

Biomehaničke karakteristike mišićno-tetivne jedinice i njihova primena u treningu

Biomechanical properties of muscle-tendon unit and their training applications

Bojan Međedović, Fakultet za sport i turizam, Novi Sad

Romana Romanov, Fakultet za sport i turizam, Novi Sad

Jovan Plećaš, Fakultet za sport i turizam, Novi Sad

Zlatko Ahmetović, Fakultet za sport i turizam, Novi Sad

SAŽETAK

Veliki broj istraživanja o kretanju čoveka bavi se proučavanjem funkcionisanja složenih bioloških sistema. Ti sistemi mogu biti posmatrani kroz izdvojene funkcionalne jedinice u vidu mišićno-tetivne jedinice ili pojedinačnog mišićnog vlakna, kroz pojedinačni ekstremitet ili zglob, i na kraju kroz ceo lokomotorni sistem u vidu kinetičkog lanca. Mišićno-tetivna jedinica može generisati silu na dva različita načina: kao elastična opruga tokom pokreta istezanja i potom, pokreta skraćanja, i kroz pretvaranje metaboličke energije u mehanički rad. Dalje, u toku pokreta mišićno-tetivna jedinica može pokazati krutost ili popustljivost. Razumevanje tih stanja tokom kretanja može obezbediti važne informacije prilikom planiranja poboljšanja sportskih performansi i prevencije povreda.

Ključne reči:
energija istezanja,
krutost,
popustljivost

ABSTRACT

A large number of human movement studies have focused on functioning of complex biological systems. These systems can be observed as one muscle-tendon unit or one muscle fiber, one limb or joint, or a whole locomotor system presented as a kinetics chain. A muscle-tendon unit may generate forces in two distinctly different ways: as an elastic-like spring in stretch-shortening motion and as converters of metabolic energy into mechanical work. Furthermore, during movement a muscle-tendon unit can be stiff or compliant. Understanding these conditions during movement would provide important information that could be used for sports performance improvement and injury prevention planning.

Keywords:
Strain energy,
Stiffness,
Compliance

Uvod

Veliki broj istraživanja o kretanju čoveka bavi se proučavanjem funkcionisanja složenih bioloških sistema. Ti sistemi mogu biti posmatrani kroz izdvojene funkcionalne jedinice u vidu mišićno-tetivne jedinice ili pojedinačnog mišićnog vlakna, zatim kroz izdvojeni segment lokomotornog sistema u vidu pojedinačnog ekstremiteta ili zgloba, i na kraju kroz ceo lokomotorni sistem u vidu kinetičkog lanca. Znanja o funkcionisanju određenih sistema utiču na bolje razumevanje mehanike kretanja čoveka. Dakle, ukoliko znamo koje sve okolnosti mogu uticati na optimalno funkcionisanje pojedinih sistema, razvojem ili menjanjem određenih faktora hipotetskog uticaja, moguće je doprineti efikasnosti upravljanja promenama – razvoja odgovarajućeg sistema. Prepoznavanje faktora od kojih zavisi optimalni razvoj efikasnosti i ekonomičnosti kretanja predstavlja ne samo važnu pretpostavku modelovanja trenajnih uticaja, nego i predikcije rokova promena.

Lokomotorna aktivnost u sportu se karakteriše nizom ponavljajućih aktivnosti, srednjeg do visokog intenziteta, u prolongiranom periodu. Prilikom fizičkih aktivnosti i kontakta sportiste sa podlogom javljaju se određene sile. Te sile generišu mišići, koji u toku tih aktivnosti ne deluju nezavisno od tetiva, nego upravo preko njih prenose silu ostvarenu mišićnom kontrakcijom na kosti i tako omogućavaju kretanje. Najvažnija činjenica je da mišić i tetiva deluju interaktivno, dok tetiva sa svojim elastičnim svojstvima utiče i na tip i kvalitet pokreta. Tako, može se reći da mišić i tetiva čine **mišićno-tetivnu jedinicu**, čije razumevanje predstavlja važan faktor kako u procesu upravljanja razvojem određenih sposobnosti, tako i u sprečavanju nastanka povreda.

Mišićno-tetivna jedinica može generisati silu na dva različita načina: kao elastična opruga tokom pokreta istezanja (miometrijski režim rada) i kroz pokret skraćanja mišićnih vlakana (pliometrijski režim rada). U prvom slučaju, ekscentrična kontrakcija je praćena momentalnom koncentričnom kontrakcijom. Dobro je poznato da, ukoliko se aktivni mišić istegne pre skraćanja, njegovo ukupno dostignuće će biti poboljšano tokom koncentrične faze kontrakcije. Posledično, skokovi, poskoci, i slični pokreti, će biti poboljšani ukoliko se prethodno bude koristio pokret koji je suprotnog smera od pokreta koji se izvodi u okviru neke tehnike (*Countermovement*). Brojna ranija istraživanja ukazuju na to da je ovaj fenomen posledica elastične energije uskladištene u tetivama (Bijker, De Groot, & Hollander,

2002; Cornwell, Nelson, & Sidaway, 2002; Ettema, 2001; Finni, Komi, & Lepola, 2000; 2001; Fukunaga, Kurokawa, Fukashiro, et al., 1996; Kubo, Kanehisa, Kawakami, et al., 2000; Kuitunen, Komi, & Kyrolainen, 2002; Maganaris & Paul, 1999). Mišićno-tetivna jedinica može skladištiti mehanički rad kao elastičnu energiju tokom ekcentrične kontrakcije. Skladištenje i oslobađanje elastične energije tokom pokreta istezanja – skraćanja (pokreta u kojem je ekscentrična kontrakcija praćena momentalnom koncentričnom kontrakcijom) se, generalno, posmatra kao mehanizam uštede energije.

Skladištenje elastične energije

Prilikom, gotovo svih, pokreta kontrahovanja mišića, tetiva se prvo isteže, a potom skraćuje, nezavisno od promene dužine mišića. To svojstvo omogućava tetivi da skladišti, a potom i da oslobodi elastičnu energiju, povećavajući tako efikasnost mišićne kontrakcije. Dakle, pokret predstavlja kombinaciju dva faktora unutar mišićno-tetivne jedinice: sile mišića koja se preko tetive prenosi na zglob i elastične energije tetive.

Tokom poskoka, skokova i trčanja, noge se ponašaju slično kao opruge i vrše kompresiju na podlogu i akumuliraju energiju pre skoka, i potom u fazi odraza oslobađaju tu energiju (Hobara et al., 2008). Na primer, tokom trčanja mišićno-tetivne jedinice nogu naizmenično akumuliraju i oslobađaju elastičnu energiju koja nastaje u toku deformacije, odnosno istezanja. Tako da se noge mogu predstaviti kao opruge na koju deluje masa tela trkača, čineći tako **model mase i opruge** (Alexander, 1992; McMahon & Cheng, 1990). Ovakav model je široko prihvaćen u opisivanju i proučavanju akumuliranja i oslobađanja elastične energije donjih ekstremiteta tokom skokova i trčanja (Dalleau, Belli, Bourdin, & Lacour, 1998; Ferris, Louie, & Farley, 1998; He, Kram, & McMahon, 1991).

Centralno mesto akumuliranja elastične energije predstavlja tetiva (Lichtwark & Wilson, 2007). Pretpostavlja se da je količina akumulirane energije (često predstavljene kao napon ili potencijalna energija) proporcionalna primenjenoj sili i izazvanoj deformaciji (Zatsiorsky & Kraemer, 2006). Prethodna saznanja pokazuju da elastičnost igra značajnu ulogu u poboljšanju motornog učinka u nekim sportskim pokretima (Finni, Ikegawa, Lepola, & Komi, 2001; Lichtwark & Wilson, 2007; McBride, McCaulley, & Cormie, 2008). Upravo ta elastičnost može da objasni razlike u vrednostima skoka

sa ekcentričnom komponentom (*Countermovement jump*) i skoka bez ekscentrične komponente (*Squat jump*) za oko 20–30%. Dalje, Verkošanski (Verkhoshansky, 1996) ukazuje na jaku povezanost između kapaciteta tetive da skladišti energiju i performansi trkača na duge staze.

Iako je akumuliranje energije prepoznato kao osnovni faktor poboljšanja produkcije sile, neki autori se ne slažu sa tim tvrdnjama (Bobbert & Casius, 2005), te ističu da je za poboljšanje produkcije sile važan metabolički utrošak u toku pokreta, a da upoređujući dvojicu sportista, uvidamo da onaj koji optimalnije koristi ciklus istezanja – skraćanja, ostvaruje manji metabolički rad. Autori tvrde da se produženje tetive javlja u toku istezanja mišićno-tetivne jedinice, pri čemu kontraktilni elementi (mišići) vrše produkciju sile. Povećanje dužine tetive ne objašnjava razlike u visini skoka tokom izvođenja različitih tipova skokova, i pored činjenice da produženje tetive doprinosi maksimalnoj visini skoka pomoću akumulirane energije. Većina pokreta predstavlja koncentrične kontrakcije kojima prethode one ekscentrične. Kod ekscentričnih pokreta sila se povećava sa povećanjem brzine i istezanja. Dakle, što je brži prelaz iz koncentrične u ekscentričnu kontrakciju, veća je mišićna napetost, pa je tako, veća i ostvarena mišićna sila. Može se zaključiti da na razvoj eksplozivne snage utiču aktivnosti u brzom režimu rada (Bobbert & Casius, 2005).

