. mérés	1,04±0,21	0,97±0,20	1,14±0,11
4. mérés	1,02±0,18	0,97±0,11	1,20±0,32
6. mérés	0,99±0,31	0,99±0,02	0,97±0,15



24. ábra. A Pi spektrumterület átlag és szórás értékei az első, második és harmadik  $^{31}\text{P}$  MR spektroszkópia során az egy perces izometriás kontrakció után.

Az egyes csoportokban az első és második, a harmadik és negyedik, valamint az ötödik és hatodik mérési eredményt összehasonlítva jellegzetes tendenciák figyelhetőek meg. Az első mérésnél a vibráció nélküli és pihent izomban a Pi terület mindhárom csoportban nagyobb volt, mint az egy perces izometriás kontrakció után. Ugyanakkor az első és a második kezelés után az egy perces izometriás kontrakció után nagyobb Pi spektrum területeket számoltunk, mint az azt megelőző (vibráció utáni, de izometriás kontrakció nélküli) mérésnél (3. és 5. mérés). A legnagyobb növekedést a K csoportnál

találtuk (23,3%) a harmadik és negyedik mérés összehasonlításában. A V20-40 csoportban a legnagyobb növekedés (19,0%) az ötödik és a hatodik mérésnél volt kimutatható. A legkisebb volt a növekedés a V40-20 csoportban (13,2%). A változás mértéke azonban egyik esetben sem volt szignifikáns (25. ábra).



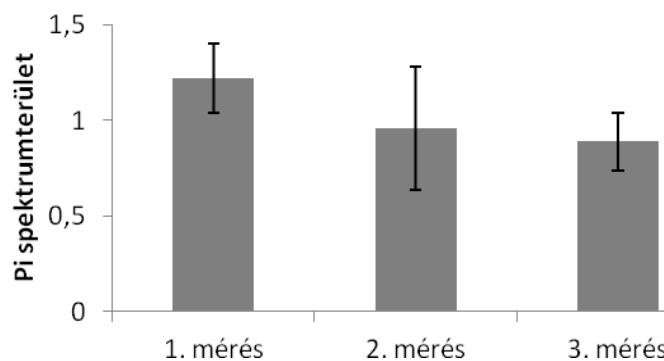
25. ábra. Az egyperces izometriás kontrakció hatása a Pi spektrum területére az egyes csoportoknál az első és második kezelést követően.

A két vibrációs csoportot egy csoportba vonva szignifikáns interakció volt kimutatható a vibrációs kezelésekre hatására ( $F=5,5$ ,  $p<0,01$ ). A post hoc teszt szignifikáns Pi csökkenést mutatott az első és második kezelést követően is ( $p<0,05$ , illetve  $p<0,01$ ) (26. ábra). Az egyperces izometriás kontrakció utáni spektroszkópia nem jelzett jelentős változást (6. táblázat).

6. táblázat. Pi spektrumterület átlag és szórás értékei a kontroll és az összevont vibrációs csoportokban a vibrációt követően, és az azt követő egyperces izometriás kontrakció során. A pirossal írt számok szignifikáns Pi csökkenést jeleznek a vibrációs kezelés hatására.

	Kontroll	Vibrációs
1. mérés	1,14±0,07	<b>1,22±0,18</b>
2. mérés	1,04±0,21	1,05±0,18
3. mérés	0,83±0,32	<b>0,96±0,32</b>
4. mérés	1,02±0,18	1,10±0,26

5. mérés	0,88±0,30	<b>0,89±0,15</b>
6. mérés	0,99±0,31	0,98±0,11



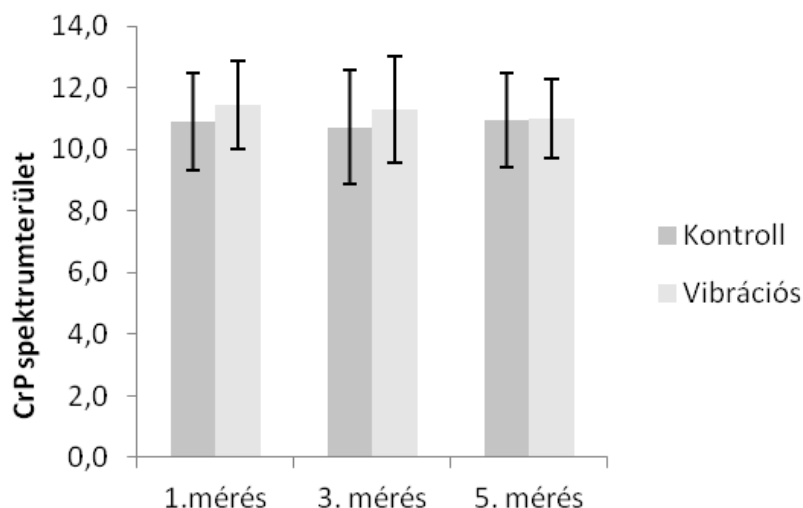
26. ábra. A Pi spektrumterület változása a vibráció hatására az összevont vibrációs csoportokban.

### 5.2.3. A kreatinfoszfát (PCr) spektrumterületének változása a vibrációs kezelések hatására

Egyik csoport esetében sem találtunk szignifikáns változást a kreatinfoszfát spektrumterületében a vibráció vagy az egyperces izometriás kontrakció hatását illetően. A PCr meglehetősen nagy stabilitást mutatott a vizsgálat során (7. táblázat). Az összevont vibrációs csoportban sem okozott szignifikáns változást a vibrációs kezelés (27. ábra).

7. táblázat. PCr spektrumterület átlag és szórás értékei az alapmérés és vibrációs kezelés után.

	K	V20-40	V40-20
1. mérés	10,9±1,6	11,0±1,4	11,5±1,5
3. mérés	10,7±1,9	10,6±2,0	11,0±1,3
5. mérés	10,9±1,5	10,7±1,2	11,2±1,4



27. ábra. A PCr spektrum terület átlag és szórás értékei az összevont vibrációs és kontroll csoportban.

#### 5.2.4. Inorganikus foszfát és kreatinfoszfát arány (Pi/PCr)

Mindhárom csoportban a Pi/PCr arány csökkent a vibrációs kezelés hatására. A csökkenés mértéke a K csoportba 26,75 és 25,9%, a V20-40 csoportban 22,7% és 25,4%, a V40-20 csoportban 18,2% és 22,4% volt. A változás egyik esetben sem volt szignifikáns (8. táblázat).

8. táblázat. Pi/PCr arány átlag és szórás értékei az egyes mérések során a kontroll (K) és a két vibrációs csoportban.

	K	V20-40	V40-20
1. mérés	0,106±0,013	0,106±0,014	0,108±0,027
2. mérés	0,103±0,004	0,093±0,026	0,097±0,011
3. mérés	0,078±0,027	0,083±0,021	0,088±0,032
4. mérés	0,104±0,023	0,092±0,020	0,103±0,023
5. mérés	0,079±0,021	0,079±0,023	0,084±0,012
6. mérés	0,104±0,044	0,094±0,009	0,089±0,009

Amikor a két vibrációs csoportot összevontuk, akkor szignifikáns csökkenést (20,5% és 24,0%) regisztráltunk a vibrációt követő <sup>31</sup>P MR spektroszkópia során. A csökkenés mértéke nem volt szignifikáns az egyperces izometriás kontrakció után (9. táblázat).

9. táblázat. Pi/PCr arány átlag és szórás értékei az egyes mérések során a kontroll (K) és az összevont vibrációs csoportban. Piros szín szignifikáns csökkenést mutatja az első alpméréshez viszonyítva.

	Kontroll	Vibrációs
1. mérés	0,106±0,013	0,108±0,018
2. mérés	0,103±0,004	0,095±0,019
3. mérés	0,078±0,027	0,086±0,025
4. mérés	0,104±0,023	0,098±0,021
5. mérés	0,079±0,021	0,082±0,017
6. mérés	0,104±0,044	0,091±0,009

#### 5.2.5. ATP spektrumterületek

Az  $\alpha$ ATP, a  $\beta$ ATP és a  $\gamma$ ATP spektrumterületek változása a vibrációs kezelés és az izometriás kontrakció hatására minimális volt, és az átlagok között egyetlen esetben sem találtunk szignifikáns különbséget (10. táblázat).



10. táblázat. Az ATP spektrumterületek átlag és szórás értékei a hat mérés során a kontroll (K) és a két vibrációs (V20-40, V40-20) csoportban.

$\alpha$ ATP terület	K	V20-40	V40-20
1. mérés	3,06±0,63	3,24±0,50	3,30±0,54
2. mérés	2,95±0,44	3,25±0,36	3,43±0,56
3. mérés	3,07±0,61	2,84±0,41	3,26±0,36
4. mérés	2,97±0,58	3,39±0,35	3,50±0,52
5. mérés	3,00±0,43	3,15±0,41	3,13±0,31
6. mérés	3,04±0,49	3,33±0,51	3,24±0,64
$\beta$ ATP terület	K	V20-40	V40-20
1. mérés	1,75±0,22	1,99±0,96	1,90±0,34
2. mérés	1,72±0,16	2,02±0,18	2,06±0,25
3. mérés	1,73±0,22	1,65±0,31	1,84±0,17
4. mérés	1,67±0,25	1,58±0,60	2,00±0,21
5. mérés	1,72±0,18	1,89±0,23	1,73±0,32
6. mérés	1,80±0,17	2,16±0,39	1,95±0,19
$\gamma$ ATP terület	K	V20-40	V40-20
1. mérés	2,84±0,64	2,92±0,35	2,95±0,49
2. mérés	2,51±0,49	2,82±0,28	2,95±0,39
3. mérés	2,74±0,37	2,60±0,60	2,90±0,32
4. mérés	2,44±0,47	2,85±0,17	2,92±0,44
5. mérés	2,68±0,27	2,72±0,40	2,82±0,47
6. mérés	2,44±0,51	2,75±0,27	2,74±0,31

A vibrációs csoportok összevonásával sem találtunk szignifikáns változást az ATP spektrumterületeiben.

Amikor az  $\alpha$ ATP,  $\beta$ ATP és  $\gamma$ ATP spektrumterületeket összeadtuk és így vizsgáltuk a vibrációs kezelés illetve az izometriás erő kifejtés hatását, szintén nem volt jelentős változás a spektrumterületre sem a kontroll, sem a vibrációs csoportokban.

### 5.2.6. Az összes ATP és a kreatinfoszfát aránya

Az ATP és a PCr aránya bár a V20-40 csoportban 9,5 százalékot, a V40-20 csoportban 5,7 százalékot csökkent az első vibrációs kezelés után, a változás egyik esetben sem volt szignifikáns (11. táblázat).

11. táblázat. Az összes ATP és a PCr spektrumterületének aránya a hat mérés során a három vizsgált csoportban. A piros színnel írt átlagok szignifikáns különbséget jelölnek a K és a V20-40, valamint a K és a V40-20 csoport között.

	K	V20-40	V40-20
1. mérés	0,70±0,04	0,74±0,09	0,71±0,02
2. mérés	0,72±0,04	0,77±0,06	0,72±0,03
3. mérés	<b>0,71±0,02</b>	<b>0,67±0,02</b>	<b>0,67±0,02</b>
4. mérés	0,71±0,07	0,73±0,08	0,73±0,01
5. mérés	0,68±0,03	0,73±0,05	0,69±0,06
6. mérés	0,73±0,04	0,78±0,08	0,72±0,06

### 5.2.7. A csoportok összehasonlítása

A csoportok Pi, PCr, ATP spektrumterületeinek átlagát, illetve a képzett arányszámok (Pi/PCr, összesATP/PCr) átlagait összehasonlítva a különböző mérési időpontokban, nem találtunk szignifikáns különbséget egy kivétellel. Szignifikáns különbség volt a csoportok összesATP/PCr aránya között, amikor a harmadik mérési időpont átlagait hasonlítottuk össze ( $F=4,37$ ;  $p=0,037$ ). A post hoc teszt azt mutatta, hogy a V20-40 és a V40-20 vibrációs csoport átlagai szignifikánsan kisebbek volt ( $p<0,05$ ), mint a kontroll csoporté (11. táblázat).

## **6. Megbeszélés**

### **6.1. Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat**

Tanulmányunkban azt mutattuk be, hogy edzetlen, egészséges férfiaknál a hat egymást követő napon tartott nagy erőkifejtésű excentrikus edzés hatására miképpen változott a vizsgálati személyek által kifejtett forgatónyomaték, az izomlázat indirekt módon jelző enzimek a vérben (CK, LDH), és a gyulladásos folyamatokat jelző fibronectin az excentrikus edzés következtében beálló mikro-sérülések következményeként. Az excentrikus edzés hatására szignifikáns izomláz keletkezett, aminek az indirekt jelei kimutathatók voltak, azonban nem mutattak összefüggést a forgatónyomaték változással és izom rostösszetétellel.

#### **6.1.1. DOMS direkt és indirekt jelei**

Korábbi tanulmányok eredményei alapján, nagy amplitúdójú, közepes sebességű, közepes ismétlésszámú, maximális intenzitású excentrikus edzésprotokollt használtunk, hogy maximalizáljuk az edzéshatást a quadriceps izomban (Morgan and Proske 2004, Talbot and Morgan 1998). Korábbi kutatásokban ülőmunkát végző férfi vizsgálati alanyok, akik korábban semmilyen excentrikus edzésben nem vettek részt, 39%-os forgatónyomaték csökkenést értek el a harmadik edzésnapon az excentrikus edzések hatására, ami szignifikáns volt (Bowers et al. 2004, Clarkson and Tremblay 1988a, Friden et al. 1983, Hortobagyi et al. 1998, Magal et al. 2010).

A megismételt excentrikus edzések hatására nagyfokú izomfájdalom alakult ki, ami a harmadik edzésnapon érte el a maximumát, de még az ötödik napon is szignifikánsan magasabb volt, mint az első edzésnapon, ahogy korábbi excentrikus edzést végző kutatásokban is (Chen and Nosaka 2006, Mair et al. 1995, Nosaka et al. 2001a, b, Vaczi et al. 2011).

A kreatin kináz, ami az izom mikrosérülésének indirekt markere, a sejtfal permeabilitásának megváltozására utal, 70-szeresére emelkedett, valamint szignifikánsan növekedett az LDH aktivitása is. Azonban ezek a jelzők nem mutattak kapcsolatot a rostösszetétellel. Nem volt összefüggés a vizsgálati személyek százalékos

rostösszetétele, valamint DOMS, CK és LDH aktivitás között, amiből arra következtethetünk, hogy az izom mikrosérülése nem rosttípus függő.