Ciklus istezanja – skraćanja, ekscentrično-koncentrični ciklus (*Stretch-Shortening cycle, SSC*)

Razlike u vrednostima skoka sa ekcentričnom komponentom (*Countermovement jump*) i skoka bez ekscentrične komponente (*Squat jump*) mogu iznositi oko 2–4 cm (Bobbert & Casius, 2005). Povećanjem primenjenog opterećenja ili stope opterećenja tokom pokreta kojem prethodi istezanje muskulature, na primer u toku zaleta za skok ili skoka u dubinu, visina skoka se dalje može povećati (McBride et al., 2008; McCaulley et al., 2007). Ovaj fenomen se naziva **ciklus istezanja – skraćanja ili ekscentrično-koncentrični ciklus** (*Stretch-Shortening cycle – SSC*) koji objašnjava ekscentričnu fazu pokreta, tačnije fazu istezanja koja je praćena tranzitivnom izometrijskom fazom (faza amortizacije), pa se potom nastavlja eksplozivnom koncentričnom fazom (faza skraćanja). Ciklus istezanja – skraćanja je sinonim za pliometriju (Fleck & Kramer, 2004) i često se odnosi na mišićnu kontrakciju koja se sastoji iz koncentrične i ekscentrične faze (Zatsiorsky & Kraemer, 2006). Drugi primer ciklusa istezanja – skraćanja se odnosi na prirodne

oblike kretanja kao što su trčanje ili hodanje, ili bacanja sa zamahom. Pored toga što poboljšava koncentričnu kontrakciju (propulzivnu silu), efikasno korišćenje ciklusa istezanja – skraćanja omogućava sportistima smanjenje metaboličkih zahteva tokom pokreta (Bobbert & Casius, 2005). Dve studije (Verkhoshansky, 1996; Voigt, Bojsen-Moller, Simonsen, & Dyhre-Poulsen, 1995) ukazuju da ekonomično sprintersko trčanje (efikasno korišćenje SSC) može povratiti oko 60% ukupne mehaničke energije (40% se koristi iz metaboličkih procesa tokom ciklusa). Dalje, doprinos nemetaboličkih izvora energije se povećava sa povećanjem brzine trčanja (Dalleau et al., 1998; Verkhoshansky, 1996; Voigt et al., 1995). Ciklus istezanja – skraćanja je, stoga, esencijalni deo metodskih sadržaja u većini sportskih pokreta, u kretanjima čija uspešnost zavisi od efikasnog izvođenja obrazaca sportske lokomocije. Posledično, većina trenera teži da primeni pliometrijski metod rada kojim se može poboljšati korišćenje SSC kod sportista (McBride et al., 2008; Myer et al., 2006; Rimmer & Sleivert, 2000; Spurrs, Murphy, & Wastford, 2002). Sličan mehanizam korišćenja uskladištene energije može da se primeti kod vrhunskih tenisera prilikom izvođenja servisa. Biomehanička analiza pokreta trupa neposredno pre udarca lopte ukazuje da teniseri izvode rotaciju trupom u sve tri ravni (sagitalna, frontalna, horizontalna) u smeru koji je suprotan od smera u kojem se izvodi udarac. Dakle, mišići kojima se izvode pokreti trupa i dovode ga u poziciju izvođenja servisa, se prvo istegnu i potom skrate, odnosno kontrahuju. Na taj način se koristi energija istezanja tetiva koja se dalje prenosi kroz celokupni kinetički lanac i poboljšava snagu i brzinu servisa (Roetert, Ellenbecker, & Reid, 2009). Prepoznavanje takvih mehanizama pokreta omogućava odabir odgovarajućih trenažnih sadržaja i izbor odgovarajućih režima mišićnih kontrakcija (ekscentrična, koncentrična, ekscentrično-koncentrična) u samom treningu, i potom pozitivan transfer razvijenih sposobnosti u realne pokrete u sportu.

Ciklus istezanja – skraćanja predstavlja osnovu većine takmičarskih sportova. Pošto se sastoji iz naglog usporavanja mase tela, posle koje sledi istovremeno naglo ubrzavanje mase u suprotnom smeru, taj ciklus se ispoljava naročito u sportovima koji se sastoje iz trčanja, skakanja i nagle promene smera kretanja. Mora se obratiti pažnja na još jednu važnu činjenicu: *pliometrijski trening se može ispoljiti u bilo kojoj vežbi tokom koje osoba (ne mora nužno biti sportista) koristi silu gravitacije kako bi upotrebio elastičnu energiju unutar mišića, a nakon toga sledi ista, ali suprotna*

reakcija uz sposobnost elastičnosti mišića da proizvede kinetičku energiju. Dakle, pod pliometrijskim treningom se ne podrazumevaju isključivo skokovi sa visine ili u dubinu, već se bilo koji pokret, koji se izvodi uz istezanje i momentalno skraćenje mišića, može posmatrati kao pliometrijski režim rada. Uz takav pristup, pliometrijski trening može biti primenjen i kod populacije koja nije u profesionalnom sportu. Pliometrijski trening, kroz razne aktivnosti trčanja i skakanja, može biti sredstvo poboljšanja sposobnosti trčanja i skakanja u dečijoj populaciji, pa i kod dece sa smanjenom motoričkom sposobnošću (Johnson, Salzberg, & Stevenson, 2011). Takođe, za korišćenje elastične energije nije nužno da se vrše doskoci ili skokovi, nego se to može uraditi rotacijama tela u suprotnom smeru i posledičnim istezanjem mišićno-tetivne jedinice, gorenavedeni primer tenisera.

Treba primetiti da postoji momenat kada se stopa povećanja ekscentričnog napona (napon u toku faze istezanja mišića) usporava i dostiže kritični nivo. Tada se u koncentričnoj kontrakciji koja sledi ne može više povećavati sila i otpuštanje elastične energije, što može dovesti do smanjenja veličine izlazne sile. Izgleda da se ovo dešava usled predugog prelaza iz ekscentrične u koncentričnu kontrakciju (faza amortizacije). Ovo može biti posledica nevoljne nervne inhibicije koja dovodi do toga da se elastična energija otpusti i izgubi kao toplotna energija tokom amortizacione faze (Labeit et al., 2003). Dalje, ciklus istezanja – skraćenja posle 0,85 sekundi gubi svoj potencijal za 50%, i u periodu do 1 sekunde opadne za još oko 5%, dakle za 1 sekundu potencijali opadnu za 55%. Ovo se odnosi na ekscentrično-koncentrični pokret u toku potiska sa grudi (*Bench-press*) kod muškaraca – dizača tegova i ti rezultati mogu više biti primenjivi u mehanici gornjeg dela tela. Stoga, ukoliko hoćemo da optimalno iskoristimo elastičnu energiju, opterećenje u ekscentričnoj fazi mora biti na nivou limita sposobnosti pojedinca i izvedeno što je moguće brže. Dobro je poznato da se te varijable razlikuju među sportistima, i ono što je mnogo važnije, te varijable su merljive i može se na njih uticati (Fleck & Kraemer, 2004; Newton & Dugan, 2002). Objašnjenje se može naći u preglednim člancima (Newton & Dugan, 2002; Flanagan & Comyns, 2008) koji ukazuju na to da utrenirani pojedinci ostvaruju veći vertikalni skok nakon ekscentrično-koncentričnih pokreta, u odnosu na saskok sa visine i odskok. Kako se mehanika ciklusa istezanja – skraćenja pojedinca poboljšava, tako se visina skoka ostvarena nakon saskoka sa visine, povećava. Takođe, kroz progresivni

trening, sportista može da povećava visinu sa koje skače što može da bude praćeno i sa povećanjem odrazne visine skoka.