A fibronectin megjelent a sejtek körül és a felbomlott sejtekbe hatolva is, ami a gyulladáshoz vezető folyamatokat jelezheti (Smith 1991). Yu et al. (2002) nem talált fibronectint a rostokban egy alkalommal adagolt excentrikus edzés hatására, ami ellentétes a jelen vizsgálat eredményeivel. Ők ezt azzal magyarázták, hogy azokban az irodalmakban, ahol az izomrost sérülését mutatta a fibronectin, a kísérleteket állatokon, nyulakon végezték, nem pedig humán mintán. Mi humán mintán is találtunk fibronectint az izomrostokban. Minden valószínűség szerint ennek az oka az, hogy vizsgálatunkban teljesen edzetlen személyeken végeztük az izomnyújtást és mi jelentősen nagyobb mozgás terjedelmet alkalmaztunk (120 fok), ami az izom jelentősen nagyobb megnyújtását eredményezi. Ezt az érvelést támasztja alá (Nosaka and Sakamoto 2001) vizsgálati eredménye, amelyben azt mutatták ki, hogy a nyugalmi hosszánál nagyobb hosszban történő nyújtásnál jelentősen nagyobbak a DOMS jellemzők. A térdízület 60 fokos szög helyzetben képesek a legnagyobb forgatónyomaték kifejtésére (Smidt 1973), amelyet optimális szög helyzetnek tekinthetünk a forgatónyomaték kifejtése szempontjából. A mi esetünkben az ízület behajlítása kétszer ekkora volt, és a hajlítás 130 fokos térdízületi szög helyzetben fejeződött be. További magyarázatként szolgálhat az a tény, hogy a lépcsőről lefutásnál, illetve az excentrikus kerékpározásnál a térdízület izmok feszültségének nagysága nem éri el az excentrikus kontrakcióknál mérhető legnagyobb izomfeszülést. Az általunk alkalmazott módszernél a vizsgálati személyeknek az izomnyújtás megkezdésétől fogva maximális ellenállást kellett kifejteni az állandó sebességgel forgó erőkarral szemben, vagyis valamennyi szög helyzetben az izom maximális feszültségnek volt kitéve. Valószínűleg ennek volt tulajdonítható, hogy az „N” személynél nekrotizált izomsejteket is találtunk.

Vizsgálatunkban azt találtuk, hogy bár az izomfájdalom három nap után fokozatosan eltűnt, és a térdízület forgatónyomaték képessége is fokozatosan helyreállt, a kreatin kináz aktivitása folyamatosan nőtt, és a hetedik napon csaknem hetvenszerese volt a normál értéknek. Az izomfájdalom fokozatos megszűnéséből és a forgatónyomaték kifejtő képesség helyreállítódásából azt a következtetést vonhatnánk le, hogy az izomsejtek rekonstrukciója a harmadik napon megkezdődött, ahogy Chen és Hsieh (2001) feltételezte. Az immunhisztokémia vizsgálat azonban érdekes módon azt

jelezte, hogy a 48. órában, amikor legnagyobb volt az izomfájdalom és a legnagyobb visszaesés a forgatónyomatékokban, szarkomer szinten alig volt változás kimutatható, a fibronectin pár izomrostban volt jelen csupán. Az irodalmi adatokkal ellentétben (Nosaka and Newton 2002) nem jött létre a protektív hatás az első napi excentrikus edzés okozta változások kivédésére, hiszen a CK aktivitás tovább növekedett és a hetedik napon - csaknem fájdalommentesség ellenére - az izomsejtekben jellegzetes sérüléseket tapasztaltunk. A fibronectin is nagyobb terjedelemben és erősebb intenzitással jelent meg a hatodik edzést követő napon (N7) az izomrostok körül és a sejtek belsejében annak ellenére, hogy az izomfájdalom megszűnt. Vizsgálati eredményeink arra utalnak, hogy a több napos, egymást követő excentrikus edzés lassítja ugyan a rekonstrukciós folyamatokat, de a regenerálódás feltételezhetően megkezdődik a harmadik nap után azokban a rostokban, amelyek a legkorábban sérültek. Ezt a feltételezést támasztja alá, hogy a negyedik edzésnapon az edzések alatti átlag és csúcspörgatónyomaték nagyobb volt, mint az előző napon, a hatodik napon pedig szignifikánsan nagyobb volt, mint a harmadik napon, amikor a legkisebb átlagpörgatónyomatékokat adták le a személyek. Másrészt a fibronectin nem csak a gyulladási folyamatokat jelzi, hanem részt vesz a sejtek regenerálásában is.

A vizsgálati eredményeink azonban arra is rámutatnak, hogy ugyanazon behatásra az egyes személyek és izmaik eltérően reagálnak. A kilenc vizsgálati személy közül egy olyan izomfájdalommal küszködött a harmadik edzésen, hogy meg kellett szakítani az edzését. Ennek ellenére a hetedik napon is jelentős izomszerkezet változást találtunk, és a mintában fellelhető izomrostok többségének szerkezete a sérülés nyomait mutatta. A többség közepes szimptomákkal folytatta az edzéseket, náluk is a harmadik biopsziás metszetekben találtunk változásokat. Az izomszerkezet változásokat mutatta több sejtben, a nagyobb terjedelemben és intenzitással megjelenő fibronectin.

A mindennapos nagy ízületi szög tartományban végzett excentrikus edzés hatására az izomban mikro-sérülések keletkeznek, ezt jelzi a pörgatónyomaték visszaesése, az izomfájdalom növekedése, a CK és LDH aktivitás növekedése a vérben, valamint a gyulladást jelző fibronectin megjelenése. A regenerációs folyamatok lelassulnak, ezt jelzi a folyamatosan növekvő CK aktivitás és a pörgatónyomaték kifejtő képesség lassú visszatérése az alapszintre. Bár az immunhisztokémiai eredmények

mutatnak kismértékű izomkárosodást, ezek azonban nem tűnnek irreverzibilisnek, és nem akadályozzák az izmok rekonstrukcióját.

### **6.1.2. DOMS és a rostösszetétel közötti kapcsolat**

A vastus laterális izommintából meghatározott rostösszetétel nem különbözött a három mintában. Ez mutatja a rostösszetétel meghatározásának megbízhatóságát is.

A forgatónyomaték csökkenése és a rostösszetétel közötti kapcsolat elemzése igen összetett. A forgatónyomaték csökkenése a 3. edzésnapon közel 40% volt mind a csúcsgörgőnyomaték, mind az átlag forgatónyomaték esetében. A kapott eredményeink megerősítik a korábban megfigyeltet, miszerint a forgatónyomaték jelentősen csökken (66.2-260.6 Nm), és ez a csökkenés összefüggést mutatott a lassú rostok százalékos arányával. Akinél magasabb volt a lassú rostok aránya, jobban csökkent a harmadik edzésnapon a csúcsgörgőnyomaték, mint a magasabb gyors rost arányúaknak.

Vizsgálatunk megtervezésekor azt feltételeztük, hogy a nagy amplitúdójú ízületi hajlítás alatt végzet kis sebességű, de maximális izomfeszülés alatti izomnyújtás mind a két rosttípusban idéz elő strukturális változást. A CK aktivitás szint mintegy 70-szerese volt a kiinduló szintnek 48 órával az első edzést követően. A fibronectin megjelent a rostok belsejében. Ezekből arra következtethetünk, hogy az izomban mikro-sérülések keletkeztek. Vizsgálati eredményeink azonban arra engednek következtetni, hogy a mindennapos excentrikus edzés hatására létrejövő izommechanikai, és biokémiai változások nem hozhatóak összefüggésbe a vizsgált izom rostösszetételével. Vizsgálatunkban azt találtuk, hogy a rostösszetétel nem mutatott szignifikáns összefüggést sem a CK, sem az LDH aktivitás növekedésével.

Ha a CK és LDH aktivitás alapján arra következtetünk, hogy a sérülés nem rosttípus függő, akkor egyformán mind a gyors- mind a lassú rostok sérülhetnek a vizsgálati személyeknél. A sérült/ép izomrost arány ez esetben az alacsony gyors rostösszetételnél magasabb lesz, mint ugyanazon személynek a nagyobb arányú lassú rostjában, azaz akinek nagyobb a lassú rost aránya, annál feltételezhetően a kisebb arányú gyorsrostok nagyobb %-ban sérültek. Az alacsonyabb gyors rost százalékkal rendelkezők gyors rostjainak nagyarányú sérülése miatt kevesebb gyors rost maradt

épen, ami erőt fejthetne ki, ez okozhatja az átlagforgatónyomaték csökkenését. Ez azt mutatná, hogy a nagy amplitúdójú, közepes sebességű excentrikus nyújtás esetén a gyors rostok kapcsolódnak be inkább az erőkifejtésbe.

A fibronectin festés eredménye szintén ezt erősíti meg. Magasabb lassú rost arányúaknál mindkét rosttípusban kimutatató volt a fibronectin. Feltételezésünk szerint eleinte a gyors rostok sérültek, majd a megismételt edzés hatására amikor már alig maradt ép gyors rost, a munkába bekapcsolódtak a lassú rostok is, és ezekben is keletkezett sérülés. A gyors rostok magas érintettsége miatt lehetett ezeknél a személyeknél a forgatónyomaték nagyobb visszaesése is. A többségében gyors rostokkal rendelkező személyeknél első edzésekkor a gyors rostok sérülhettek, de nagyobb arányban maradtak ép rostok is, így kevésbé esett vissza a forgatónyomaték, a lassú rostok pedig nem kapcsolódtak be nagymértékben az izommunkába, hiszen náluk szinte csak gyors rostokban figyelhettük meg a sérülést direkt módon jelző fibronectint.

Az irodalom nem egységes abban, hogy az aktív izom nyújtása, az excentrikus edzés egységesen valamennyi rosttípusban előidézi mikro-sérülést, vagy specifikus a gyors-, vagy lassú rostokat tekintve. Humán vizsgálatokban azt találták, hogy a gastrocnemius izomban a gyors rostok sérültek és mutattak DOMS szimptomákat lejtőn hátrafelé járás során (Jones et al. 1986). Brockett et al. (2002) macskák gastrocnemius izmának nyújtását követően az izomrost hosszúság és az optimális izomhossz változás alapján úgy találta, hogy a gyors motoros egységekhez tartozó izomrostok hossza jelentősebben nőtt, mint a lassúrostoké, valamint a gyorsrostok maximális erőkifejtése nagyobb hosszak felé tolódott el. Lieber és Fridén (1988) azt találta, hogy elsősorban a II. típusú rostok sérülnek. Ebből azt a következtetést vonták le, hogy az izomnyújtás elsősorban a gyorsrostok mikro-sérülését idézte elő. Ezzel szemben több kutató, állati izmokon végzett vizsgálat alapján arról számolt be, hogy az excentrikus kontrakciót magában foglaló mozgás, edzés hatására elsősorban a lassú rostokban keletkeztek mikro sérülések (Armstrong R. B. et al. 1983, Vijayan et al. 1998, 2001). Fridén és Lieber (1998) nyulakon végzett excentrikus edzés hatására azt találta, hogy a sérült sejtek 92%-a IIB típusú, és csak 8%-a IIAB típusú. Azt találták, hogy amelyik sejtekben megjelent a fibronectin, azokban a sejtekben a desmin nem volt kimutatható.

Annak ellenére, hogy a kezdeti vizsgálatok azt mutatták, hogy eltérés van a motoros egységek bekapcsolódásának sorrendjében az excentrikus izommunka esetén, a koncentrikus edzéshez képest (Howell et al. 1995, Nardone and Schieppati 1988, Nardone et al. 1989), legutóbbi tanulmányok arra a következtetésre jutottak, hogy a nagy és kis motoros egységek akciós potenciál lefutása lassabb ugyan excentrikus edzések során, de a méret elv szerinti bekapcsolódás nem változik (Duchateau and Baudry 2013, Sekiguchi et al. 2013). Az újabb eredmények ellenére, bár még mindig születnek korábbi nézeteket felkaroló tanulmányok (Cermak et al. 2013), nem valószínű, hogy egy megváltozott motoros egység bekapcsolódási sorrendje szükséges az excentrikus edzés által kiváltott hatás eléréséhez az izomban.

Biokémiai, hisztokémiai és immuncitokémiai tanulmányok nagyobb sérülékenységet figyeltek meg a II-es típusú izomrostoknál, a IIa és IIx miozin nehézláncot tartalmazó rostokban, valamint a II-es rosttípushoz kapcsolódó szatelit sejtekben humán vizsgálatokban (Cermak et al. 2013, Friden et al. 1983, Friedmann et al. 2004, Jones et al. 1986) állat tanulmányokban (Lieber and Friden 1988, Macaluso et al. 2012, Vijayan et al. 2001) valamint primer sejtenyészetekben a myotubulusokra gyakorolt passzív vagy excentrikus nyújtást követően (Hanke et al. 2010). Azonban találunk olyan cikkeket melyben a lassú rostok sérülékenyebbégéről számoltak be (Armstrong R. B. et al. 1983, Hody et al. 2013, Mair et al. 1995, Vijayan et al. 2001). Továbbá bebizonyították, hogy az excentrikus edzés képes a szatelit sejteket stimulálni, a gyors beidegzésű rostokban izomsérülés nélkül (Cermak et al. 2013) és növelni az akaratlagos maximális erőt ~ 20%-kal a miozin nehéz lánc (MHC) összetétel változása nélkül (Raue et al. 2005), valamint az excentrikus mozgás okozhat DOMS-ot, nagymértékű kreatin kináz növekedést, és 68%-os ultrastrukturális sérülést, az erő normál, vagy edzés előtti szintje mellett (Hortobagyi et al. 1998). A fent leírtakból látható, hogy az excentrikus edzés hatására nagy változások zajlanak le az egészséges quadriceps izomban. Mégis az eredmények túlnyomó többsége arra utal, hogy az egyszeri excentrikus edzés, amely során a mi tanulmányunkhoz hasonló paramétereket használtak, létrehozhat rosttípus specifikus adaptációt egészséges személyeknél. Míg valószínűleg a gyors rostok sérülékenyebbek az excentrikus edzések során, ez mégsem jelenti feltétlenül azt, hogy a motoros egységek bekapcsolódási sorrendje megváltozik.



A gyors rostok nagyobb sérülékenysége még tisztázatlan. Egyik feltételezés szerint azokban az izmokban, amelyekben a lassúrost arány extrém magas az excentrikus kontrakció során, a gyors rostok megnyújtása az izom leszálló hossz-feszülés görbe szakaszában következik be. Ez azt jelenti, hogy a nagy terjedelmű izomnyújtás elsősorban a gyorsrostokban okoz mikrosérülést. A mi vizsgálatunkban a térdfeszítő izmok maximális nyújtásnak voltak kitéve, ami indokolhatja, hogy az első edzések során a gyorsrostok sérültek azokban az izmokban, amelyekben a mintákban szereplő izmok lassúrost átlagánál nagyobb volt a lassúrost reprezentáció. Bár eredményünk és annak magyarázata ellentétes Proske és Morgan (2001) megállapításával, nevezetesen nem találtak összefüggést a rostösszetétel és az izomrost-sérülés között, az ellentmondást az magyarázza, hogy az izomnyújtás hossza különböző volt a két vizsgálatban. A mikrosérülés rosttípus specifikusságát támasztják alá azok a vizsgálatok, amelyek jellegzetes különbséget találtak a gyors és lassúrostok strukturális fehérjéiben (Cermak et al. 2013). Minthogy a sérülések a myofilamentumok rácsos szerkezetében lokalizálhatók (Proske and Morgan 2001), reálisnak tűnik az az elmélet, amely szerint a mikrosérülések háttérben fehérjeszerkezeti különbségek állnak. Ezt az elméletet támasztja alá az a kutatási eredmény, amelyet kémiaiag eltávolított sejtmembrános izomrostokon végeztek, mely szerint azok a rostok sérülnek meg először, amelyek úgynevezett myofilamentum gyengeséggel bírnak, mert nem tartalmaznak miozin nehézlánc I típust (Choi et al. 2012).

Jelen tanulmány alapján nem következtethetünk teljes bizonyossággal az izomnyújtás okozta speciális mechanizmusra, de a fibronectin adatokon keresztül újabb bizonyítékot kaptunk arról, hogy a gyors rostok sérülékenyebbek, ellentétben a lassú rostokkal. Ugyanakkor vizsgálati beállításunk elsőként mutat arra rá, hogy az izom rostösszetétele befolyásolja, hogy mely izomrosttípus sérülékenyebb és az egymást követő, napi gyakoriságú excentrikus edzés folyamatában hogyan válnak sérülés érzékennyé azok a rostok, amelyek kezdetben rezisztensek voltak a nyújtás okozta mikrosérüléssel szemben. Vizsgálati eredményeinkből levonható az a következtetés, hogy bár kezdetben a gyorsrostokat éri átmeneti károsodás, többek között azért mert a „Z” lemezek vékonyabbak (Eisenberg 2010, Friden et al. 1983, Horowitz 1992), a további edzések a lassúrostokban is mikrosérüléseket okoznak, mivel az izomrostok hossz-feszülés görbéje megváltozik. Nevezetesen az izomrostok optimális hossza

eltolódik a nagyobb hosszak irányába. Ezeket a tényeket jól alátámasztja a rostösszetétel és az első három napon bekövetkezett forgatónyomaték csökkenés közötti szignifikáns kapcsolat. Minthogy nem találtunk szignifikáns összefüggést a rostösszetétel és a maximális és átlag forgatónyomaték között, feltételezhető, hogy azokban az izmokban, amelyekben zömében lassú rostok voltak, csaknem valamennyi gyorsrost megsérült. A nagy gyorsrost aránnyal rendelkező izmokban, minthogy elegendő gyorsrost állt rendelkezésre az erőkifejtésre, egyszerre kevesebb gyorsrostnak kellett erőt kifejteni és ezért relatíve több gyorsrost maradt épen. Ebből következőleg a forgatónyomaték csökkenés is kisebb volt, mint a több lassú rostot tartalmazó izmok esetében.

### **6.1.3. Az izom rostösszetétel és az erőkifejtő képesség helyreállása közötti kapcsolat**

A forgatónyomaték csökkenésének megállása és újbóli növekedése az excentrikus edzést követően kettő, három nappal később kezdődik, leggyakrabban biokémiai regenerálódással is együtt (pl. CK és LDH koncentráció csökkenés), valamint a neuromuszkuláris funkció helyreállítódással jár (pl. EMG aktivitás növekedés, inger-válasz kapcsolat) (Armstrong R. B. et al. 1983, Chen and Hsieh 2001, Costa et al. 2007, Hortobágyi et al. 1998, McHugh et al. 2002, Vaczi et al. 2009). Vizsgálatunkban a negyedik napon elvégzett excentrikus edzés alatt számított csúcs és átlagforgatónyomatékok nagyobbak voltak, mint a harmadik edzésen, és a hatodik napig szignifikáns növekedést regisztráltunk. Bár a hatodik napon számított forgatónyomatékok 15,6 százalékkal kisebbek voltak, mint az első napi, a különbség nem volt szignifikáns. Statisztikai értelemben a forgatónyomatékok nem különböztek egymástól. Az izomfájdalom és merevség mértékét jelző DOMS mutató csaknem visszatért a nulla szintre, amely szintén alátámasztja az izmok regenerációjának előrehaladottságát. Ezt a megállapításunkat támogatja Magal et al. (2010) vizsgálati eredménye, akik szignifikáns kapcsolatot találtak a DOMS mutató és a mechanikai teljesítmény között. Ugyanakkor a CK koncentráció a vérben, ha kis mértékben is, de tovább nőtt (76-szorosa a normál értéknek). Következésképpen a CK ugyan jelzi a sejtmembrán megnövekedett permeabilitását, de nem ad tájékoztatást a sejt regenerációjáról.

Magal et al. (2010) vizsgálati eredményeihez hasonlóan mi sem tudunk kimutatni kapcsolatot a CK koncentráció és a rostösszetétel között. Ez az eredmény is azt erősíti meg, hogy az excentrikus edzés okozta CK koncentráció növekedése nem izomrosttípus függő. A CK aktivitás magas szintjéhez hasonlóan a rostok szarkoplazmájában növekedett a fibronektin jelenléte. Bár a fibronektin a gyulladás egyik jelzője, ebben az esetben mégis az feltételezhető, hogy a megnövekedett fibronektin tartalom nem további sérülést, hanem a sejt regenerálódást jelenti. A szarkoplazma regenerálódása azonban még nem lehet teljes, amelyet elektronmikroszkópos vizsgálatok is bizonyítanak (Hortobágyi et al. 1998).

A forgatónyomaték növekedés mértéke (dM) és a rostösszetétel között szignifikáns, negatív kapcsolat volt, amely azt jelenti, hogy minél több gyorsrost volt egy izomban, annál nagyobb volt a forgatónyomaték növekedés. Ismereteink szerint a mi vizsgálatunk volt az első, amely a forgatónyomaték változását hozta összefüggésbe a rostösszetétellel. Erre az adott módot, hogy az izmok erőkifejtését nem különböző erőszetekkel vizsgáltuk, hanem az excentrikus edzés alatt mért és számított forgatónyomatékkal jellemeztünk, amely sokkal pontosabb és realisabb képet ad az izom munkavégző képességéről. Mint ahogy korábban említettük, egy olyan vizsgálatról tudunk, amely a rostösszetétel és az izom excentrikus edzés okozta mikrosérülését jelző változók között keresett összefüggést (Magal et al. 2010). A két vizsgálat eredményei azonban csak részben vethetők össze, mert Magal-ék egy vibrációs edzést alkalmaztak, és így nem volt meg a lehetőségük az edzések alatt leadott teljesítményváltozás meghatározására.

Vizsgálatunkban feltételeztük, hogy kapcsolat van az izmok első, utolsó edzésnapján forgatónyomaték átlagának különbsége és a rostösszetétel között, ahol szignifikáns negatív kapcsolatot találtunk. Nevezetesen az erőkifejtő képesség helyreállása annál nagyobb volt, minél több gyorsrost volt az izomban. A vizsgálati személyek közül kettő volt képes nagyobb forgatónyomaték átlagot produkálni az utolsó edzésen, mint az első edzésen. Mindketten jelentősen több gyorsroston rendelkeztek vastus laterális izmukban, mint a csoportátlag. Ez az eredményünk megegyezik azzal a korábbi megállapításunkkal, hogy a zömében gyorsrostú izmokban kisebb az erőkifejtő képesség csökkenése annak ellenére, hogy az első három edzésnapon elsősorban a gyorsrostok sérültek meg. Ennek köszönhetően a

regenerálódás is gyorsabban következik be ezekben az izmokban, amely a forgatónyomatékok jelentősebb növekedését hozza magával. Mindazonáltal a gyorsrostok jobb erőkifejtő képesség visszaszerzése összefüggésben lehet az ingerkontrakció kapcsolat helyreállítódásával és korai idegi adaptációval (Hortobágyi et al. 1998, Hortobágyi and DeVita 2000, Hortobágyi et al. 2001, Howatson and van Someren 2007, Warren et al. 2000). Közvetve ez azt is jelentheti, hogy a gyorsrostok sejtmembránja gyorsabban regenerálódhat, mint a lassúrostoké.

#### **6.1.4. Vizsgálat jelentősége és korlátai**

Több tanulmány is van, amely vizsgálta az excentrikus edzés hatását akár az egy ízületes, akár több ízületen átmenő izmok esetén. Széles skálát kapunk a különböző korú ülőmunkát végzők, sportolók és betegek esetében is (Hortobágyi and DeVita 2000, Isner-Horobeti et al. 2013, LaStayo et al. 2003b, Vaczi et al. 2009). Például egy újabb feltételezés szerint az időskori izomgyengeség hátterében az izom összehúzódás hatására kialakuló sérülékenységre való túlzott hajlam állhat, valamint ebből a sérülésből való nehezebb regenerálódás, és valamilyen formában az excentrikus edzés is felelős lehet ezért az izomgyengeségért. (Choi et al. 2012, Hortobágyi 2003, Hortobágyi and DeVita 2000, LaStayo et al. 2003a, LaStayo et al. 2003b).

A bizonyítékok és a tapasztalatok is azt mutatják, hogy a nagyon edzett sportolók beleépítik és előnyben részesítik az edzésprogramjukba az excentrikus gyakorlatokat (Vaczi et al. 2011). Ezen következtetések alapján úgy látjuk, hogy az ismétlődő napokon végzett rövidtávú excentrikus edzések nem okoznak további forgatónyomaték csökkenést és izom mikrosérülést, sőt inkább pozitív adaptációt hoz létre a maximális akaratlagos izomerőben, izom aktivitásban, valamint a myofibrilláris funkciókban (Chen and Hsieh 2001). Továbbá egyénre lehet szabni az edzésprogramot az izomrost összetétel függvényében, hiszen a különböző számú és intenzitású excentrikus, vagy koncentrikus edzésprogram különbözőféleképpen hat a gyors és a lassú izomrostokra, ezáltal az edzésprogramon keresztül változtatható a kiinduló izom rostösszetétel. Jelen tanulmányunk hozzájárul ahhoz, hogy megértsük az idő függvényében a változók közti összefüggést, úgymint az izom mechanikai, biokémiai, fiziológiai karaktereit excentrikus edzés hatására. Jelen tanulmánynak vannak korlátai. A három biopszia vétel korlátozza a minták nagyságát, mintavétel számát. A minta csak egészséges felnőttekre

vonatkozik, nem ad információt a klinikai populációra. További nehézséget okoz szarkoplazmában a pontos fibronektin mennyiség mérése, ami korlátozza az adatok kiértékelését. További korlátokat jelentett, hogy nem tudtuk a II-es rosttípus altípusait meghatározni, így hiányoznak a további még pontosabb elemzések az excentrikus izommunkával kapcsolatban. Azonban úgy tűnik a gyors izomrostok altípusai hasonlóan reagálnak a szokatlan excentrikus edzésre (Magal et al. 2010).

## 6.2. Vibrációs edzéses vizsgálat

Vizsgálatunkban arra kerestük a választ, hogy az egésztest vibrációt követő tíz percen belül kimutatható-e olyan változás a térdfeszítő izom energia metabolizmusában, amely megmagyarázhatja az irodalomban közölt teljesítménynövekedést, vagy éppenséggel magyarázatul szolgálhatna a teljesítmény csökkenésére. Két vibrációs frekvenciát választottunk, 20 és 40 Hz-et. Feltételeztük, hogy a 20 Hz vibrációs frekvencia, amely fizikailag aktív, fiatal embereknél nem elegendő inger a reflexek facilitációjára, ezáltal az erő akut növekedésére, nem fog jelentős változást okozni a nagy energiatartalmú foszfát vegyületek spektrumában. A 40 Hz frekvenciás vibrációs kezeléssel feltételeztük, hogy jelentősebb változásokat eredményez az izom energia metabolizmusában, mivel akut, helyi fáradást idézhet elő.

A vizsgálatban a három csoport, félguggoló helyzetben foglalt helyet a vibrációs platón, amely statikus erő kifejtést jelent és az izmoknak megközelítően a maximális erejük harminc százalékát kellett kifejteni ebben a testhelyzetben. A vibrációban résztvevő két csoport izmainak feszülése a korábbi vizsgálatok eredményeire alapozva feltehetően tovább fokozódik (Bongiovanni et al. 1990, Bosco et al. 1999a, Cardinale and Bosco 2003, Cardinale and Lim 2003, Di Giminiani et al. 2009, 2013), ami többlet energiafelhasználást jelent. Feltételeztük ennek alapján, hogy a vibrációt követő  $^{31}\text{P}$  MR spektroszkópia foszfor vegyületeinek spektrumában is változásokat okoz.

Vizsgálati céljaink megfogalmazásának és a vizsgálati protokoll megtervezésének alapjául a következő ismeretek, elméletek és kutatási eredmények szolgáltak.

A mechanikai vibráció hatásmechanizmusát vizsgáló kutatások a vibráció alatt kiváltott tónusos vibrációs reflexnek tulajdonítják az akut illetve az akut visszamaradó

teljesítményfokozó hatást. A feltételezések szerint a közvetlenül az izomra irányuló vagy az ízületeken keresztül az izmokra irányuló vibráció az izomrostok gyors, rövid megnyújtását eredményezi, amely hasonlatos az excentrikus kontrakció alatti izommegnyújtáshoz, ami az izmok feszülésének növekedésével jár. Az excentrikus kontrakció alatti izomnyújtás okozta feszülés növekedés egyik oka a nyújtási reflex előidézése. Az izomrostok megnyújtásának frekvenciája megismételt excentrikus kontrakciók során azonban sokkal kisebb, mint a vibráció során, és a két izomnyújtás között az izom feszülése csökken. Ezzel szemben a vibrációs vizsgálatokban alkalmazott frekvencia másodpercenként 20-50 Hz között változik, ami 20-50 nyújtást jelent másodpercenként. Ilyen körülmények között az izom a két nyújtás közben nem tud relaxálódni, vagyis tartósan nagy feszülés alatt végez munkát.

A tónusos vibrációs reflex megjelenését, illetve az izom feszülés növekedését a vibrált izmokra helyezett elektródák segítségével bizonyították. Nevezetesen, a vibráció hatására az izmok elektromos aktivitása megnövekedett, nagyobb lett, mint a statikus testhelyzetben az izomfeszülés okozta elektromos aktivitás. A legutóbbi kutatások kimutatták, hogy a vibrációs frekvencia növelésével az izom elektromos aktivitása növekedett, és egyénektől függően a legnagyobb elektromos aktivitást 30-45 Hz alkalmazásakor mérték, amely megközelítette a maximális izometriás kontrakció alatt mért elektromos aktivitás nagyságát. Tehát a 20 Hz vibrációs frekvencia alkalmazásakor az izom feszülése és elektromos aktivitása kisebb, mint 40 Hz frekvenciánál. Következésképpen 40 Hz vibrációs frekvenciát alkalmazva az izom munkavégzése nagyobb, mint 20 Hz-nél ugyanannyi vibrációs időtartam alatt. Éppen ezért feltételezhető volt, hogy a 40 Hz-es vibrációs kezelés nagyobb energiaszükséglettel jár, és ez megmutatkozik az MR spektroszkópiás adatokban is.