Mehanički model

Za dalje razumevanje uloge elastične energije i ciklusa istezanja – skraćenja, važno je uzeti u obzir analizu mehaničkog modela mišićne funkcije po Hillu (Hill, 1938) koji sugerise da silu možemo posmatrati kao sumu tri komponente: 1. kontraktilni elementi (aktin i miozin); 2. paralelna elastična komponenta (mišićna membrana koja obezbeđuje napetost suprotstavljajući se pasivno istegnutoj mišiću, a sastoji se iz sarkoleme i mišićne fascije); 3. elastične komponente (poprečni mostovi, strukturni proteini, tetive). Paralelna elastična komponenta je odgovorna za silu u situaciju kada je mišić pasivno istegnut više od njegove uobičajene dužine u mirovanju, te je njen doprinos akumuliranju mehaničke energije mali, i, isto tako, skromno doprinosi propulzivnoj sili. Nasuprot tome, kod elastične komponente (poprečni mostovi, strukturni proteini, i tetiva) se povećava napetost pod dejstvom sile koju razvijaju aktivno kontrahovani mišići. Pošto se aktivno kontrahovani mišić suprotstavlja istezanju, naročito ako se to odigrava brzo (Kubo et al., 2000) u elastičnoj komponenti se akumulira značajna količina energije. Većina autora opisuje tetivu kao centralno mesto elastične komponente (Lichtwark & Wilson, 2007), ali i dodatne komponente su takođe u velikoj meri značajne. Tokom većine aktivnosti mišić se opterećuje, odnosno isteže, nakon čega se preko mišićnog vretena šalje impuls koji dovodi do stezanja, odnosno skraćenja mišića. Dakle, da bi se mišić refleksno skratio, potrebno je da se prethodno istegne, pa potom kontrahuje. U toku takvog pokreta postoji i ekcentrična i koncentrična kontrakcija, a vreme koje protekne od početka prve do početka druge kontrakcije naziva se amortizacija. Da bismo ostvarili snažnu kontrakciju, tačnije visok skok, ta faza amortizacije mora da bude što kraća (Radcliffe, 1998). Može se zaključiti da se elastičnost mišića poboljšava skraćivanjem faze istezanja, kao i skraćivanjem celokupnog pokreta, što može biti korisna informacija koja ide u prilog opravdanosti brzog izvođenja pokreta tokom pliometrijskog treninga.

Kontraktilni filamenti (aktin, miozin) i strukturni proteini

Procenjuje se da trajanje mišićne kontrakcije iznosi između 15 i 120 milisekundi, pa tako vreme faze amortizacije mora biti minimalno kako bi se povećao povraćaj energije ovih struktura (Siff, 2003) pošto se energija gubi nakon prestanka ciklusa (Fleck & Kraemer, 2004). Ovi autori pretpostavljaju da je period amortizacije, jednostavno, previše dug kako bi došlo do bilo kakvog značajnog doprinosa ciklusa poprečnog mosta, za koji autori procenjuju da traje oko 30 milisekundi. Stoga sugerišu da su alternativni mehanizmi odgovorni za fenomen ciklusa istezanja – skraćanja.

Bosco i saradnici (1982) sugerišu da je prisutna razlika u trajanju ciklusa poprečnog mosta između brzih i sporih mišićnih vlakana, kao i da ta vlakna pokazuju drugačija viskoelastična svojstva. U saglasnosti sa prethodnom studijom, Sif (Siff, 2003) smatra da mišić, koji je bogat brzim mišićnim vlaknima, imati koristi od brzog ciklusa istezanja – skraćanja. Posledično, sporije i duže amplitude skokova sa dužim periodom trajanja biće korisnije za spora mišićna vlakna. Takođe je sugerisano i da statičko istezanje mišića pre kontrakcije utiče na svojstva kontraktilnog elementa, pri čemu aktin i miozin mogu ostati „zaglavljani“ tokom istezanja i sporije se otpuštati nego u situaciji kada sledi izometrijska ili koncentrična kontrakcija (Lee, Joumaa, & Herzog, 2007).

Tetive

Tetive predstavljaju glavni element elastične energije upravo zbog njihove sposobnosti da akumuliraju i otpuste energiju (Kubo, Kawakami, & Fukunaga, 1999; Lichtwark & Wilson, 2005). Kubo i saradnici (1999) sugerišu da je elastična energija skladištena u tetivi ključni mehanizam objašnjenja fenomena ciklusa istezanja – skraćanja. Ovo je u saglasnosti sa studijom (Lichtwark & Wilson, 2005) koja ukazuju na to da je elastičnost tetive odgovorna za povećanje izlazne sile kontrakcije i za očuvanje energije tokom lokomocije. Ova elastična svojstva tetive su veoma važna za produkciju sile i efikasnost kretanja. Nasuprot tetivi, mišićno tkivo nije toliko efikasno u akumuliranju i otpuštanju energije. Kakogod, mišić i tetiva čine jednu celinu, i izloženi su istoj sili, pa tako distribucija akumulirane energije u ta dva tkiva zavisi od njihove deformacije, što predstavlja funkciju krutosti ili popustljivosti (Zatsiorsky & Kraemer, 2006). Dakle,

ono tkivo koje se više istegne, više će elastične energije akumulirati. Na primer, tokom pasivnog istezanja, krutost paralelne elastične komponente je 100 puta manja u odnosu na tetivu, i većina deformacije se dešava u paralelnoj elastičnoj komponenti (Latash & Zatsiorsky, 1993). Obrnuto, tokom aktivnog pokreta, krutost mišićnog tkiva i paralelne elastične komponente koja ga okružuje daleko premašuje krutost tetive, tako da je akumuliranje elastične energije preusmereno na tu tetivu. Kao posledica superiorne sposobnosti tetive da akumulira i otpušta energiju, glavni cilj programa treninga svih sportista treba da bude optimalan transfer potencijalne energije, nastale u fazi istezanja, ka ovim strukturama. Međutim, ovaj transfer može biti poboljšán jedino kroz razvoj krutosti mišića tokom perioda istezanja, pa tako krutost i popustljivost predstavljaju ključnu terminologiju prilikom objašnjavanja efikasnosti ciklusa istezanja – skraćanja i postizanja vrednosti izlazne sile.

Definicija krutosti sistema

U zavisnosti od karakteristika sporta, potrebno je da sportista poseduje optimalnu krutost sistema, tačnije zglobova, mišića i tetiva. Koncept krutosti ima svoje poreklo u fizici, kao deo Hukovog zakona (*Hooke's Law*, 1678.). Objekti opisani ovim zakonom predstavljaju tela koja mogu da se deformišu, ali i da skladište i otpuštaju elastičnu energiju, upravo kao ranije spomenuta tetiva. Istraživanja koja analiziraju krutost donjih ekstremiteta postala su učestala u literaturi iz oblasti biomehanike, usled nastojanja istraživača da bolje shvate i razumeju kompleksnost mehanike donjih ekstremiteta. Najjednostavnije rečeno, **krutost predstavlja povezanost između deformacije tela i sile koja je prouzrokovala tu deformaciju**. U kontekstu ljudskog organizma, krutost može biti predstavljena na nivou jednog mišićnog vlakna ili celog tela kao **sistem mase i opruge** (Butler, Crowell, & Davis, 2003). Većina istraživača u oblasti biomehanike je saglasna sa tvrdnjom da je krutost ljudskog tela kombinacija krutosti svih tkiva u koje spadaju mišići, tetive, ligamenti, hrskavice, i kosti (Latash & Zatsiorsky, 1993). Generalno, sportski i klinički biomehaničari su najčešće zainteresovani za utvrđivanje uloge krutosti sistema u kretnim sposobnostima i nastajanju povreda. Pošto je određena krutost sistema neophodna za izvođenje neke sportske kretnje, tako i prevelika ili premala krutost može dovesti do nekih povreda mišićno-tetivnih struktura (Butler et al., 2003).

Objašnjavajući pojam elastičnosti u mehanici, engleski fizičar Robert Huk (Robert Hooke) je još 1678. godine ukazao na činjenicu da je relativna deformacija elastičnog tela, u određenim granicama, direktno proporcionalna naponu koji deluje na njega. Taj zakon se odnosio na opruge, i na činjenicu da je sila koju opruga proizvodi proporcionalna njenom istezanju ili sabijanju (Krpčić, 2005). Noga se često može predstaviti kao opruga koja nosi masu čovekovog tela, dok Lataš i Zaciorski (Latash & Zatsiorsky, 1993) sugerišu da precizno predstavljanje modela podrazumeva sve komponente koje utiču na krutost sistema. Te komponente podrazumevaju tetive, ligamente, mišiće, zglobove i kosti. Nažalost, model koji podrazumeva sve ove komponente koje utiču na pokret, veoma je komplikovan i nepraktičan. Razlog leži u činjenici da tačne matematičke formule za izračunavanje pojedinih komponenti još nisu razvijene. Takođe, usled korišćenja velikog broja pretpostavki, moguće je da rezultat ne bude validan u tom slučaju (Butler et al., 2003). Prema tome, biomehantičari se često vraćaju jednostavnijim modelima **masa – opruga** za procenu krutosti noge. Autori (Latash & Zatsiorsky, 1993) ovu procenu predstavljaju kao kvazi-krutost, pošto se jedna vrednost krutosti koristi u predstavljanju ponašanje svih prethodno pomenutih komponenti. Uglavnom, i ta jedna komponenta predstavlja značajnu komponentu u procesu razumevanja i poboljšanja sposobnosti, ali i u prevenciji povreda u toku fizičkih aktivnosti. U biomehanici postoji nekoliko različitih načina utvrđivanja stepena krutosti donjih ekstremiteta, među koje spadaju: vertikalna krutost, krutost noge, i zglobna krutost. Vertikalna krutost se često koristi prilikom analize linearnih kretanja koja se odvijaju u vertikalnom smeru, kao što su poskoci i skokovi. Ona može biti merena pomoću tri metode. U prvoj i najjednostavnijoj metodi, pik sile reakcije podloge se deli sa maksimalnim vertikalnim pomeranjem centra mase tokom kontakta sa podlogom (McMahon & Cheng, 1990). Maksimalno vertikalno odstupanje centra mase je definisano na osnovu razlike između maksimalne i minimalne vrednosti. Pomeranje centra mase se najčešće izračunava uz pomoć platforme sile, a može biti određeno pomoću kinematičke analize celog tela.