Másrészről felvetődött a kérdés, hogy amennyiben energia felhasználással jár a vibráció, akkor a vibrációt követő fizikai teljesítmény milyen módon növekedhet. Erre a kutatók válasza az, hogy a vibráció, leginkább az egésztest vibráció, az idegrendszert stimulálja, amely azt eredményezi, hogy a nagy motoros egységek bekapcsolásának ingerküszöbét csökkenti és ezért a fizikai teljesítmény javul, legalábbis egy ideig a vibrációt követően. A vibrációs kezelést követő akut hatás megközelítően egy órán keresztül fennmarad (Torvinen et al. 2002), ezért feltételezhető volt, hogy az általunk

alkalmazott protokollban a vibráció utáni 11 percben lefolytatott MR spektroszkópiai vizsgálat alatt a változások kimutathatók a térdfeszítő izmok bioenergetikájában is.

Az egésztest vibrációt illetően a kutatások többsége azt mutatta ki, hogy az izmok akaratlagos erő kifejtése, különösen a dinamikus erő kifejtése (Rees et al. 2008, Roelants et al. 2004a, Roelants et al. 2004b) szignifikánsan javult. Az utóbbi időben azonban több kutatásban azt találták, hogy a vibráció nem okozott teljesítményjavulást (Hopkins et al. 2009, McBride et al. 2010), sőt egyes esetekben a teljesítmény szignifikánsan csökkent megközelítőleg ugyanazt a vibrációs terhelést alkalmazva (Cochrane et al. 2008a, Cochrane et al. 2008b, de Ruiter et al. 2003, Raphael et al. 2013). A kutatókban felmerült a kérdés, hogy a teljesítmény csökkenése vajon idegrendszeri vagy izomenergetikai eredetű. Ugyanis a kutatók feltételezték, hogy a változatlan vagy a csökkent fizikai teljesítmény oka a fáradás. A kérdés azonban az, hogy a fáradás centrális vagy lokális eredetű-e.

Jelentős azoknak a vizsgálatoknak a száma, amelyekben az egésztest vibráció hatását vizsgálták a reflex aktivációra. Egyes szerzők azt mutatták ki, hogy a vibráció facilitáló hatással van a nyújtási reflexre (Melnik et al. 2008, Rittweger et al. 2003), amely alátámasztja és megmagyarázza a fizikai teljesítmény akut visszamaradó növekedését (Bogaerts A. et al. 2007, 2009, Bosco et al. 1998, 2000, Bruyere et al. 2005, Cardinale and Lim 2003, Cochrane and Stannard 2005, Delecluse et al. 2003, Rees et al. 2008, Roelants et al. 2004a, 2004b, Tihanyi J. et al. 2010a). Ugyanakkor, az utóbbi időben több kutatás mutatta ki, hogy az egésztest vibráció gátolja a H-reflexet (Armstrong W. J. et al. 2008, Sayenko et al. 2010) és a nyújtási reflexet (Ritzmann et al. 2013, Roll et al. 1980). Következésképpen a teljesítmény csökkenésnek is neurális okai lehetnek elsősorban.

A vibráció izom energia metabolizmusra gyakorolt hatását vizsgáló kutatások száma kevés. Ismereteink szerint Zange et al. (2009) volt eddig az egyetlen, aki  $^{31}\text{P}$  MR spektroszkópiát használva vizsgálta a plantár flexorokra irányított vibráció hatására az izom ATP és PCr felhasználását. A vibráció frekvenciája 20 Hz, az amplitúdó 2 mm volt. A vibráció időtartama három perc volt és az izmok a maximális izometriás erő 40%-nak megfelelő izometriás erőt fejtettek ki a vibráció alatt. A szerzők nem találtak szignifikáns változást az ATP és PCr felhasználásban sem a vibráció alatt, sem azt követően.

### **6.2.1. A statikus guggoló helyzet és a 20 illetve 40 Hz-es vibráció okozta változások**

Az inorganikus foszfát (Pi) spektruma érzékenyen reagált mind a háromszor egyperces guggolás (kontroll csoport), mind a guggoló helyzetben alkalmazott 20 illetve 40 Hz frekvenciájú egésztest vibrációs kezelésre. A statikus félguggolásban az izmok energiát fogyasztanak, amit a Pi spektrum területének 27,5 százalékos csökkenése jelzett. A változás mértéke azonban nem volt szignifikáns. A statikus guggoló helyzetben adott 20 Hz-es vibráció 26,0 százalékos, szignifikáns csökkenést eredményezett a Pi spektrumterületben. A legkisebb változást a 40 Hz frekvenciájú vibrációs kezelés után találtuk (13,5%). A különbség nem volt szignifikáns. A csoportok Pi átlaga nem különbözött szignifikánsan jelezvén, hogy a Pi spektrumterület csökkenése nem tulajdonítható általában vibrációnak és a vibrációs frekvencia nagyságának. Feltételezhetően a csökkenés oka a statikus guggolási helyzetben végzett izommunka és az energia felhasználást nem fokozta sem 20, sem a 40 Hz frekvenciájú egésztest vibráció. Vizsgálati eredményünk azt sugallja, hogy a 20 és 40 Hz frekvenciás vibrációnak az izmok energia metabolizmusára gyakorolt hatása között nincs jelentős különbség annak ellenére, hogy a 20 Hz-es vibrációs kezelés után a Pi százalékos csökkenése kétszerese volt a 40 Hz-es vibráció után mértnek. Amikor a második vibrációs kezelésben a V40-20 csoport 20 Hz egésztest vibrációban részesült a korábbi 40 Hz helyett, akkor a Pi csökkenése 23,5% volt, amely megközelítőleg azonos nagyságú változás, mint amit a V20-40 csoportnál az első vibrációs kezelés után regisztráltunk. Bár a változás mértéke nem szignifikáns, mégis elgondolkodtató az, hogy 20 Hz frekvenciás vibráció után nagyobb a változás a Pi spektrumterületben, mint 40 Hz vibrációs frekvencia esetén. Ennek az érdekes jelenségnek a tanulmányozására érdemesnek látszik újabb vizsgálatokat végezni.

Amikor a két vibrációs csoportot egy csoportba vontuk, a Pi spektrumterület csökkenése szignifikáns volt, de nem különbözött a kontroll csoport (statikus guggoló helyzet) átlagától. Ebből az eredményből levonható az a következtetés, hogy a háromszor egyperces egésztest vibráció nem növelte jelentősen az izmok energia felhasználását sem az alacsony, sem a magas frekvenciát alkalmazva.



Az első vibrációt követő ötperces spektroszkópia után a vizsgálati személyeknek egy percen keresztül maximális izometriás erő kifejtést kellett végezniük, majd ezután öt perces spektroszkópia következett annak megállapítására, hogy a vibrációt követő erő kifejtés után a Pi spektrumterület változik-e a vibráció nélküli alapadatokhoz viszonyítva. Ez a mérés volt a negyedik a sorban. Egyik csoportban sem találtunk szignifikáns változást sem az alapméréshez (2. mérés) sem az első vibráció utáni méréshez viszonyítva. Feltételezhetően az egyperces statikus erő kifejtés nem okozott jelentős változást az izom energia metabolizmusában. Feltételezhető az is, hogy amennyiben lehetőségünk lett volna vizsgálni a foszfátvegyületek spektrumának kinetikáját, akkor pontosabb információt kaphattunk volna az erő kifejtés alatti és utáni változásokról.

Vizsgálatunkban a  $^{31}\text{P}$  MR spektroszkópiát nem a vibráció alatt végeztük, ahogy ezt Zange et al. (2009) tették, hanem a vibrációt követő öt percen belül. Ennek két fő oka volt. Az egyik az, hogy nem rendelkezünk olyan eszközzel, amely lehetővé tette volna a vibrációs eszköz MR készülékbe helyezését. A másik ok pedig az volt, hogy a vibráció akut visszamaradó hatását szándékoztunk vizsgálni, amely magyarázatot adhat a fizikai teljesítmény javulására vagy visszaesésére. A mi eredményeink nem hasonlíthatók össze Zange et al. (2009) eredményével a Pi vonatkozásában, mert a szerzők csak a PCr és az ATP foszfát atom béta pozíciójának spektrumát vizsgálták a vibráció és az erő kifejtések alatt, amely nem mutatott jelentős változást. Ugyanakkor jelentős ATP felhasználást és PCr csökkenést találtak, amikor az artéria elszorításával a vérkeringést blokkolták. Ebből az eredményből arra következtethetünk, hogy a statikus guggoló helyzet és a vibráció nem rontja a vérkeringést, és az izmok normális oxigenizációban részesültek. Feltételezhetően ezért nem csökkent a mi vizsgálatunkban sem a kreatinfoszfát spektrumának területe egyetlen vizsgálati beállításban sem.

A Pi/PCr arány változása jól jellemzi az izmok energia metabolizmusát és tájékoztatást adhat az ATP felhasználás nagyságára. A Pi, mint ahogy korábban láttuk, V20-40 csoportban szignifikánsan csökkent a 20 Hz-vibráció után, de a kreatinfoszfát spektrumának területe változatlan maradt. Ebből következőleg a Pi/PCr arány mindhárom csoportban csökkent az első és a második kezelést követően. Szignifikáns csökkenés azonban csak a második vibrációs kezelés után volt az összevont vibrációs csoportban. Ez az eredményünk is arra enged következtetni, hogy az alkalmazott két

vibrációs frekvencia nem okozott specifikus változást a Pi/PCr arányban. Felvetődik a kérdés, hogy az első vibrációs kezelés után a Pi/PCr arány csökkenése miért nem volt szignifikáns. Eredményünk azt sugallja, hogy a háromszor egyperces vibrációs terhelés nem okozott jelentős energia felhasználást, de a hatszor egyperces vibrációs terhelés már jelentősen igénybe vette az izom energia raktárait. Az is feltételezhető, hogyha tovább folytattuk volna a vibrációs kezelést, akkor a Pi/PCr arány tovább csökkent volna, amely alátámasztaná azokat a feltételezéseket miszerint az izom fáradása is közrejátszhat a vibrációt követő fizikai teljesítmény csökkenésében (de Ruyter et al. 2003, Erskine et al. 2007, Herda et al. 2009). Eredményünk részben alátámasztja Maffiuletti et al. (2013) azt a feltételezését, amely szerint a vibráció utáni teljesítmény visszaesés az izom fáradásának tudható be. Következésképpen a vibráció fizikai teljesítményt növelő vagy csökkentő hatása nem elsősorban az alkalmazott frekvencia nagyságtól, hanem a vibrációs terheléstől függ, aminek csak egyik összetevője a vibrációs frekvencia. Feltehetően a vibráció fizikai teljesítménynövelő hatása az idegrendszeri serkentésnek tulajdonítható, amennyiben nincs izomfáradás. A vibráció utáni teljesítménycsökkenésnek pedig az izom energia metabolizmusában bekövetkezett változás, nevezetesen az izomfáradás az oka. Ez az elképzelés jól egybevághat Maffiuletti et al. (2013) vizsgálati eredményeiből levont következtetéssel, akik az akaratlagos erő kifejtés akut csökkenését figyelték meg annak ellenére, hogy idegrendszeri fáradás nem volt kimutatható.

A csoportok között csak egy esetben találtunk szignifikáns különbséget. Az összes ATP spektrumterület és a PCr aránya az első vibrációs kezelés után a V20-40 és a V40-20 csoportban szignifikánsan alacsonyabb volt, mint a kontroll csoportban, amely feltehetően a vibráció hatására csökkent 9,5 illetve 4,1 százalékot, viszont változatlan maradt a kontroll csoportban. Az arány csökkenése elsősorban az ATP spektrumok csökkenésének tudható be, mivel a PCr spektrum végig nagy stabilitást mutatott. Amennyiben feltételezzük, hogy az ATP spektrumterületek csökkenése az ATP csökkenését jelenti, akkor ez az eredmény az izom fáradására utal. Ahhoz azonban, hogy ezt a következtetést levonhassuk, újabb vizsgálatokra van szükség, amelyben a foszforvegyületek spektrumdinamikáját is vizsgáljuk, és a terhelést követően azonnal elvégezzük, mivel a vegyületek restitúciója viszonylag rövid idő alatt bekövetkezik (Kemp et al. 1992).

### **6.2.2. A vizsgálat limitáló tényezői**

Vizsgálatunkban a vibrációt az MR készüléken kívül végeztük, mivel az egésztest vibráció nem valósítható meg a készülékben, legalábbis a jelenlegi technika ismeretében. Ebből adódóan a vibráció után viszonylag hosszú idő (három perc) telt el a spektroszkópos mérés megkezdéséig. Kemp et al. (1992) szerint a fizikai terhelés alatt bekövetkező változások a foszforvegyületek spektrumában az első 1-2 percen ellentétes irányú változások mennek végbe, azaz az alapértékekre tér vissza a spektrum.

Az izometriás erő kifejtés nagyságát nem állt módunkban mérni, mivel nem rendelkezünk olyan erőmérővel, ami nem mágnesezhető anyagból készült. Ezért a vibráció visszamaradó akut hatását az erő kifejtésre és a fizikai teljesítményre nem tudtuk számszerűleg meghatározni. Az MR készülékben végzett maximális izometriás kontrakció alatt nem tudunk 31P MR spektroszkópiás vizsgálatot végezni, mivel a készülék programja öt perces átlagolt spektrumot számít. Ebből következőleg a foszforvegyületek spektruma az öt perces mérés átlagát jelenti vizsgálatunkban. Célszerű lesz a vizsgálatokat olyan módon is elvégezni a jövőben, amikor a foszforvegyületek spektrumát rövid idejű mérésekkel határozzuk meg, amely lehetővé teszi a spektrumok kinetikai vizsgálatát is Pipinos et al. (2000) vizsgálatához hasonlóan.

## **6.3. Hipotézisek bevalásának vizsgálata**

### **6.3.1. Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat**

Feltételezésünk beigazolódott, miszerint az excentrikus edzés hatására az izomsérülést mutató indirekt markerek jelentős növekedést mutattak, de az átlag és a csúcspontomaték folyamatát nem változtatták meg. Az átlag- és csúcspontomaték a hatodik edzésnapon megközelítette, vagy meg is haladta az első nap mért értékeit annak ellenére, hogy a CK és LDH aktivitás a vérben ekkor volt a legmagasabb.

A CK és LDH aktivitás, ahogy azt feltételeztük is, nem mutatott szignifikáns összefüggést a vizsgálati személyek rostösszetételével.