Krutost i popustljivost

Neki autori (Zatsiorsky & Kraemer, 2006) objašnjavaju da je krutost tetive konstantna, dok krutost mišića varira i zavisi od primenjene sile (mišić je popustljiv u pasivnim okolnostima, a krut kad je aktivan). Kroz trening, posebno

plimetrijski, moguće je razviti visoke sile i održavati visok nivo krutosti mišića, veći u odnosu na tetivu (McBride et al., 2008; Myer et al., 2006; Spurrs, Murphy, & Watsford, 2003). U takvom slučaju, kada se mišić ne isteže, tetiva je primorana na to. Kao što je spomenuto ranije, elitni sportisti pokazuju superiornu sposobnost akumuliranja elastične energije u tetivama (Arampatzis et al., 2007; Hobara et al., 2008).

Krutost noge, može biti definisana kao odnos maksimalne sile reakcije podloge i maksimalne kompresije noge tokom središnjeg dela faze kontakta sa podlogom (Hobara et al., 2008), ili kao količnik promene sile i promene dužine. Komi (Komi, 2003) sugeriše da veći nivo krutosti mišića donjih ekstremiteta tokom ciklusa istezanja – skraćanja povećava količinu akumulirane i oslobođene energije. Takođe, Bojsen-Moler i saradnici (Bojsen-Moller et al., 2005) utvrđuju da su parametri sile, snage, i brzine tokom skokova značajno i pozitivno povezani sa krutošću tetive. Dalje, krutost noge se povećava sa povećanjem visine saskoka (Arampatzis et al., 2001b; Farley & Morgenroth, 1999), i krutosti zgloba kolena, što predstavlja sposobnost suprotstavljanja pregibanju u tom zglobu, ključnu sposobnost posle skoka sa visine (Horita, Komi, Nicol, & Kyrolainen, 2002). Arampatzis i saradnici (Arampatzis et al., 2001b) takođe pokazuju da je trajanje kontakta sa podlogom i krutost skočnog zgloba obrnuto srazmerno tokom skoka sa visine. Kuitunen i saradnici (Kuitunen et al., 2002) takođe utvrđuju da osobe sa najvećom krutošću skočnog zgloba pokazuju i najkraći kontakt sa podlogom tokom trčanja različitim brzinama, i da je to vreme, takođe, povezano sa smanjenim pregibanjem u skočnom i u zglobu kolena. Dalje, pozitivna povezanost postoji između stope razvoja sile i krutosti vezivnog tkiva u donjem (Bojsen-Moller et al., 2005) i gornjem delu tela (Wilson, Murphy, & Pryor, 1994). Trkači sa ekonomičnom tehnikom trčanja pokazuju stil trčanja u kojem je noga kruća tokom kontakta sa podlogom. Stoga, u saglasnosti sa još jednom studijom (Wilson & Flanagan, 2008), moguće je zaključiti da postoji snažna povezanost između veličine krutosti u ljudskom sistemu i različitih parametara sportskih performansi.

Mehanizam mišićno-tetivne jedinice tokom pokreta

Kada je mišić u stanju manje krutosti mišićno-tetivne jedinice, više rada je direktno pretvoreno u spoljašnji rad. U aktivnostima poput vožnje bicikla, klizanja i plivanja, uglavnom, koriste se pokreti u kojima dolazi do generisanja sile u toku skraćanja mišića, tako da

je prisutna mala mogućnost apsorpcije određene količine energije tokom kretanja (Biewener, Corning, & Tobalske, 1998). Veća usklađenost mišićno-tetivne jedinice omogućava efektivno skladištenje i otpuštanje elastične energije, ali čini se da je tada mišić manje pogodan za pokrete u kojima dolazi do generisanja sile u toku skraćanja mišića. Wilson i saradnici (Wilson et al., 1994) zaključuju da je mišićno-tetivna krutost značajno povezana sa izometrijskim i koncentričnim performansama, ali ne i sa ekscentričnim. U ovoj studiji utvrđeno je da krutost sistema omogućava značajno bolje rezultate kod izometrijskih testova i većine koncentričnih testova, pošto krut mišić momentalno prenosi silu do spoja mišića i kosti. U suprotnom, manje krut mišić generiše manje sile usled odloženog prenosa energije kroz mišićno-tetivnu jedinicu. Dalje, povećanje popustljivosti mišićno-tetivne jedinice, usled istežanja, povećava doprinos elastične energije istežanja na pokret, olakšavajući performanse u pokretima istežanja – skraćanja mišićno-tetivne jedinice (Ciklus istežanja – skraćanja).

Dakle, čini se da različiti tipovi sporta zahtevaju različite nivoe mišićno-tetivne popustljivosti. Mnoge fizičke aktivnosti kao što su vožnja bicikla, plivanje, klizanje, rvanje i boks, podrazumevaju brz razvoj sile u izometrijskoj i koncentričnoj mišićnoj kontrakciji, i izgleda da se takve performanse mogu poboljšati povećanjem mišićno-tetivne krutosti. Ukoliko je veća krutost mišićno-tetivne jedinice, sila će se brže preneti na kosti, i završni pokret u zglobu će biti brži. Ukoliko se posmatra krajnje dostignuće, izgleda da u ovakvim sportovima nema potrebe za visoko elastičnom mišićno-tetivnom jedinicom koja funkcioniše kao opruga. Cilj pokreta u sportovima u kojima dolazi do generisanja sile u toku skraćanja mišića je da pretvore mehaničku energiju, što je moguće brže, u mehanički rad.

Nasuprot tome, u sportovima sa visoko intenzivnim pokretima istežanja – skraćanja mišićno-tetivne jedinice, veća popustljivost mišićno-tetive jedinice može biti poželjna za skladištenje i otpuštanje elastične energije. U takvim pokretima, mišićno-tetivna jedinica zahteva visok kapacitet skladištenja potencijalne energije, i stoga mora biti dovoljno popustljiva. Za održavanje performansi, izgleda da je u ovakvim sportovima prisutna velika potreba za više popustljivu mišićno-tetivnu jedinicu.

Efekti vežbi na biomehaničke karakteristike mišićno-tetivne jedinice

U mišićno-koštanom sistemu mišići generišu silu i preko tetive je prenose do kosti. Efekat povećanog opterećenja, tačnije fizičkih aktivnosti, na mišićno tkivo je dobro poznat. Kakogod, objavljeno je relativno malo studija o adaptaciji tetiva na fizičku aktivnost. Pošto je tetiva, zajedno sa ostalim vezivnim tkivom, integralna komponenta sistema prenosa sile sa mišića na kost, razumevanje reakcije mišićno-koštanog sistema na fizičku aktivnost je nekompletno bez daljih informacija o adaptaciji tetive na vežbanje. Dalje, povrede koje su povezane sa dugotrajnim fizičkim aktivnostima, i/ili ponavljajućim pokretima, su često usmerene na tetive. Razumevanje načina prilagođavanja tetive na fizičku aktivnost, bi verovatno, konačno moglo da pojasni mehanizam nastanka povreda.

U studijama, koje su analizirale mehaničke promene tetive kao odgovor na trening izdržljivosti, ukazano je na to da takav trening dovodi do povećanja tenziona snage i krutosti tetiva. U svojoj studiji Kubo i saradnici (Kubo et al., 2000) su utvrđivali elastična svojstva tetive Spoljašnjeg stegenog mišića trkača na duge staze, i ukazali na značajno veću krutost tog mišića kod trkača (za oko 20%) u poređenju sa kontrolnom grupom. U narednoj studiji, Kubo i saradnici (Kubo et al., 2001) utvrđuju da izometrijski trening takođe povećava krutost tetivnih struktura mišića opružača u zglobu kolena.

Nekoliko studija je utvrđivalo povezanost između krutosti i dostignuća tokom poskoka (Granata, Padua, & Wilson, 2001; Arampatzis et al., 2001a; 2001b). Granata i saradnici (Granata et al., 2001) smatraju da je povećanje krutosti proporcionalno povećanju frekvencije poskoka koji se izvode u mestu. Arampatzis i saradnici (Arampatzis et al., 2001a; 2001b) ukazuju na to da se sa povećanjem brzine u toku skoka udalje povećava i krutost donjih ekstremiteta. Vertikalna krutost povećava sa povećanjem brzine tokom skokova sa jednom nogom na tredmilu. Ova studija sugerise da se krutost donjih ekstremiteta povećava sa povećanjem brzine kretanja, što može biti neophodna reakcija suprostavljanja „kolapsa“ donjih ekstremiteta tokom rane faze doskoka, omogućavajući maksimalan povraćaj energije tokom propulzivne faze odskoka (Granata et al., 2001; Arampatzis et al., 2001a; 2001b).

Studije koje su analizirale trčanje, objavljuju slične rezultate (Arampatzis et al., 1999; Kuitunen et al., 2002; Seyfarth, Geyer, Gunther, & Blickhan, 2002). U prvom

slučaju je analizirano uobičajeno trčanje (Arampatzis et al., 1999), a u drugom sprintersko trčanje (Kuitunen et al., 2002), u oba slučaja je utvrđeno povećanje krutosti noge sa povećanjem brzine trčanja. Treća studija (Seyfarth et al., 2002) ukazuje na direktnu povezanost krutosti i brzine trčanja. Na nivou zglobova, krutost skočnog zgloba se značajno povećava sa povećanjem brzine trčanja. Sve ove studije koje su analizirale trčanje, podržavaju podatak da sa povećanjem zahteva neke kretnje povećava i krutost sistema koji učestvuje u tom kretanju (Arampatzis et al., 1999; Kuitunen et al., 2002; Seyfarth et al., 2002). Izgleda da je krutost povezana sa parametrima koraka. Pokazano je da je, pri određenoj brzini kretanja, veća dužina koraka povezana sa manjom krutošću (Derrick, Cladwell, & Hamill, 2000). Kada osoba trči *groucho* tehnikom, karakterističnoj po preteranom savijanju kolena, dužina koraka se povećava a krutost smanjuje (McMahon & Cheng, 1990). Tokom normalnog trčanja, osobe koje prirodno trče dužim koracima imaju smanjenu krutost noge kao i vertikalnu krutost. Dok povećanje dužine koraka trkača može biti značajno za poboljšanje dostignuća, treba razumeti da ova promena u načinu trčanja može smanjiti vertikalnu krutost trkača, što može negativno uticati na brzinu (Derrick et al., 2000).

Krutost i povrede

Prethodno navedene studije pokazuju da je neophodan određen stepen krutosti za dostizanje optimalnih performansi (McMahon & Cheng, 1990; Arampatzis et al., 1999; Kuitunen et al., 2002; Seyfarth et al., 2002; Dutto & Smith, 2002). Kakogod, prevelika krutost može dovesti do povreda. Povećanje krutosti noge je tipično povezano sa smanjenjem pokretljivosti donjih ekstremiteta i povećanja pika sile. Kombinacija ovih faktora tipično dovodi do povećanja stope opterećenja, što je povezano sa povećanim opterećenjem donjih ekstremiteta. Dalje, veruje se da povećanje pika sile, stope opterećenja, i opterećenja zglobova, predstavlja veliki rizik nastanka povreda kao što je osteoartritis u zglobu kolena i stres frakture (Grimston, Engsberg, Kloiber, & Hanley, 1991).

U jednoj preglednoj studiji autori (Williams, McClay Davis, Scholz, Hamill, & Buchanan, 2003) analiziraju mehaniku donjih ekstremiteta i obrasce nastanka povreda kod trkača sa visokim i niskim tabanskim svodom i utvrđuju da trkači sa visokim tabanskim svodom, koji poseduju veću krutost nogu i vertikalnu stopu opterećenja, pokazuju konstantno značajno veću incidencu povreda kostiju u odnosu na trkače sa niskom tabanskim lukom.

U drugoj preglednoj studiji (Grimston et al., 1991) autori ukazuju na činjenicu da trkači koji su doživeli stres frakture, pokazuju povećan pik sile reakcije podloge, potencijalno povećavajući krutost donjih ekstremiteta. Ove studije pokazuju da krutost donjih ekstremiteta, ili biomehantičke varijable povezane sa krutošću, kao što je pik sile i stopa opterećenja, mogu izazvati veći rizik od povreda kostiju.

Sa druge strane, sugerisano je (Granata et al., 2001; Williams et al., 2003) da suviše mala krutost može dovesti do prekomernog pomeranja u zglobu i povreda mekih tkiva. Neki navedeni autori (Williams et al., 2001; 2003) ukazuju na to da trkači sa niskim tabanskim lukom, i smanjenom krutošću noge, doživljavaju više povreda mekog tkiva u odnosu na trkače sa visokim lukom. Drugi, pak, autori (Granata et al., 2001) utvrđuju da ženske osobe pokazuju manju krutost kolena tokom poskoka u odnosu na muškarce i sugerišu da ta smanjena krutost može objasniti dobro dokumentovanu veću incidencu povreda ligamenata kolena kod žena. Generalno, prisutna je potreba za dodatnim potencijalnim studijama u kontekstu ustanovljavanja direktne povezanosti između krutosti i povreda. U svakom slučaju, rezultati dostupnih studija pokazuju da prevelika krutost može biti povezana sa povredama kostiju, dok suviše mala krutost može biti povezana sa povredama mekih tkiva (Granata et al., 2001; Williams et al., 2001, 2003). Ukoliko je ovo tačno, izgleda da postoji idealan opseg krutosti koji dozvoljava optimizaciju dostignuća uz minimiziranje rizika od povreda.

Razvoj krutosti mišića

Krutost noge uglavnom zavisi od krutosti skočnog zgloba (Arampatzis et al., 2001a), a krutost zglobova generalno zavisi od kontrakcije antagonista (Hortobagyi & DeVita, 2000). To je regulisano tenzijom u mišiću tokom inicijalnog kontakta sa podlogom, odnosno njegovom preaktivacijom (Hobara et al., 2008) i zajedničkog dejstva nevoljnih refleksih nervnih procesa. Na primer, simultana kontrakcija između plantarnih i dorzalnih pregibača skočnog zgloba, i pregibača i opružaća u zglobu kolena, povećava krutost zglobova u celoj nozi prilikom pripreme za kontakt sa podlogom (Hortobagyi & DeVita, 2000). U tom smislu, neki autori (Kuitunen et al., 2002) utvrđuju da se usled povećanja brzine trčanja, preaktivacija plantarnih pregibača skočnog zgloba i opružaća zgloba kolena povećava, uz povećanje krutosti mišićno-tetivne jedinice i uz sposobnost tolerancije i

apsorpcije visokih udarnih opterećenja na početku faze kontakta. Osim toga, preaktivacija troglavog mišića lista zajedno sa refleksom istezanja i inhibicijom Goldžijevog tetivnog organa će obezbediti visoku krutost mišića tokom kontakta sa podlogom i tako omogućiti podršku i pokretanje tela. Konačno, Mekbrajd i saradnici (McBride et al., 2008) utvrđuju da povećanje aktivnosti mišića, u preaktivacionoj i ekscentričnoj fazi, povećava izlaznu silu u koncentričnoj fazi.

U drugoj studiji (Hobara et al., 2008) utvrđeno je da sportisti sa velikom produkcijom sile (sprinteri) pokazuju veću krutost noge i skočnog zgloba u odnosu na sportiste izdržljivosti i nesportiste. Ovi sportisti pokazuju kraće vreme kontakta sa podlogom i duži period između dva kontakta tokom kretanja. Ovo je u saglasnosti sa još jednom studijom (Arampatzis et al., 2007) koja ukazuje na to da sprinteri pokazuju veću krutost tetive troglavog mišića lista, što predstavlja značajnu povezanost. Veća krutost tetiva, čini se da smanjuje mogućnost povrede tetiva usled istezanja (prekomerna elongacija može dovesti do delimične ili potpune rupture tetive), što se može desiti kao posledica jačeg mišića (Arampatzis et al., 2007). Dalje, povećana krutost mišića i tetive može povećati stabilnost zgloba kroz suprotstavljanje promeni položaja zgloba (Butler, Crowell, & Davis, 2003). Stoga, može se zaključiti da i mišićno i tetivno tkivo pokazuju mogućnost prilagođavanja. I mišić i tetiva podležu procesu hipertrofije i pokazuju povećanu sintezu kolagena, što dovodi do povećanja krutosti mišića, ali i tetive. Može se zaključiti da ovo povećanje krutosti tetive smanjuje elongaciju kao i količinu elastične energiju. Bez obzira na to što se krutost povećava i u mišićnom i u tetivnom tkivu (Birch, 2007), stopa povećanja krutosti mora biti takva da se održi optimalna efikasnost u odnosu na anatomsku lokaciju i nastavak zahteva u toj kretnji. Na primer, Ličvork i Vilson (Lichtwark & Wilson, 2007) pokazuju da krutost tetiva optimalna u kontekstu dostizanja najveće efikasnosti i tokom hodanja i tokom trčanja. Takođe, Ahilova tetiva čoveka može da se istegne do 10,3% tokom skokova na jednoj nozi, dok tetiva prednjeg golenjačnog mišića pokazuje maksimalne zabeležene vrednosti istezanja do 3,1% (Maganaris & Paul, 2000). Dalje, Marković i Jarić (2007) takođe objašnjavaju da je mišićni sistem prilagođen da obezbedi maksimalni mehanički učinak tokom uobičajenih svakodnevnih opterećenja. U saglasnosti sa studijom Marković i Jarić (2007), pokazano je da se krutost tetive čoveka povećava samo nakon treninga otpora sa velikim opterećenjem i izometrijskog čučnja