Az erővisszaesés mértéke és az azt követő erőnövekedés mértéke szignifikáns kapcsolatot mutatott rostösszetétellel. Akinek magasabb volt a lassú rost százalékos aránya, annak jobban visszaesett a csúcspontomatéka a 3. edzésnapig, majd az ezt követő pontomaték emelkedés mértéke kisebb volt. A pontomaték változása és a rostösszetétel közötti összefüggés igazolta hipotézisünket, hogy a nyújtás hatására a nagy, magas ingerküszöbű, de fáradékony motoros egységek rostjai dominánsak az egyes izomkontrakciók alatti feszülés növekedésében.

Azoknál a vizsgálati személyeknél, akiknek kevesebb volt a gyors rostja, a fibronectin festés megerősítette, hogy a gyors rostok sérültek elsősorban a harmadik edzésnapon vett izommintákban, majd a 7. napon a lassú rostokban is megjelent a fibronectin, mert az erő kifejtésből kieső gyorsrostok helyét a lassú rostok veszik át az edzés folyamatában és ezek a rostok is szerkezeti változáson mentek keresztül.

### **6.3.2. Vibrációs edzéses vizsgálat**

Feltételezésünk, miszerint a 20 Hz-es vibrációs edzés hatására nem lesz jelentős változás az izom energia metabolismusában, nem igazolódott be. A Pi értéke a V20-40 vibrációs csoportban a 20 Hz-es vibrációt követően szignifikánsan csökkent, míg a kontroll és V40-20 csoportban a változás nem volt jelentős.

Második hipotézisünk, miszerint a 40 Hz frekvenciás vibráció nagyobb ATP felhasználást igényel, mint a 20 Hz-es és ezért az összes ATP/PCr arány csökkenni fog, nem igazolódott. Ugyanakkor a két vibrációs csoportot összevonva szignifikáns különbséget találtunk a kontroll csoporttal összehasonlítva, amely arra enged következtetni, hogy az egésztest vibrációnak van visszamaradó akut hatása az ATP spektrumra.

Feltételezésünk, miszerint a vibrációs edzések hatására a nagy energiatartalmú foszfát vegyületekben jelentős változás áll be, részben igazolódott. Az összevont vibrációs csoportban szignifikánsan csökkent a Pi területe, valamint a Pi/PCr aránya. Azonban a PCr nagy stabilitást mutatott a vizsgálatok során, Az ATP foszfát atom gamma, alfa, béta atomjának spektrum területében, valamint az összes területben sem volt statisztikailag szignifikáns változás.

## **7. Következtetések**

### **7.1. Hat napos excentrikus edzéses vizsgálat**

A 90 ismétléses (6x15) maximális erőkifejtésű 120°/s sebességű, 120°-os térdízületi szögterületben végzett excentrikus edzés hatására a forgatónyomaték 39%-kal csökkent, és az izom mikrosérülését mutathatja a 70-szeres CK és 3-szoros LDH aktivitásnövekedés a vérben. A vizsgálati személyek az ezt követő öt egymás utáni napon is naponta további 90-90 excentrikus edzést végeztek. A további edzések után a 6. napon a maximális forgatónyomaték visszatért a kiinduló szintre, hasonlóak voltak az eredmények, mint az első edzésnapon, azonban a CK aktivitás a vérben továbbra is a kiinduló érték több mint 70-szerese volt. Ellentétben a CK és LDH adatokkal, az izom mikrosérülését jelző fibronectin az edzések utáni napon (N7) festődött a legintenzívebben.

Vizsgálati eredményeink alátámasztották a korábbi vizsgálati eredményeket, mely szerint a gyors izomrostok érzékenyebben reagálnak az izomnyújtásra excentrikus edzések során.

Vizsgálati eredményeink bizonyították, hogy az egymást követő excentrikus edzések alatt az izom regenerációja megkezdődik és a kontraktilis struktúra, szarkoplazma helyreállítódása nem gátolt. Úgy tűnik, hogy a gyors izomrostok regenerációja megelőzi a lassú izomrostok regenerációját.

A fibronectin felszaporodás a szarkoplazmában a hetedik napon megerősíti, hogy a fibronectin részt vesz a kontraktilis fehérje állomány regenerációjában.

Vizsgálati eredményeink elsőként mutatták be, hogy az izomnyújtás okozta mikrosérülések (izomláz) kialakulása izom rostösszetétel függő. Nevezetesen, a zömében gyorsrostokból felépülő izmokban a regenerálódás nagyobb ütemben folyik, mint a zömében lassú izomrostokat tartalmazó izmokban.

A vizsgálati eredményekből levonható az a következtetés, hogy a nagy százalékban gyorsrostokból felépülő izmok esetében az excentrikus edzés több, egymást követő napon alkalmazható, míg a zömében lassú izomrostokból felépülő izmok esetében a három napon túli excentrikus edzés már nem csak a gyors, de a lassú rostokra is hat, amely a robbanékonyerő fejlesztése szempontjából káros hatású lehet.

## **7.2. Vibrációs edzéses vizsgálat**

Ismereteink szerint vizsgálatunk az első, amely annak a kérdésnek a megválaszolását tűzte ki célul, hogy vajon az egésztest vibráció hatására létrejövő akut visszamaradó erő és fizikai teljesítménynövekedésnek vagy csökkenésnek milyen izom energia metabolikus háttere van. A vizsgálat korábban felsorolt korlátait is figyelembe véve, az alábbi óvatos következtetések vonhatók le az eredményekből.

Az alacsony frekvenciájú (20 Hz) vibráció jelentősebb hatást vált ki az energia metabolizmusba, mint a 40 Hz frekvenciájú vibrációs edzés. Amennyiben ez a változás a foszfátvegyületek spektrumában az izom fáradását jelzi, akkor a feltételezésünkkel ellentétben, a 20 Hz-es vibráció előnytelen az erőnövekedés akut visszamaradó hatását illetően, míg a magas (40 Hz) vibráció előnyösebb ebből a szempontból.

A statikus izommunkával összekapcsolt vibráció nem növeli a nagy energia tartalmú foszforvegyületek spektrális változását.

Vizsgálati eredményeink arra mutatnak rá, hogy az izom energia metabolizmusába bekövetkező változások, amelyek az izom fáradását jelezhetik, elsősorban nem vibrációs frekvenciafüggők, hanem vibrációs terhelésfüggők. Nevezetesen a vibrációs frekvencia, a rezgéshullámok amplitúdója, az egyszeri vibráció időtartama és az összes vibrációs idő együttesen befolyásolja az izmok energia metabolikus válaszát.

Gyakorlati szempontból ki kell hangsúlyozni, hogy amennyiben a vibrációt követően az izomerő csökken, a hatás nem tekinthető negatívnak a krónikus adaptációt tekintve. Következésképpen a vibráció okozta teljesítmény csökkenés, amennyiben izomfáradás eredetű, stimuláló hatással bírhat a hosszú távú erőnövekedésre.

## 8. Összefoglalás

Első vizsgálatunkban a hatnapos excentrikus edzés hatását vizsgáltuk az izomláz indirekt (izomfájdalom, CK és LDH koncentráció) és direkt (fibronektin) mutatóira, valamint az edzések alatt kifejtett forgatónyomaték változására. Minden nap 6x15 izomnyújtást végeztünk a nem domináns oldali térdfesztítő izmokon 120°-os mozgásterjedelemmel. Izombiopsziás mintát vettünk a vastus laterális izomból az edzések megkezdése előtt, a harmadik edzésnapon és az edzés befejezése utáni napon. A metszeteket immunhisztokémiai eljárással festettük, amely alapján meghatároztuk a lassú és gyorsrostok százalékos arányát, valamint a fibronektin antitestek megjelenését a rostok szarkoplazmájában. Az izomfájdalom a harmadik napig növekedett, majd a hatodik napra megszűnt. A CK és LDH koncentráció a vérben a harmadik napon érte el a maximális értéket és a hatodik napon is hasonló értékeket mértünk. A forgatónyomaték szignifikánsan csökkent az első három napon, majd szignifikánsan növekedett a harmadik nap után. Fibronektin a harmadik edzésnapon a lassú izmok gyors rostjaiban volt kimutatható. A hetedik napon a lassú izmok lassú rostjaiban és a gyors izmok gyorsrostjaiban is megjelent a fibronektin. A forgatónyomaték csökkenése jelentősebb volt a lassú izmokban és a regeneráció is lassabb ütemű volt ezekben az izmokban.

Második vizsgálatunkban a 20 és 40 Hz egésztest vibrációs frekvencia hatását vizsgáltuk a vastus laterális izom bioenergetikájára. Az egyik vibrációs csoport 3x 1 perces és 20 Hz-es (V20-40), a másik csoport 3x1 perces és 40 Hz-es vibrációban részesült félguggolási helyzetben. A második vibrációs intervencióban a csoportok vibrációs frekvenciája megcserélődött. A kontroll csoport hasonló helyzetben állt a vibrációs eszközön vibráció nélkül. A vibráció előtt és a vibrációt követően <sup>31</sup>P MR spektroszkópiát végeztünk. A kreatinfoszfát (PCr) és az ATP spektrumterületek egyik esetben sem változtak szignifikánsan. A szervetlen foszfát (Pi) csak a V20-40 csoportban, illetve az összevont vibrációs csoportban csökkent szignifikánsan az első vibrációs intervenció után. Ezzel összefüggésben a Pi/PCr arány is szignifikánsan csökkent. Ugyanakkor nem találtunk szignifikáns különbséget a három csoport között egyik spektroszkópiás mutatóban sem. Eredményeink arra engednek következtetni, hogy az általunk alkalmazott vibrációs kezelés (időtartam és frekvencia) nincs jelentős hatással a térdfesztítő izmok bioenergetikájára.



## 8.1. Summary

In the first experiment we studied the effect of eccentric exercise of knee extensors carried out during six consecutive days on the indirect (muscle soreness, serum CK and LDH) and direct (fibronectin) markers of DOMS and the alteration of torque production during each training session. Subjects with different fiber distribution performed 6x15 isokinetic eccentric contractions with maximum effort in 120° range of motion in each day. Fiber distribution and appearance of fibronectin was determined in cross-sections of muscle biopsy samples of the vastus lateralis muscle using immunohistochemistry.

Muscle pain was the most severe on the third day and disappeared on the last day. CK and LDH concentration in the serum was the greatest on the third day and remained unchanged on the following days. Torque of the knee extensors decreased significantly during the first three days then increased during the last three days. Significant relationship was found between fiber distribution and decrease and increase of torque. The correlation and fibronectin staining indicated that mostly fast fibers were susceptible for muscle stretch induced fibre damage in the muscles with slow fibre dominance.

In the second experiment 20 and 40 Hz whole body vibration (WBV) was applied to study the influence of mechanical vibration on muscle bioenergetics. Two sessions of WBV was carried out in semi-squat position (3x1 minute with 1 minute rest between). Before and after vibration <sup>31</sup>P MR spectroscopy was done and inorganic phosphate (Pi), PCr,  $\alpha,\beta,\gamma$ ATP spectra areas were determined. 20 Hz (3x1min) and combined 20-40 Hz WBV resulted in significant reduction in Pi and Pi/PCr. However, no significant differences were found between the three groups (V20-40, V40-20 and control group). The results indicate that WBV applied in this study did not influence significantly energy metabolism of the skeletal muscles. Consequently, the acute residual increase or decrease in physical performance published in the literature cannot be attributed to mechanical vibration.

## ***9. Irodalomjegyzék***

Allen JD, Mattacola CG, Perrin DH. (1999) Effect of microcurrent stimulation on delayed-onset muscle soreness: A double-blind comparison. *J Athl Train* 34: 334-337.

Armstrong RB. (1990) Initial events in exercise-induced muscular injury. *Med Sci Sports Exerc* 22: 429-435.

Armstrong RB, Ogilvie RW, Schwane JA. (1983) Eccentric exercise-induced injury to rat skeletal muscle. *J Appl Physiol* 54: 80-93.

Armstrong RB, Warren GL, Warren JA. (1991) Mechanisms of exercise-induced muscle-fiber injury. *Sports Med* 12: 184-207.

Armstrong WJ, Nestle HN, Grinnell DC, Cole LD, Van Gilder EL, Warren GS, Capizzi EA. (2008) The acute effect of whole-body vibration on the hoffmann reflex. *J Strength Cond Res* 22: 471-476.

Barker AR, Welsman JR, Fulford J, Welford D, Armstrong N. (2008) Muscle phosphocreatine kinetics in children and adults at the onset and offset of moderate-intensity exercise. *J Appl Physiol* 105: 446-456.

Bazett-Jones DM, Finch HW, Dugan EL. (2008) Comparing the effects of various whole-body vibration accelerations on counter-movement jump performance. *J Sports Sci Med* 7: 144-150.

Bergstrom J. (1975) Percutaneous needle biopsy of skeletal muscle in physiological and clinical research. *Scand J Clin Lab Invest* 35: 609-616.

Biewener AA, Konieczynski DD, Baudinette RV. (1998) In vivo muscle force-length behavior during steady-speed hopping in tammar wallabies. *J Exp Biol* 201: 1681-1694.

Bogaerts A, Verschueren S, Delecluse C, Claessens AL, Boonen S. (2007) Effects of whole body vibration training on postural control in older individuals: a 1 year randomized controlled trial. *Gait Post* 26: 309-316.

Bogaerts AC, Delecluse C, Claessens AL, Troosters T, Boonen S, Verschueren SM. (2009) Effects of whole body vibration training on cardiorespiratory fitness and muscle strength in older individuals (a 1-year randomised controlled trial). *Age Ageing* 38: 448-454.

Bongiovanni LG, Hagbarth KE. (1990) Tonic vibration reflexes elicited during fatigue from maximal voluntary contractions in man. *J Physiol* 423: 1-14.

Bongiovanni LG, Hagbarth KF, Stjernberg L. (1990) Prolonged muscle vibration reducing motor output in maximal voluntary contractions in man. *J Physiol-London* 423: 15-26.

Bosco C, Cardinale M, Tsarpela O. (1999a) Influence of vibration on mechanical power and electromyogram activity in human arm flexor muscles. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 79: 306-311.

Bosco C, Cardinale M, Tsarpela O, Colli R, Tihanyi J, von Duvillard SP, Viru A. (1998) The influence of whole body vibration on jumping performance. *Biol Sport* 15: 157-164.

Bosco C, Colli R, Intorini E, Cardinale M, Tsarpela O, Madella A, Tihanyi J, Viru A. (1999b) Adaptive responses of human skeletal muscle to vibration exposure. *Clin Physiol* 19: 183-187.

Bosco C, Tihanyi J, Rivalta L, Parlato G, Tranquilli C, Pulvirenti G, Foti C, Viru M, Viru A. (1996) Hormonal responses in strenuous jumping effort. *Jpn J Physiol* 46: 93-98.

Bosco C, Iacovelli M, Tsarpela O, Cardinale M, Bonifazi M, Tihanyi J, Viru M, De Lorenzo A, Viru A. (2000) Hormonal responses to whole body vibration in men. *Eur J Appl Physiol* 81: 449-454.

Bowers EJ, Morgan DL, Proske U. (2004) Damage to the human quadriceps muscle from eccentric exercise and the training effect. *J Sports Sci* 22: 1005-1014.