(Kubo et al., 2006). Stoga, svako povećanje snage mišića će biti praćeno povećanjem krutosti tetiva (Kubo et al., 2007). Posledično, skokovi, sprinterski trening, i skokovi sa visine, neće dovesti do značajnih promena u tetivnim svojstvima. Dakle, balističke kontrakcije (naglo ubrzanje protiv otpora) ne moraju promeniti svojstva tetive, nego se adaptacija dešava povećanjem krutosti zgloba i značajnim promenama u mehaničkim svojstvima mišića (aktivni poprečni mostovi), ali ne i tetive (Kubo et al., 2007). Trening snage treba da prethodi pliometrijskom treningu zbog razvoja dovoljne snage mišića i tetiva i smanji mogućnost povreda tetiva. Nakon treninga snage pliometrijski trening (balistički) mora biti korišćen zbog mogućnosti strukturalne adaptacije u mišiću, čime se registruje poboljšanje odnosa snage tetive i mišića i krutost postaje optimalna za produkciju i održavanje sile (Siff, 2003).

Metoda poboljšanja mehanizma ciklusa istezanja – skraćanja

Pošto je evidentno da ciklus istezanja – skraćanja ima važnu ulogu u dostignućima u mnogim sportovima, onda je razvoj ovog kapaciteta kroz efektivnu trenažnu praksu ključna stvar. Na osnovu prethodnih istraživanja, najefikasniji metod za treniranje ciklusa istezanja – skraćanja je pliometrija (McBride et al., 2008; Myer et al., 2006). Pliometrija podrazumeva širok spektar vežbi skokova, poskoka, i produženih koraka, koje imaju osnovni cilj poboljšanje efekta ciklusa istezanja – skraćanja. Iako izgledaju kao veoma jednostavni zadaci, pliometrijske vežbe su zapravo veoma kompleksne i predstavljaju osnovne kretne veštine. Kao takve, one zahtevaju određeno vreme za razvoj, a neophodno je da sportisti pokažu visok stepen usvojenosti tih veština pre progresije sa dodatnim veštinama. Ovo zahteva progresivan sistem vežbi, kroz koji sportisti treba da prođu, kako bi se obezbedio visok stepen usvojenosti tehnike, a sportisti bili sposobni da izvode ceo opseg pliometrijskih vežbi u kontekstu ostvarivanja maksimalnih dostignuća i smanjenja rizika od nastanka povreda.

U kontekstu ostvarivanja maksimalnih dostignuća, trening za razvoj snage treba da prethodi pliometrijskom treningu kako bi se smanjili rizici od nastanka povreda mišićno-tetivnog kompleksa i povećao kvalitet i kvantitet mišićnih vlakana tipa 2 (brza mišićna vlakna). Kasniji značaj porasta kvantiteta brzih mišićnih vlakana se ogleda u visokoj povezanosti između procentualne zastupljenosti tih vlakana i pika ostvarene sile i na

taj način se povećava potencijal sportiste u razvoju eksplozivne snage (Komi, 2003). Spora mišićna vlakna imaju manje motorne neurone koji se prvi aktiviraju, tako da je za aktivaciju brzih mišićnih vlakana potrebna intenzivnija aktivnost. Trening snage za aktivaciju brzih mišićnih vlakana (Harris et al., 2000) treba da se izvodi sa opterećenjem većim od 85% od 1RM, sa 6 ili manje ponavljanja, u 2 do 6 serija, sa pauzom od 2 do 5 minuta (Baechle, Earle, & Wathen, 2008).

Važnost aktivacije i upotreba brzih mišićnih vlakana može se posmatrati van konteksta sporta, odnosno u oblasti zdravlja. Snaga, kao i brzina kontrakcije mišića, se smanjuje sa godinama starosti. Ova pogoršanja doprinose daljem narušavanju kretnih sposobnosti i povećanju rizika od padova. Trening snage predstavlja snažan stimulan metabolizma skeletnih mišića kod odraslih osoba, naročito kontraktilnog aparata. Takođe je poznato da i starije odrasle osobe pomoću treninga sa otporom mogu poboljšati mišićnu snagu, eksplozivnost, stabilnost, brzinu hoda, samostalnost, veličinu primenjene sile (Međedović, 2018). Pokazano je da sposobnost ispoljavanja eksplozivne snage (brža kontrakcija mišića) može sprečiti padove usled brže reakcije i uspostavljanja pravilne posture (Lopes, Pereira, Lodovico, Bento, & Rodacki, 2016). Takođe, neophodna je i određena krutost segmenata tela (skočni zglobovi, koleno) uz tendenciju održavanja položaja tela i sprečavanja kolapsa donjih ekstremiteta. Saznanja o krutosti i popustljivosti sistema mogla bi se primeniti i prilikom dizajniranja treninga snage odraslih osoba, u skladu sa mogućnostima svakog pojedinca.

Takođe, i mladi sportisti se susreću sa velikim brojem aktivnosti koje se sastoje iz ciklusa istezanja – skraćivanja, odnosno velikog broja skokova i doskoka. Ove aktivnosti se često koriste pre adekvatnog razvoja snage (Međedović & Romanov, 2017). Pravilna tehnika izvođenja pliometrijskih vežbi je neophodan preduslov dalje progresije opterećenja. Međutim, mišićno-tetivna jedinica mora biti sposobna da prilagođava krutost i popustljivost aktuelnom zadatku. Ukoliko su mladi sportisti bili izloženi adekvatnom treningu snage i ukoliko su usvojili pravilnu tehniku doskoka i amortizacije pokreta (krutost i popustljivost mišićno-tetivne jedinice), onda se u narednom periodu njihove sportske karijere preporučuju naprednije i specifičnije aktivnosti sa korišćenjem energije istezanja radi poboljšanja sportskih performansi.

Plan i program pliometrijskih vežbi – pliometrijska piramida

Prilikom uvođenja bilo koje veštine u program vežbanja potreban je redosled u progresiji koji omogućava sportisti da usvoji osnovne komponente pre nego što pređe na usvajanje naprednijih kretnji. Razvoj progresivnog sistema zahteva osnovna znanja o faktorima koji utiču na intenzitet pliometrijskih vežbi. Vežbe mogu biti organizovane po redosledu koji obezbeđuje odgovarajući stimulan na sportistu u odnosu na cilj programa i na trenutni tehnički i fizički kapacitet sportiste. Džefris (Jeffreys, 2007) ukazuje na determinante intenziteta pliometrijskih vežbi:

- 1) brzina kretanja – što je veća brzina, veći je intenzitet;
- 2) način kontakta – vežbe sa jednom nogom su intenzivnije nego vežbe sa dve noge;
- 3) amplituda pokreta – sa većom amplitudom pokreta povećava se sila reakcije podloge i intenzitet;
- 4) masa sportiste (ili dodatni teret) – sa većom masom u doskoku povećava se intenzitet;
- 5) vežbe u kojima se sportista kreće iz ekscentričnog u koncentrični pokret (npr. skok u dubinu i odskok) je intenzivniji u pokretu sa samo ekscentričnom kontrakcijom (npr. doskok sa visine).

Generalno, pliometrijske vežbe se vezuju za dve osnovne sposobnosti – skokove i doskoke. Iako su ovo dve bazične veštine, odsustvo adekvatnog razvoja tih veština će negativno uticati na optimalnu primenu pliometrijskih vežbi, ograničavajuće na razvoj sportiste, a takođe će verovatnoća povreda biti veća. U odnosu na evaluaciju intenziteta pliometrijskih vežbi i potrebu da se razviju veštine skokova i doskoka, ovaj autor (Jeffreys, 2007) preporučuje korišćenje pliometrijske piramide kao metode za uvođenje pliometrijskih vežbi u program treninga. To podrazumeva 3 kategorije vežbi, pri čemu svaka može biti dizajnirana u odnosu na cilj i nivo intenziteta.

Prva kategorija (naskok na kutiju)

Ovaj nivo ima za cilj da razvije osnovne skakačke sposobnosti, kao i veoma važnu sposobnost doskoka u kontrolisanim uslovima. Izuzimajući vreme delovanja gravitacione sile i učenje tehnike doskoka, sportiste početnika ili sportiste sa trenutnim poteškoćama u doskoku, sile koje se javljaju u toku doskoka mogu biti

smanjene. Promene visine kutije na koju se naskače može biti izazov za sportiste, a sile doskoka se još uvek mogu svesti na minimum. Naskok jednom nogom, umesto dvema, i dalje može povećati skakačke zahteve sportiste.