Brockett CL, Morgan DL, Gregory JE, Proske U. (2002) Damage to different motor units from active lengthening of the medial gastrocnemius muscle of the cat. *J Appl Physiol* (1985) 92: 1104-1110.

Brown SJ, Child RB, Day SH, Donnelly AE. (1997) Indices of skeletal muscle damage and connective tissue breakdown following eccentric muscle contractions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 75: 369-374.

Bruyere O, Wuidart MA, Di Palma E, Gourlay M, Ethgen O, Richy F, Reginster JY. (2005) Controlled whole body vibration to decrease fall risk and improve health-related quality of life of nursing home residents. *Arch Phys Med Rehabil* 86: 303-307.

Butterfield DL, Draper DO, Ricard MD, Myrer JW, Durrant E, Schulthies SS. (1997) The effects of high-volt pulsed current electrical stimulation on delayed onset muscle soreness. *J Athl Train* 32: 15-20.

Byrd SK. (1992) Alterations in the sarcoplasmic-reticulum - a possible link to exercise-induced muscle damage. *Med Sci Sports Exerc* 24: 531-536.

Cardinale M, Bosco C. (2003) The use of vibration as an exercise intervention. *Exerc Sport Sci Rev* 31: 3-7.

Cardinale M, Lim J. (2003) Electromyography activity of vastus lateralis muscle during whole-body vibrations of different frequencies. *J Strength Cond Res* 17: 621-624.

Cardinale M, Ferrari M, Quaresima V. (2007) Gastrocnemius medialis and vastus lateralis oxygenation during whole-body vibration exercise. *Med Sci Sports Exerc* 39: 694-700.

Cardinale M, Leiper J, Erskine J, Milroy M, Bell S. (2006) The acute effects of different whole body vibration amplitudes on the endocrine system of young healthy men: a preliminary study. *Clin Physiol Funct Imaging* 26: 380-384.

Cardinale M, Soiza RL, Leiper JB, Gibson A, Primrose WR. (2010) Hormonal responses to a single session of wholebody vibration exercise in older individuals. *Br J Sports Med* 44: 284-288.

Carlsson L, Thornell LE. (2001) Desmin-related myopathies in mice and man. *Acta Physiol Scand* 171: 341-348.

Cermak NM, Snijders T, McKay BR, Parise G, Verdijk LB, Tarnopolsky MA, Gibala MJ, Van Loon LJ. (2013) Eccentric exercise increases satellite cell content in type II muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc* 45: 230-237.

Chen TC. (2003) Effects of a second bout of maximal eccentric exercise on muscle damage and electromyographic activity. *Eur J Appl Physiol* 89: 115-121.

Chen TC, Hsieh SS. (2000) The effects of repeated maximal voluntary isokinetic eccentric exercise on recovery from muscle damage. *Res Q Exerc Sport* 71: 260-266.

Chen TC, Hsieh SS. (2001) Effects of a 7-day eccentric training period on muscle damage and inflammation. *Med Sci Sports Exerc* 33: 1732-1738.

Chen TC, Nosaka K. (2006) Effects of number of eccentric muscle actions on first and second bouts of eccentric exercise of the elbow flexors. *J Sci Med Sport* 9: 57-66.

Cheung K, Hume PA, Maxwell L. (2003) Delayed onset muscle soreness - Treatment strategies and performance factors. *Sports Med* 33: 145-164.

Chleboun GS, Howell JN, Conatser RR, Giesey JJ. (1998) Relationship between muscle swelling and stiffness after eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc* 30: 529-535.

Choi SJ, Lim JY, Nibaldi EG, Phillips EM, Frontera WR, Fielding RA, Widrick JJ. (2012) Eccentric contraction-induced injury to type I, IIa, and IIa/IIx muscle fibers of elderly adults. *Age (Dordr)* 34: 215-226.

Clarkson PM, Tremblay I. (1988a) Exercise-induced muscle damage, repair, and adaptation in humans. *J Appl Physiol* 65: 1-6.

Clarkson PM, Tremblay I. (1988b) Exercise-induced muscle damage, repair, and adaptation in humans. *J Appl Physiol* 65: 1-6.

Clarkson PM, Nosaka K, Braun B. (1992) Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation. *Med Sci Sports Exerc* 24: 512-520.

Clarkson PM, Byrnes WC, McCormick KM, Turcotte LP, White JS. (1986) Muscle soreness and serum creatine-kinase activity following isometric, eccentric, and concentric exercise. *Int J Sports Med* 7: 152-155.

Close GL, Ashton T, Cable T, Doran D, Holloway C, McArdle F, MacLaren DP. (2006) Ascorbic acid supplementation does not attenuate post-exercise muscle soreness following muscle-damaging exercise but may delay the recovery process. *Br J Nutr* 95: 976-981.

Cochrane DJ, Stannard SR. (2005) Acute whole body vibration training increases vertical jump and flexibility performance in elite female field hockey players. *Br J Sports Med* 39: 860-865.

Cochrane DJ, Legg SJ, Hooker MJ. (2004) The short-term effect of whole-body vibration training on vertical jump, sprint, and agility performance. *J Strength Cond Res* 18: 828-832.

Cochrane DJ, Stannard SR, Walmsely A, Firth EC. (2008a) The acute effect of vibration exercise on concentric muscular characteristics. *J Sci Med Sport* 11: 527-534.

Cochrane DJ, Sartor F, Winwood K, Stannard SR, Narici MV, Rittweger J. (2008b) A comparison of the physiologic effects of acute whole-body vibration exercise in young and older people. *Arch Phys Med Rehabil* 89: 815-821.

Connolly DAJ, Sayers SP, McHugh MP. (2003) Treatment and prevention of delayed onset muscle soreness. *J Strength Cond Res* 17: 197-208.

Cormie P, Deane RS, Triplett NT, McBride JM. (2006) Acute effects of whole-body vibration on muscle activity, strength, and power. *J Strength Cond Res* 20: 257-261.

Corpas E, Harman SM, Blackman MR. (1993) Human growth hormone and human aging. *Endocr Rev* 14: 20-39.

Costa A, Dalloul H, Hegyesi H, Apor P, Csende Z, Racz L, Vaczi M, Tihanyi J. (2007) Impact of repeated bouts of eccentric exercise on myogenic gene expression. *Eur J Appl Physiol* 101: 427-436.

Costa A, Orosz Z, Apor P, Csaba N, Siamilis S, Csende Z, Racz L, Tihanyi J. (2009) Impact of repeated bouts of eccentric exercise on sarcolemma disruption in human skeletal muscle. *Acta Physiol Hung* 96: 189-202.

Craig JA, Bradley J, Walsh DM, Baxter GD, Allen JM. (1999) Delayed onset muscle soreness: Lack of effect of therapeutic ultrasound in humans. *Arch Phys Med Rehabil* 80: 318-323.

Crenshaw AG, Friden J, Hargens AR, Lang GH, Thornell LE. (1993) Increased technetium uptake is not equivalent to muscle necrosis: scintigraphic, morphological and intramuscular pressure analyses of sore muscles after exercise. *Acta Physiol Scand* 148: 187-198.

Crewther B, Keogh J, Cronin J, Cook C. (2006) Possible stimuli for strength and power adaptation - Acute hormonal responses. *Sports Med* 36: 215-238.

de Ruyter CJ, van der Linden RM, van der Zijden MJ, Hollander AP, de Haan A. (2003) Short-term effects of whole-body vibration on maximal voluntary isometric knee extensor force and rate of force rise. *Eur J Appl Physiol* 88: 472-475.

Delecluse C, Roelants M, Verschueren S. (2003) Strength increase after whole-body vibration compared with resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 35: 1033-1041.

Di Giminiani R, Tihanyi J, Safar S, Scrimaglio R. (2009) The effects of vibration on explosive and reactive strength when applying individualized vibration frequencies. *J Sports Sci* 27: 169-177.

Di Giminiani R, Masedu F, Tihanyi J, Scrimaglio R, Valenti M. (2013) The interaction between body position and vibration frequency on acute response to whole body vibration. *J Electromyogr Kinesiol* 23: 245-251.

Di Loreto C, et al. (2004) Effects of whole-body vibration exercise on the endocrine system of healthy men. *J Endocrinol Investig* 27: 323-327.

Dibble LE, Hale T, Marcus RL, Gerber JP, Lastayo PC. (2006) The safety and feasibility of high-force eccentric resistance exercise in persons with Parkinson's disease. *Arch Phys Med Rehabil* 87: 1280-1282.

Duchateau J, Baudry S. (2013) Insights into the neural control of eccentric contractions. *J Appl Physiol* (1985).

Dudley GA, Tesch PA, Harris RT, Golden CL, Buchanan P. (1991) Influence of eccentric actions on the metabolic cost of resistance exercise. *Aviat Space Environ Med* 62: 678-682.



Ebbeling CB, Clarkson PM. (1989) Exercise-induced muscle damage and adaptation. *Sports Med* 7: 207-234.

Edman KA. (1999) The force bearing capacity of frog muscle fibres during stretch: its relation to sarcomere length and fibre width. *J Physiol* 519 Pt 2: 515-526.

Eisenberg BR. (2010) Quantitative Ultrastructure of Mammalian Skeletal Muscle. *Comprehensive Physiology*, vol. Supplement 27: sect. 10, chapt. 3, p. 73–112 *Handbook of Physiology, Skeletal Muscle*. First published in print 1983. doi: 10.1002/cphy.cp100103 John Wiley & Sons, Inc.

Engardt M, Knutsson E, Jonsson M, Sternhag M. (1995) Dynamic muscle strength training in stroke patients: effects on knee extension torque, electromyographic activity, and motor function. *Arch Phys Med Rehabil* 76: 419-425.

Ernst E. (1998) Does post-exercise massage treatment reduce delayed onset muscle soreness? A systematic review. *Br J Sports Med* 32: 212-214.

Erschine J, Smillie I, Leiper J, Ball D, Cardinale M. (2007) Neuromuscular and hormonal responses to a single session of whole body vibration exercise in healthy young men. *Clin Physiol and Functional Imaging* 27: 242-248.

Eston RG, Finney S, Baker S, Baltzopoulos V. (1996) Muscle tenderness and peak torque changes after downhill running following a prior bout of isokinetic eccentric exercise. *J Sports Sci* 14: 291-299.

Evans WJ. (1991) Muscle damage: nutritional considerations. *Int J Sport Nutr* 1: 214-224.

Evans WJ, Cannon JG. (1991) The metabolic effects of exercise-induced muscle damage. *Exerc Sport Sci Rev* 19: 99-125.

Evans WJ, Phinney SD, Young VR. (1982) Suction applied to a muscle biopsy maximizes sample size. *Med Sci Sports Exerc* 14: 101-102.

Faulkner JA, Opitck JA, Brooks SV. (1992) Injury to skeletal-muscle during altitude training - induction and prevention. *Int J Sports Med* 13: S160-S162.

Ferry A, Amiridis I, Rieu M. (1992) Glycogen depletion and resynthesis in the rat after downhill running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 64: 32-35.

Foley JM, Jayaraman RC, Prior BM, Pivarnik JM, Meyer RA. (1999) MR measurements of muscle damage and adaptation after eccentric exercise. *J Appl Physiol* 87: 2311-2318.

Friden J, Lieber RL. (1998) Segmental muscle fiber lesions after repetitive eccentric contractions. *Cell and Tissue Research* 293: 165-171.

Friden J, Lieber RL. 1998. (2001) Eccentric exercise-induced injuries to contractile and cytoskeletal muscle fibre components. *Acta Physiol Scand* 171: 321-326.

Friden J, Sjostrom M, Ekblom B. (1981) A morphological-study of delayed muscle soreness. *Experientia* 37: 506-507.

Friden J, Sjostrom M, Ekblom B. (1983) Myofibrillar damage following intense eccentric exercise in man. *Int J Sports Med* 4: 170-176.

Friedmann B, Kinscherf R, Vorwald S, Muller H, Kucera K, Borisch S, Richter G, Bartsch P, Billeter R. (2004) Muscular adaptations to computer-guided strength training with eccentric overload. *Acta Physiol Scand* 182: 77-88.

Giannesini B, Izquierdo M, Le Fur Y, Cozzone P, Fingerle J, Himber J, Künnecke B, Von Kienlin M, Bendahan D. (2005) New experimental setup for studying strictly noninvasively skeletal muscle function in rat using <sup>1</sup>H-magnetic resonance (MR) imaging and <sup>31</sup>P-MR spectroscopy. *Magn Reson Med* 54: 1058 - 1064.

Gibala MJ, Macdougall JD, Tarnopolsky MA, Stauber WT, Elorriaga A. (1995) Changes in human skeletal-muscle ultrastructure and force production after acute resistance exercise. *J Appl Physiol* 78: 702-708.

Giunta M, Rigamonti AE, Agosti F, Patrizi A, Compri E, Cardinale M, Sartorio A. (2013) Combination of External Load and Whole Body Vibration Potentiates the GH-releasing Effect of Squatting in Healthy Females. *Horm Metab Res* 45: 611-616.

Gordon AM, Ridgway EB. (1993) Cross-bridges affect both TnC structure and calcium affinity in muscle fibers. *Adv Exp Med Biol* 332: 183-192; discussion 192-184.

Goto K, Takamatsu K. (2005) Hormone and lipolytic responses to whole body vibration in young men. *Jpn J Physiol* 55: 279-284.

Gregory CM, Bickel CS. (2005) Recruitment patterns in human skeletal muscle during electrical stimulation. *Phys Ther* 85: 358-364.

Griffiths RI. (1991) Shortening of muscle-fibers during stretch of the active cat medial gastrocnemius-muscle - the role of tendon compliance. *J Physiol-London* 436: 219-236.

Gyulai G, Racz L, Di Giminiani R, Tihanyi J. (2013) Effect of whole body vibration applied on upper extremity muscles. *Acta Physiol Hung* 100: 37-47.

Haddad F, Adams GR. (2002) Exercise effects on muscle insulin signaling and action - Selected contribution: Acute cellular and molecular responses to resistance exercise. *J Appl Physiol* 93: 394-403.

Hagbarth K, Burke D, Wallin G, Lofstedt L. (1976) Single unit spindle responses to muscle vibration in man. *Prog Brain Res* 44: 281-289.

Hanke N, Kubis HP, Scheibe RJ, Berthold-Losleben M, Husing O, Meissner JD, Gros G. (2010) Passive mechanical forces upregulate the fast myosin heavy chain IId/x via

integrin and p38 MAP kinase activation in a primary muscle cell culture. *Am J Physiol Cell Physiol* 298: C910-920.

Henneman E, Somjen G, Carpenter DO. (1965) Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol* 28: 560-580.

Herda TJ, Ryan ED, Smith AE, Walter AA, Bembien MG, Stout JR, Cramer JT. (2009) Acute effects of passive stretching vs vibration on the neuromuscular function of the plantar flexors. *Scand J Med Sci Sports* 19: 703-713.