Druga kategorija (doskok i zadržavanje)

Ovaj nivo se zasniva na sposobnostima doskoka sportiste razvijenim u prvom nivou, i ima za cilj da razvije sposobnost kontrole ekscentričnih sila. Na početku, vežbe u ovoj fazi mogu biti manje amplitude, a progresija se može obezbediti povećanjem amplitude pokreta, ali i doskokom na jednu nogu umesto na dve. Daljim razvojem tehnike doskoka, ovaj nivo omogućava sportisti da se prilagodi većim silama doskoka (ekscentrično opterećenje) kroz, već naučenu, kontrolu Goldžijevog tetivnog organa. Ovaj nivo, kao i amplitude pokreta u njemu, treba da budu usklađene sa kvalitetom pokreta, a progresija se ne treba vršiti sva dok sportista ne bude u stanju da zadrži položaj uz određenu kontrolu i odgovarajući kontakt stopala. Na primer, kontakt petama može delovati inhibitorno na Goldžijev tetivni organ i sposobnost sportiste da skladišti energiju u tetivama, što je esencijalno za amortizacionu fazu (i trajanje) u toku narednog nivoa (Flanagan & Comyns, 2008). Dalje, kao što je opisano u prethodnom tekstu, ovaj nivo takođe zahteva razvoj mišićne krutosti kroz preaktivacionu napetost i ko-kontrakciju antagonista i zbog toga će biti potrebno nekoliko nedelja za razvoj.

Treća kategorija (skokovi sa kratkom reakcijom)

Nivo započinje pravim pliometrijskim treningom pri čemu se ciklus istezanja – skraćanja koristi u poboljšanju koncentrične faze koja sledi. U ovoj fazi sportista izvodi aktivnosti sa inicijalno niskom amplitudom, gde je cilj skraćanje trajanja kontakta sa podlogom, uz održavanje efikasne tehnike doskoka i kontrole položaja tela. Dakle, progresija se vrši povećanjem amplitude skokova i korišćenja jednonožnih aktivnosti. Vežbe koje uglavnom angažuju skočne zglobove predstavljaju dobar primer skokova sa kratkom reakcijom (u toku ovih vežbi zglob kolena je opružen, a kretanje se izvodi u skočnom zglobu). Neke studije pokazuju da je ukupna krutost noge povezana sa krutošću skočnog zgloba (Arampatzis et al., 2007; Farley & Morgenroth, 1999), stoga takve vežbe mogu obezbediti pametan početak ovog nivoa treninga.

Sportisti koji su prošli kroz ove nivoe trebalo bi da su razvili potrebne veštine koje im omogućavaju da učestuju u kompletnom postepenom pliometrijskom treningu. Odgovarajuće vežbe koji bi dovele do neophodne fizičke adaptacije mogu progresivno da se koriste u programu vežbanja.

Umesto zaključka

Karakter mehaničkog odgovora mišićno-tetivne jedinice na pasivno istezanje zavisi od brzine istezanja. Ukoliko je istezanje brzo, onda je krutost mišićno-tetivne jedinice veća, i obrnuto. Sporo istezanje prouzrokuje manju pasivnu napetost (krutost) za trenutnu količinu istegnutosti nego što je to slučaj sa brzim istezanjem. Opterećenje mišićno-tetivne jedinice u drugim pokretima je još komplikovanije zbog opterećenja koje je promenljivo tokom aktivacije mišića, prethodnog stanja, i vrste mišićne aktivnosti. Sve te varijable određuju opterećenje struktura u toj jedinici. U zavisnosti od karakteristika sporta, mišićno-tetivna jedinica treba da bude ili kruta ili popustljiva kako bi se poboljšale performanse i sprečile povrede. U sportovima u kojima su prisutni eksplozivni pokreti uz učestale i maksimalne pokrete istezanja – skraćanja, poželjna je mišićno-tetivna jedinica koja je dovoljno popustljiva da skladišti i otpušta elastičnu energiju. Istezanje omogućava povećanje popustljivosti tetive i za rezultat ima povećanje kapaciteta tetive u apsorbovanju i otpuštanju energije. Posledično, u ovim sportovima autori sugerišu da su vežbe istezanja važne kao profilaksa u prevenciji povreda i pripremi mišića i tetiva za buduća opterećenja. Kada je mišićno-tetivna jedinica manje popustljiva u ovakvim sportovima, prisutan je rizik od povreda jer tetiva nije u mogućnosti da apsorbuje dovoljno energije, što može dovesti do oštećenja mišića ili tetive. Sa druge strane, kada sportske aktivnosti ne sadrže pokrete istezanja – skraćanja, ili ih sadrže veoma malo, cela ili većina metaboličke energije u mišiću se pretvara u spoljašnji, mehanički rad, bez udela elastične energije apsorbovane u tetivama. U takvim slučajevima, nema potrebe za popustljivom tetivom pošto je količina elastične energije mala. Dodatne vežbe istezanja sportista koji učestvuju u takvim aktivnostima bi posledično povećale popustljivost tetive i smanjile njenu krutost. Smanjena krutost bi narušila performanse i povećala mogućnost nastanka povreda usled opterećenja mekih tkiva u zglobu koji izvodi pokret.

IZJAVA

Autori su svojim izjavama potvrdili nepostojanje bilo kakvog sukoba interesa.

LITERATURA

- Alexander, R.M. (1992). *A model of bipedal locomotion on compliant legs*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B338, 189-198.
- Arampatzis, A., Karamanidis, K., Morey-Klapsing, G., De Monte, G., & Stafilidis, S. (2007). Mechanical properties of the triceps surae tendon and aponeurosis in relation to intensity of sport activity. *Journal of Biomechanics*, 40, 1946-1952.
- Arampatzis, A., Bruggemann, G., & Klapsing, G.M. (2001a). Leg stiffness and mechanical energetic processes during jumping on a sprung surface. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33, 923-931.
- Arampatzis, A., Schade, F., Walsh, M., & Bruggemann, G.P. (2001b). Influence of leg stiffness and its effect on myodynamic jumping performance. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11, 355-364.
- Arampatzis, A., Bruggemann, G., & Metzler, V. (1999). The effect of speed on leg stiffness and joint kinetics in human running. *Journal of Biomechanics*, 32, 1349-1353.
- Baechle, T.R., Earle, R.W., & Wathen, D. (2008). Resistance training. In Baechle, T.R. and Earle, R.W. (eds.). *Essentials of Strength Training and Conditioning* (pp. 395-425). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Biewener, A. A., Corning, W. R., & Tobalske, B.W. (1998). In vivo pectoralis muscle force-length behavior during level flight in pigeons (*Columba livia*). *Journal of Experimental Biology*, 201, 3293-3307.
- Birch, H. L. (2007). Tendon matrix composition and turnover in relation to functional requirements. *International Journal of Experimental Pathology*, 88, 241-248.
- Bijker, K. E., De Groot, G., & Hollander, A. P. (2002). Differences in leg muscle activity during running and cycling humans. *European Journal of Applied Physiology*, 87(6), 556-561.
- Bobbert, M. F., & Casius, L. J. (2005). Is the countermovement on jump height due to active state development? *Medicine and Science in Sport Exercise*, 37, 440-446.
- Bojsen-Moller, J., Magnusson, S.P., Rasmussen, L.R., Kjaer, M., & Aagaard, P. (2005). Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of tendinous structures. *Journal of Applied Physiology*, 99, 986-994.
- Bosco, C., Thihanyi, J., Komi, P., Fekete, G., & Apor, P. (1982). Store and recoil of elastic energy in slow and fast types of human skeletal muscle. *Acta Physiologica Scandinavica*, 116, 343-349.
- Butler, R.J., Crowell, H.P., & Davis, I.M. (2003). Lower extremity stiffness: Implications for performance and injury. *Clinical Biomechanics*, 18, 511-517.
- Cornwell, A., Nelson, A. G., & Sidaway, B. (2002). Acute effects of stretching on neuromechanical properties of the triceps surae muscle complex. *European Journal of Applied Physiology*, 86, 428-434.
- Dalleau, G., Belli, A., Bourdin, M., & Lacour, J.R. (1998). The spring-mass model and the energy-cost of treadmill running. *European Journal of Applied Physiology*, 77, 257-263.
- Derrick, T.R., Cladwell, G.E., & Hamill, J. (2000). Modeling the stiffness characteristics of the human body while running with various stride lengths. *Journal of Applied Biomechanics*, 16, 36-51.
- Dutto, D.J., & Smith, G.A., (2002). Changes in spring-mass characteristics during treadmill running to exhaustion. *Medicine and Science in Sports*, 34, 1324-1331.
- Ettema, G.J., Huijing, P.A., & De Hann, A. (1992). The potentiating effect of pre-stretch on contractile performance of rat gastrocnemius medialis muscle during subsequent shortening and isometric contractions. *Journal of Experimental Biology*, 165, 121-136.
- Ettema, G.J.C. (2001). Muscle efficiency: the controversial role of elasticity and mechanical energy conversion in stretch-shortening cycles. *European Journal of Applied Physiology*, 85, 457-465.
- Farley, C.T., & Morgenroth, D.E. (1999). Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *Journal of Biomechanics*, 32, 267-273.
- Ferris, D., Louie, M., & Farley, C.T. (1998). *Running in the real world: Adjusting leg stiffness for different surfaces*. Proceedings of the Royal Society of London, 265, 898-994.
- Fleck, S. J., & Kraemer, W. J. (2004). *Designing Resistance Training Programs*. Champaign, IL: Human Kinetics, pp. 231-237.
- Finni, T., Komi, P.V., & Lepola, V. (2000). In vivo human triceps surae and femoris muscle function in a squat and counter movement jump. *European Journal of Applied Physiology*, 83, 416-426.
- Finni, T., Ikegawa, S., Lepola, V., & Komi, P. (2001). In vivo behaviour of vastus lateralis muscle during dynamic performances. *European Journal of Sport Science*, 1, 1-13.
- Finni, T., Komi, P.V., & Lepola, V. (2001). In vivo muscle mechanics during locomotion depend on movement amplitude and contraction intensity. *European Journal of Applied Physiology*, 85, 170-176.
- Flanagan, E.P., & Comyns, T.M. (2008). The use of contact time and the reactive strength index to optimise fast stretch-shortening cycle training. *Strength and Conditioning Journal*, 30, 33-38.
- Fukunaga, T., Kurokawa, S., Fukashiro, S. et al. (1996). Muscle fiber behavior during drop jump in human. *Journal of Applied Physiology*, 80, 158-165.
- Granata, K.P., Padua, D.A., & Wilson, S.E. (2001). Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part II. Quantification of leg stiffness during functional hopping tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 12, 127-135.
- Grimston, S. K., Engsberg, J.R., Kloiber, R., & Hanley, D.A. (1991). Bone Mass, External Loads, and Stress Fracture in Female Runners. *Journal of Applied Biomechanics*, 7(3), 293-302.
- Harris, G. R., Stone, M.H., O'Bryant, H.S., Proulx, C.M., & Johnson, R.L. (2000). Short-term performance effects of high power, high force, or combined weight-training methods. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 14, 14-20.