Hilbert JE, Sforzo GA, Swensen T. (2003) The effects of massage on delayed onset muscle soreness. *Br J Sports Med* 37: 72-75.

Hill AV. (1938) The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B - Biological Sciences* 126: 136-195.

Hody S, Lacrosse Z, Leprince P, Collodoro M, Croisier JL, Rogister B. (2013) Effects of Eccentrically and Concentrically Biased Training on Mouse Muscle Phenotype. *Med Sci Sports Exerc* doi: 10.1249/MSS.0b013e3182894a33.

Holmbom B. (1997) Plasma Fibronectin as a Morphological Marker of Irreversible Cardiomyocyte Injury: An Enzyme histochemical, Immunohistochemical and Ultrastructural Study: Univ.

Hopkins JT, Fredericks D, Guyon PW, Parker S, Gage M, Feland JB, Hunter I. (2009) Whole body vibration does not potentiate the stretch reflex. *Int J Sports Med* 30: 124-129.

Horowitz R. (1992) Passive force generation and titin isoforms in mammalian skeletal-muscle. *Biophys J* 61: 392-398.

Hortobagyi T, DeVita P. (2000) Favorable neuromuscular and cardiovascular responses to 7 days of exercise with an eccentric overload in elderly women. *Journals of Gerontology Series a- Biological Sciences and Medical Sciences* 55: B401-B410.

Hortobagyi T, Devita P, Money J, Barrier J. (2001) Effects of standard and eccentric overload strength training in young women. *Med Sci Sports Exerc* 33: 1206-1212.

Hortobagyi T, Hill JP, Houmard JA, Fraser DD, Lambert NJ, Israel RG. (1996a) Adaptive responses to muscle lengthening and shortening in humans. *J Appl Physiol* 80: 765-772.

Hortobagyi T, Houmard J, Fraser D, Dudek R, Lambert J, Tracy J. (1998) Normal forces and myofibrillar disruption after repeated eccentric exercise. *J Appl Physiol* 84: 492-498.

Hortobagyi T, Barrier J, Beard D, Braspeninx J, Koens P, Devita P, Dempsey L, Lambert J. (1996b) Greater initial adaptations to submaximal muscle lengthening than maximal shortening. *J Appl Physiol* 81: 1677-1682.

Hortobágyi T. (2003) The positives of negatives. *J Gerontol A Med Sci* 58: M417-418.

Hortobágyi T, DeVita P. (2000) Favorable neuromuscular and cardiovascular responses to 7 days of exercise with an eccentric overload in elderly women. *J Gerontol* 55: B401-B410.

Hortobágyi T, DeVita P, Money J, Barrier J. (2001) Effects of standard and eccentric overload resistive exercise training in young women. *Med Sci Sports Exerc* 33: 1206-1212.

Hough T. (1900) Ergographic studies in muscular fatigue and soreness. *J Boston Soc Med Sci* 5: 81-92.

Howatson G, Van Someren KA. (2003) Ice massage - Effects on exercise-induced muscle damage. *J Sports Med Phys Fitness* 43: 500-505.

Howatson G, Van Someren KA. (2007) Evidence of a contralateral repeated bout effect after maximal eccentric contractions. *Eur J Appl Physiol* 101: 207-214.

Howell JN, Chleboun G, Conatser R. (1993) Muscle-stiffness, strength loss, swelling and soreness following exercise-induced injury in humans. *J Physiol-London* 464: 183-196.

Howell JN, Fuglevand AJ, Walsh ML, Biglandritch B. (1995) Motor unit-activity during isometric and concentric-eccentric contractions of the human first dorsal interosseus muscle. *J Neurophysiol* 74: 901-904.

Huxley AF, Niedergerke R. (1954) Structural changes in muscle during contraction; interference microscopy of living muscle fibres. *Nature* 173: 971-973.

Huxley H, Hanson J. (1954) Changes in the cross-striations of muscle during contraction and stretch and their structural interpretation. *Nature* 173: 973-976.

Isabell WK, Durrant E, Myrer W, Anderson S. (1992) The effects of ice massage, ice massage with exercise, and exercise on the prevention and treatment of delayed onset muscle soreness. *J Athl Train* 27: 208-217.

Isner-Horobeti ME, Dufour SP, Vautravers P, Geny B, Coudeyre E, Richard R. (2013) Eccentric exercise training: modalities, applications and perspectives. *Sports Med* 43: 483-512.

Issurin VB. (2005) Vibrations and their applications in sport. A review. *J Sports Med Phys Fitness* 45: 324-336.

Issurin VB, Tenenbaum G. (1999) Acute and residual effects of vibratory stimulation on explosive strength in elite and amateur athletes. *J Sports Sci* 17: 177-182.

Issurin VB, Liebermann DG, Tenenbaum G. (1994) Effect of vibratory stimulation training on maximal force and flexibility. *J Sports Sci* 12: 561-566.

Jeon H-S, Kang S-Y, Park J-H, Lee H-S. (2014) Effects of pulsed electromagnetic field therapy on delayed-onset muscle soreness in biceps brachii. *Phys Ther Sport* In Press, Accepted Manuscript.

Jones DA, Newham DJ, Clarkson PM. (1987) Skeletal-muscle stiffness and pain following eccentric exercise of the elbow flexors. *Pain* 30: 233-242.

Jones DA, Newham DJ, Round JM, Tolfree SE. (1986) Experimental human muscle damage: morphological changes in relation to other indices of damage. *J Physiol* 375: 435-448.

Joulia D, Bernardi H, Garandel V, Rabenoelina F, Vernus B, Cabello G. (2003) Mechanisms involved in the inhibition of myoblast proliferation and differentiation by myostatin. *Exp Cell Res* 286: 263-275.

Katz B. (1939) The relation between force and speed in muscular contraction. *J Physiol* 96: 45-64.

Kemp GJ, Taylor DJ, Radda GK, Rajagopalan B. (1992) Bio-energetic changes in human gastrocnemius muscle 1-2 days after strenuous exercise. *Acta Physiol Scand* 146: 11-14.

Kerschan-Schindl K, Grampp S, Henk C, Resch H, Preisinger E, Fialka-Moser V, Imhof H. (2001) Whole-body vibration exercise leads to alterations in muscle blood volume. *Clin Physiol* 21: 377-382.

Kirwan JP, Clarkson PM, Graves JE, Litchfield PL, Byrnes WC. (1986) Levels of serum creatine kinase and myoglobin in women after two isometric exercise conditions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 55: 330-333.

Koh TJ, Escobedo J. (2004) Cytoskeletal disruption and small heat shock protein translocation immediately after lengthening contractions. *Am J Physiol Cell Physiology* 286: C713-C722.

Komi PV, Buskirk ER. (1972) Effect of eccentric and concentric muscle conditioning on tension and electrical activity of human muscle. *Ergonomics* 15: 417-434.

Kraemer WJ, Ratamess NA. (2005) Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Med* 35: 339-361.

Kvorning T, Bagger M, Caserotti P, Madsen K. (2006) Effects of vibration and resistance training on neuromuscular and hormonal measures. *Eur J Appl Physiol* 96: 615-625.

Labeit S, Kolmerer B. (1995) Titins: giant proteins in charge of muscle ultrastructure and elasticity. *Science* 270: 293-296.

Langley B, Thomas M, Bishop A, Sharma M, Gilmour S, Kambadur R. (2002) Myostatin inhibits myoblast differentiation by down-regulating MyoD expression. *J Biol Chem* 277: 49831-49840.

LaStayo PC, Ewy GA, Pierotti DD, Johns RK, Lindstedt S. (2003a) The positive effects of negative work: increased muscle strength and decreased fall risk in a frail elderly population. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 58: M419-424.

Lastayo PC, Larsen S, Smith S, Dibble L, Marcus R. (2010) The feasibility and efficacy of eccentric exercise with older cancer survivors: a preliminary study. *J Geriatr Phys Ther* 33: 135-140.

LaStayo PC, Woolf JM, Lewek MD, Snyder-Mackler L, Reich T, Lindstedt SL. (2003b) Eccentric muscle contractions: their contribution to injury, prevention, rehabilitation, and sport. *J Orthop Sports Phys Ther* 33: 557-571.



Leger AB, Milner TE. (2001) Muscle function at the wrist after eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc* 33: 612-620.

Lieber RL, Friden J. (1988) Selective damage of fast glycolytic muscle fibres with eccentric contraction of the rabbit tibialis anterior. *Acta Physiol Scand* 133: 587-588.

Lieber RL, Friden J. (1999) Mechanisms of muscle injury after eccentric contraction. *J Sci Med Sport* 2: 253-265.

Lieber RL, Thornell LE, Friden J. (1996) Muscle cytoskeletal disruption occurs within the first 15 min of cyclic eccentric contraction. *J Appl Physiol* 80: 278-284.

Linari M, Lucii L, Reconditi M, Casoni ME, Amenitsch H, Bernstorff S, Piazzesi G, Lombardi V. (2000) A combined mechanical and X-ray diffraction study of stretch potentiation in single frog muscle fibres. *J Physiol* 526 Pt 3: 589-596.

Luo J, McNamara B, Moran K. (2005) The use of vibration training to enhance muscle strength and power. *Sports Med* 35: 23-41.

Macaluso F, Isaacs AW, Myburgh KH. (2012) Preferential Type II Muscle Fiber Damage From Plyometric Exercise. *J Athl Train* 47: 414-420.

MacIntyre DL, Sorichter S, Mair J, Berg A, McKenzie DC. (2001) Markers of inflammation and myofibrillar proteins following eccentric exercise in humans. *Eur J Appl Physiol* 84: 180-186.

Maffiuletti NA, Saugy J, Cardinale M, Micallef JP, Place N. (2013) Neuromuscular fatigue induced by whole-body vibration exercise. *Eur J Appl Physiol* 113: 1625-1634.

Magal M, Dumke CL, Urbiztondo ZG, Cavill MJ, Triplett NT, Quindry JC, McBride JM, Epstein Y. (2010) Relationship between serum creatine kinase activity following exercise-induced muscle damage and muscle fibre composition. *J Sports Sci* 28: 257-266.

Magnusson ML, Pope MH, Hulshof CTJ, Bovenzi M. (1998) Development of a protocol for epidemiological studies of whole-body vibration and musculoskeletal disorders of the lower back. *J Sound Vibr* 215: 643-651.

Maikala RV, Bhambhani YN. (2008) Cardiovascular responses in healthy young women during exposure to whole-body vibration. *Int J Indust Ergonomics* 38: 775-782.

Mair J, Mayr M, Muller E, Koller A, Haid C, Artner-Dworzak E, Calzolari C, Larue C, Puschendorf B. (1995) Rapid adaptation to eccentric exercise-induced muscle damage. *Int J Sports Med* 16: 352-356.

Malm C, Sjodin B, Sjoberg B, Lenkei R, Renstrom P, Lundberg IE, Ekblom B. (2004) Leukocytes, cytokines, growth factors and hormones in human skeletal muscle and blood after uphill or downhill running. *J Physiol-London* 556: 983-1000.

Mattei JP, Bendahan D, Roussel M, Lefur Y, Cozzone PJ. (1999) Gender modulates the energy cost of muscle contraction in untrained healthy subjects. A <sup>31</sup>P magnetic resonance spectroscopy analysis. *FEBS Letters* 450: 173-177.

McBride JM, Nuzzo JL, Dayne AM, Israel MA, Nieman DC, Triplett NT. (2010) Effect of an acute bout of whole body vibration exercise on muscle force output and motor neuron excitability. *J Strength Cond Res* 24: 184-189.

McCroskery S, Thomas M, Maxwell L, Sharma M, Kambadur R. (2003) Myostatin negatively regulates satellite cell activation and self-renewal. *J Cell Biol* 162: 1135-1147.

McHugh MP, Connolly DAJ, Eston RG, Gleim GW. (1999) Exercise-induced muscle damage and potential mechanisms for the repeated bout effect. *Sports Med* 27: 157-170.

McHugh MP, Tyler TF, Greenberg SC, Gleim GW. (2002) Differences in activation patterns between eccentric and concentric quadriceps contractions. *J Sports Sci* 20: 83-91.

McNeil PL, Khakee R. (1992) Disruptions of muscle-fiber plasma-membranes - role in exercise-induced damage. *Am J Pathology* 140: 1097-1109.

McPhedran AM, Wuerker RB, Henneman E. (1965a) Properties of motor units in a heterogeneous pale muscle (m. Gastrocnemius) of the cat. *J Neurophysiol* 28: 85-99.

McPhedran AM, Wuerker RB, Henneman E. (1965b) Properties of motor units in a homogeneous red muscle (soleus) of the cat. *J Neurophysiol* 28: 71-84.

Melnyk M, Kofler B, Faist M, Hodapp M, Gollhofer A. (2008) Effect of a whole-body vibration session on knee stability. *Int J Sports Med* 29: 839-844.

Menard MR, Penn AM, Lee JWK, Dusik LA, Hall LD. (1991) Relative metabolic efficiency of concentric and eccentric exercise determined by <sup>31</sup>P magnetic resonance spectroscopy. *Arch Phys Med Rehabil* 72: 976-983.

Miles MP, Ives JC, Vincent KR. (1997) Neuromuscular control following maximal eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 76: 368-374.

Mileva KN, Naleem AA, Biswas SK, Marwood S, Bowtell JL. (2006) Acute effects of a vibration-like stimulus during knee extension exercise. *Med Sci Sports Exerc* 38: 1317-1328.

Morgan DL, Proske U. (2004) Popping sarcomere hypothesis explains stretch-induced muscle damage. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 31: 541-545.

Moritani T, Muramatsu S, Muro M. (1987) Activity of motor units during concentric and eccentric contractions. *Am J Phys Med Rehab* 66: 338-350.

Murayama M, Nosaka K, Yoneda T, Minamitani K. (2000) Changes in hardness of the human elbow flexor muscles after eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol* 82: 361-367.

Nardone A, Schieppati M. (1988) Shift of activity from slow to fast muscle during voluntary lengthening contractions of the triceps surae muscles in humans. *J Physiol-London* 395: 363-381.

Nardone A, Romano C, Schieppati M. (1989) Selective recruitment of high-threshold human motor units during voluntary isotonic lengthening of active muscles. *J Physiol-London* 409: 451-471.

Newham DJ, Jones DA, Clarkson PM. (1987) Repeated high-force eccentric exercise - effects on muscle pain and damage. *J Appl Physiol* 63: 1381-1386.

Nosaka K, Clarkson PM. (1995) Muscle damage following repeated bouts of high force eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc* 27: 1263-1269.

Nosaka K, Sakamoto K. (2001) Effect of elbow joint angle on the magnitude of muscle damage to the elbow flexors. *Med Sci Sports Exerc* 33: 22-29.

Nosaka K, Newton M. (2002) Concentric or eccentric training effect on eccentric exercise-induced muscle damage. *Med Sci Sports Exerc* 34: 63-69.

Nosaka K, Clarkson PM, McGuiggin ME, Byrne JM. (1991) Time course of muscle adaptation after high force eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 63: 70-76.

Nosaka K, Sakamoto K, Newton M, Sacco P. (2001a) The repeated bout effect of reduced-load eccentric exercise on elbow flexor muscle damage. *Eur J Appl Physiol* 85: 34-40.

Nosaka K, Sakamoto K, Newton M, Sacco P. (2001b) How long does the protective effect on eccentric exercise-induced muscle damage last? *Med Sci Sports Exerc* 33: 1490-1495.

Otsuki T, Takanami Y, Aoi W, Kawai Y, Ichikawa H, Yoshikawa T. (2008) Arterial stiffness acutely decreases after whole-body vibration in humans. *Acta Physiol (Oxf)* 194: 189-194.

Pearce AJ, Sacco P, Byrnes ML, Thickbroom GW, Mastaglia FL. (1998) The effects of eccentric exercise on neuromuscular function of the biceps brachii. *J Sci Med Sport* 1: 236-244.

Pipinos II, Shepard AD, Anagnostopoulos PV, Katsamouris A, Boska MD. (2000) Phosphorus 31 nuclear magnetic resonance spectroscopy suggests a mitochondrial defect in claudicating skeletal muscle. *J Vasc Surg* 31: 944-952.

Pizza FX, Davis BH, Henrickson SD, Mitchell JB, Pace JF, Bigelow N, DiLauro P, Naglieri T. (1996) Adaptation to eccentric exercise: Effect on CD64 and CD11b/CD18 expression. *J Appl Physiol* 80: 47-55.

Prilutsky BI, Herzog W, Leonard TR, Allinger TL. (1996) Role of the muscle belly and tendon of soleus, gastrocnemius, and plantaris in mechanical energy absorption and generation during cat locomotion. *J Biomech* 29: 417-434.

Proske U, Morgan DL. (2001) Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *J Physiol* 537: 333-345.

Raphael ZF, Wesley A, Daniel KA, Olivier S. (2013) Occurrence of fatigue induced by a whole-body vibration session is not frequency dependent. *J Strength Cond Res* 27: 2552-2561.

Raue U, Terpstra B, Williamson DL, Gallagher PM, Trappe SW. (2005) Effects of short-term concentric vs. eccentric resistance training on single muscle fiber MHC distribution in humans. *Int J Sports Med* 26: 339-343.

Rees SS, Murphy AJ, Watsford ML. (2008) Effects of whole-body vibration exercise on lower-extremity muscle strength and power in an older population: a randomized clinical trial. *Phys Ther* 88: 462-470.

Rittweger J. (2010) Vibration as an exercise modality: how it may work, and what its potential might be. *Eur J Appl Physiol* 108: 877-904.

Rittweger J, Beller G, Felsenberg D. (2000) Acute physiological effects of exhaustive whole-body vibration exercise in man. *Clin Physiol* 20: 134-142.

Rittweger J, Schiessl H, Felsenberg D. (2001) Oxygen uptake during whole-body vibration exercise: comparison with squatting as a slow voluntary movement. *Eur J Appl Physiol* 86: 169-173.

Rittweger J, Mutschelknauss M, Felsenberg D. (2003) Acute changes in neuromuscular excitability after exhaustive whole body vibration exercise as compared to exhaustion by squatting exercise. *Clin Physiol Funct Imaging* 23: 81-86.

Rittweger J, Ehrig J, Just K, Mutschelknauss M, Kirsch KA, Felsenberg D. (2002) Oxygen uptake in whole-body vibration exercise: influence of vibration frequency, amplitude, and external load. *Int J Sports Med* 23: 428-432.

Ritzmann R, Kramer A, Gollhofer A, Taube W. (2013) The effect of whole body vibration on the H-reflex, the stretch reflex, and the short-latency response during hopping. *Scand J Med Sci Sports* 23: 331-339.

Roberts TJ. (2002) The integrated function of muscles and tendons during locomotion. *Comparative Biochemistry and Physiology a-Molecular and Integrative Physiology* 133: 1087-1099.

Roberts TJ, Marsh RL, Weyand PG, Taylor CR. (1997) Muscular force in running turkeys: The economy of minimizing work. *Science* 275: 1113-1115.

Roelants M, Delecluse C, Verschueren SM. (2004a) Whole-body-vibration training increases knee-extension strength and speed of movement in older women. *J Am Geriatr Soc* 52: 901-908.

Roelants M, Delecluse C, Goris M, Verschueren S. (2004b) Effects of 24 weeks of whole body vibration training on body composition and muscle strength in untrained females. *Int J Sports Med* 25: 1-5.

Roig M, Macintyre DL, Eng JJ, Narici MV, Maganaris CN, Reid WD. (2010) Preservation of eccentric strength in older adults: Evidence, mechanisms and implications for training and rehabilitation. *Exp Gerontol* 45: 400-409.

Roll JP, Martin B, Gauthier GM, Mussa Ivaldi F. (1980) Effects of whole-body vibration on spinal reflexes in man. *Aviat Space Environ Med* 51: 1227-1233.

Sacco P, Jones DA. (1992) The protective effect of damaging eccentric exercise against repeated bouts of exercise in the mouse tibialis anterior muscle. *Exp Physiol* 77: 757-760.

Sale DG. (1988) Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 20: S135-S145.

Sayenko DG, Masani K, Alizadeh-Meghbrazi M, Popovic MR, Craven BC. (2010) Acute effects of whole body vibration during passive standing on soleus H-reflex in subjects with and without spinal cord injury. *Neurosci Lett* 482: 66-70.

Schwane JA, Armstrong RB. (1983) Effect of training on skeletal-muscle injury from downhill running in rats. *J Appl Physiol* 55: 969-975.

Schwane JA, Johnson SR, Vandenakker CB, Armstrong RB. (1983) Delayed-onset muscular soreness and plasma cpk and ldh activities after downhill running. *Med Sci Sports Exerc* 15: 51-56.

- Seidel H, Heide R. (1986) Long-term effects of whole-body vibration - a critical survey of the literature. *Int Arch Occup Env Health* 58: 1-26.
- Sekiguchi H, Nakazawa K, Hortobágyi T. (2013) Neural control of muscle lengthening: Task- and muscle-specificity. *J Phys Fitness Sports Med* 2: 191-201.
- Singh M, Karpovich PV. (1966) Isotonic and isometric forces of forearm flexors and extensors. *J Appl Physiol* 21: 1435-1437.
- Small JV, Furst DO, Thornell LE. (1992) The cytoskeletal lattice of muscle-cells. *Eur J of Biochem* 208: 559-572.
- Smidt GL. (1973) Biomechanical analysis of knee flexion and extension. *J Biomech* 6: 79-92.
- Smith LL. (1991) Acute inflammation: the underlying mechanism in delayed onset muscle soreness? *Med Sci Sports Exerc* 23: 542-551.
- Sorichter S, Mair J, Koller A, Gebert W, Rama D, Calzolari C, ArtnerDworzak E, Puschendorf B. (1997) Skeletal troponin I as a marker of exercise-induced muscle damage. *J Appl Physiol* 83: 1076-1082.
- Spudich JA. (2001) The myosin swinging cross-bridge model. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 2: 387-392.
- Stauber WT. (1989) Eccentric action of muscles - physiology, injury, and adaptation. *Ex Sport Sci Reviews/Series* 17: 157-185.
- Stauber WT, Clarkson PM, Fritz VK, Evans WJ. (1990) Extracellular-matrix disruption and pain after eccentric muscle action. *J Appl Physiol* 69: 868-874.
- Talbot JA, Morgan DL. (1998) The effects of stretch parameters on eccentric exercise-induced damage to toad skeletal muscle. *J Muscle Res Cell Motil* 19: 237-245.



Thompson D, Williams C, Garcia-Roves P, McGregor SJ, McArdle F, Jackson MJ. (2003) Post-exercise vitamin C supplementation and recovery from demanding exercise. *Eur J Appl Physiol* 89: 393-400.

Thompson D, Bailey DM, Hill J, Hurst T, Powell JR, Williams C. (2004) Prolonged vitamin C supplementation and recovery from eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol* 92: 133-138.

Thornell LE, Carlsson L, Li Z, Mericskay M, Paulin D. (1997) Null mutation in the desmin gene gives rise to a cardiomyopathy. *J Mol Cell Cardiol* 29: 2107-2124.

Thornell LE, Holmbom B, Eriksson A, Reiz S, Marklund S, Naslund U. (1992) Enzyme and immunohistochemical assessment of myocardial damage after ischaemia and reperfusion in a closed-chest pig model. *Histochemistry* 98: 341-353.

Tihanyi J, Sáfár S, Ureczky D, Rácz L, Trzaskoma L. (2010a) Az egymás után alkalmazott izomnyújtás hatása az izomfeszülés növekedésére. Pages 76-77. Budapest: Magyar Biomechanikai Társaság.

Tihanyi J, Di Giminiani R, Tihanyi T, Gyulai G, Trzaskoma L, Horvath M. (2010b) Low resonance frequency vibration affects strength of paretic and non-paretic leg differently in patients with stroke. *Acta Physiol Hung* 97: 172-182.

Tihanyi TK, Horvath M, Fazekas G, Hortobagyi T, Tihanyi J. (2007) One session of whole body vibration increases voluntary muscle strength transiently in patients with stroke. *Clin Rehabil* 21: 782-793.

Torvinen S, Kannus P, Sievänen H, Järvinen TAH, Pasanen M, Kontulainen S, Järvinen TLN, Järvinen M, Oja P, Vuori I. (2002) Effect of a vibration exposure on muscular performance and body balance. Randomized cross-over study. *Clin Physiol and Functional Imaging* 22: 145-152.

Vaczi M, Costa A, Racz L, Tihanyi J. (2009) Effects of consecutive eccentric training at different range of motion on muscle damage and recovery. *Acta Physiol Hung* 96: 459-468.

Vaczi M, Tihanyi J, Hortobagyi T, Racz L, Csende Z, Costa A, Pucsok J. (2011) Mechanical, biochemical, and electromyographic responses to short-term eccentric-concentric knee extensor training in humans. *J Strength Cond Res* 25: 922-932.

van Nes IJ, Latour H, Schils F, Meijer R, van Kuijk A, Geurts AC. (2006) Long-term effects of 6-week whole-body vibration on balance recovery and activities of daily living in the postacute phase of stroke: a randomized, controlled trial. *Stroke* 37: 2331-2335.

Vickers AJ, Fisher P, Smith C, Wyllie SE, Lewith GT. (1997) Homoeopathy for delayed onset muscle soreness: a randomised double blind placebo controlled trial. *Br J Sports Med* 31: 304-307.

Vijayan K, Thompson JL, Riley DA. (1998) Sarcomere lesion damage occurs mainly in slow fibers of reloaded rat adductor longus muscles. *J Appl Physiol* (1985) 85: 1017-1023.

Vijayan K, Thompson JL, Norenberg KM, Fitts RH, Riley DA. (2001) Fiber-type susceptibility to eccentric contraction-induced damage of hindlimb-unloaded rat AL muscles. *J Appl Physiol* 90: 770-776.

Walker P, Brunotte F, Rouhier-Marcet I, Cottin Y, Casillas J, Gras P, Didier J. (1998) Nuclear magnetic resonance evidence of different muscular adaptations after resistance training. *Arch Phys Med Rehabil* 79: 1391 - 1398.

Wang K, McCarter R, Wright J, Beverly J, Ramirez-Mitchell R. (1993) Viscoelasticity of the sarcomere matrix of skeletal muscles. The titin-myosin composite filament is a dual-stage molecular spring. *Biophys J* 64: 1161-1177.

Warren GL, Hermann KM, Ingalls CP, Masselli MR, Armstrong RB. (2000) Decreased EMG median frequency during a second bout of eccentric contractions. *Med Sci Sports Exerc* 32: 820-829.

Yanagisawa O, Niitsu M, Takahashi H, Goto K, Itai Y. (2003) Evaluations of cooling exercised muscle with MR imaging and <sup>31</sup>P MR spectroscopy. *Med Sci Sports Exerc* 35: 1517 - 1523.

Yu JG, Malm C, Thornell LE. (2002) Eccentric contractions leading to DOMS do not cause loss of desmin nor fibre necrosis in human muscle. *Histochem Cell Biol* 118: 29-34.

Yu JG, Furst DO, Thornell LE. (2003). The mode of myofibril remodelling in human skeletal muscle affected by DOMS induced by eccentric contractions. *Histochem Cell Biol* 119: 383-393.

Zainuddin Z, Newton M, Sacco P, Nosaka K. (2005) Effects of massage on delayed-onset muscle soreness, swelling, and recovery of muscle function. *J Athl Train* 40: 174-180.

Zange J, Beisteiner M, Müller K, Shushakov V, Maassen N. (2008) Energy metabolism in intensively exercising calf muscle under a simulated orthostasis. *Pflugers Archiv Eur J Physiol* 455: 1153-1163.

Zange J, Haller T, Müller K, Liphardt A, Mester J. (2009) Energy metabolism in human calf muscle performing isometric plantar flexion superimposed by 20-Hz vibration. *Eur J Appl Physiol* 105: 265 - 270.

## ***10.Saját publikációk jegyzéke***

### **10.1. Disszertációhoz kapcsolódó cikkek:**

Ureczky D, Vacz G, Costa A, Kopper B, Lacza Z, Hortobagyi T, Tihanyi J. The effects of short-term exercise training on peak-torque are time- and fiber-type dependent. J Strength Cond Res 02/2014; DOI:10.1519/JSC.0000000000000414

Kopper B, Ureczky D, Tihanyi J. Trunk position influences joint activation pattern and physical performance during vertical jumping. Acta Physiol Hung 99(2): 194-205. (2012)

Ureczky D, Vác G, Costa A, Lacza Zs, Tihanyi J. Az izom nyújtására bekövetkező mikrosérülést jelző fibronectin és a rostösszetétel közötti kapcsolat. Magyar Sporttudományi Szemle 12(45): 21-24. (2011)

## ***11. Köszönetnyilvánítás***

Mindenekelőtt szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőmnek, Dr. Tihanyi Józsefnek, aki egyetemi tanulmányaim alatt Tudományos Diákköri munkám segítette, majd doktori témavezetőmként szakmai tudásával, pozitív hozzáállásával folyamatosan támogatta munkám. Személyében nagyszerű embert ismerhettem meg.

Szeretnék köszönetet mondani családomnak, akik minden segítséget megadtak mind a tanulmányaim, mind pedig a kutatások, és disszertáció írás ideje alatt. Köszönöm férjemnek és kisfiamnak, hogy mindvégig kitartottak mellettem.

Köszönettel tartozom Dr. Rudas Gábornak és az MR központ munkatársainak, akik segítették a spektroszkópos méréseket, valamint az adatok kiértékelését.

Köszönettel tartozom Váczi Gabriellának és Lacza Zsombornak az izomminták antitest festésében nyújtott segítségéért.