- He, J., Kram, R., & McMahon, T. (1991). Mechanics of running under simulated low gravity. *Journal of Applied Physiology*, 71, 863-870.
- Hill, A.V. (1938). The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings of the Royal Society of London series b*, 126, 136-195.
- Hobara, H., Kimura, K., Omuro, K., Gomi, K., Muraoka, T., Iso, S., & Kanosue, K. (2008). Determinants of difference in leg stiffness between endurance- and power-trained athletes. *Journal of Biomechanics*, 41, 506-514.
- Horita, T., Komi, P. V., Nicol, C., & Kyrolainen, H. (2002). Interaction between pre-landing activities and stiffness regulation of the knee joint musculoskeletal systems in the drop jump: Implications to performance. *European Journal of Applied Physiology*, 88, 76-84.
- Hortobagyi, T., & DeVita, P. (2000). Muscle pre and coactivity during downward stepping are associated with leg stiffness in aging. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 10, 117-126.
- Jeffreys, I. (2007). *Total Soccer Fitness*. Monterey, California: Coaches choice, pp. 137.
- Johnson, B. A., Salzberg, C.L., & Stevenson, D. A. (2011). A Systematic Review: Plyometric Training Programs for Young Children. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 9(25), 2623-2633.
- Komi, P. V. (2003). Stretch-shortening cycle. In *Strength and Power in Sport (2nd ed)*. (pp. 184–202). Komi PV, ed. Oxford, United Kingdom: Blackwell Science.
- Kubo, K., Yata, H., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2006). Effects of isometric squat training on the tendon stiffness and jump performance. *European Journal of Applied Physiology*, 96, 305-314.
- Krpić, D. (2005). *Fizička mehanika*. (treće izdanje ed.). Beograd: Fizički fakultet.
- Kubo, K., Kawakami, Y., & Fukunaga, T. (1999). Influence of elastic properties of tendon structures on jump performance in humans. *Journal of Applied Physiology*, 87, 2090-2096.
- Kubo, K., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2001). Effects of different duration isometric contractions on tendon elasticity in human quadriceps muscle. *Journal of Physiology*, 536, 649-655.
- Kubo, K., Kanehisa, H., Kawakami, Y. et al. (2000). Elasticity of tendon structure of the lower limbs in sprinters. *Acta Physiologica Scandinavica*, 168, 327-335.
- Kubo, K., Morimoto, M., Komuro, T., Yata, H., Tsunoda, N., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2007). Effects of plyometric and weight training on muscle-tendon complex and jump performance. *Medicine and Science in Sports Exercise*, 39, 1801-1810.
- Kuitunen, S., Komi, P. V., & Kyrolainen, H. (2002). Knee and ankle joint stiffness in sprint running. *Medicine and Science in Sports Exercise*, 34, 166-173.
- Labeit, D., Watanabe, K., Witt, C., Fujita, H., Wu, Y., Lahmers, S., Funck, T., Labeit, S., & Granzier, H. (2003). Calcium-dependent molecular spring elements in the giant protein titin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*, 100, 13716-13721.
- Latash, M. L., & Zatsiorsky, V.M. (1993). Joint stiffness: Myth or reality? *Human Movement Science*, 12, 653-692.
- Lee, E. J., Joumaa, V., & Herzog, W. (2007). New insights into passive force enhancement in skeletal muscles. *Journal of Biomechanics*, 40, 719-727.
- Lichtwark, G. A., & Wilson, A. M. (2007). Is Achilles tendon compliance optimised for maximum muscle efficiency during locomotion? *Journal of Biomechanics*, 40, 1768-1775.
- Lichtwark, G. A., & Wilson, A. M. (2005). In vivo mechanical properties of the human Achilles tendon during one-legged hopping. *Journal of Experimental Biology*, 208, 4715-4725.
- Lopes, P. B., Pereira, G., Lodovico, A., Bento, P.C., & Rodacki, A. L. (2016). Strength and Power Training Effects on Lower Limb Force, Functional Capacity, and Static and Dynamic Balance in Older Female Adults. *Rejuvenation Research*, 19(5), 385-393.
- Maganaris, C. N., & Paul, J. P. (1999). In vivo human tendon mechanical properties. *Journal of Physiology*, 521(1), 307-13.
- Maganaris, C. N., & Paul, J. P. (2000). In vivo human tendinous tissue stretch upon maximal muscle force generation. *Journal of Biomechanics*, 33, 1454-1459.
- Marković, G., & Jarić, S. (2007). Positive and negative loading and mechanical output in maximum vertical jumping. *Medicine and Science in Sport and Exercise Science*, 39, 1757-1764.
- McBride, J. M., McCaulley, G.O., & Cormie, P. (2008). Influence of preactivity and eccentric muscle activity on concentric performance during vertical jumping. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23, 750-757.
- McCaulley, G. O., Cormie, P., Cavill, M. J., Nuzzo, J. L., Urbiztondo, Z. G., & McBride, J. M. (2007). Mechanical efficiency during repetitive vertical jumping. *European Journal of Applied Physiology*, 101, 115-123.
- McMahon, T. A., & Cheng, G. C. (1990). The mechanics of running: How does stiffness couple with speed? *Journal of Biomechanics*, 23, 65-78.
- Međedović, B., & Romanov, R. (2017). Nove tendencije u dizajniranju trenaznog procesa mladih. *Tims.Acta*, 11, 65-73.
- Međedović, B. (2018). Dinapenija – pojam, uzroci i posledice. *Tims. Acta*, 12, 123-131.
- Myer, G. D., Ford, K. R., Brent, J. L., & Hewett, T.E. (2006). The effects of plyometric vs. Dynamic stabilization and balance training on power, balance, and landing force in female athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20, 345–353.
- Newton, R. U. & Dugan, E. (2002). Application of strength diagnosis. *Strength and Conditioning Journal*, 24, 50-59.
- Radcliffe, F. (1998). *High – powered plyometrics*. Human Kinetics. USA.
- Roetert, E. P., Ellenbecker, T. S., & Reid, M. (2009). Biomechanics of the Tennis Serve: Implications for Strength Training. *Strength and Conditioning Journal*, 31(4), 35-40.
- Rimmer, E., & Sleivert, G. (2000). Effects of a plyometrics intervention program on sprint performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 14, 295-301.
- Seyfarth, A., Geyer, H., Gunther, M., & Blickhan, R. A. (2002). A movement criterion for running. *Journal of Biomechanics*, 35, 649–655.
- Siff, M.C. (2003). *Supertraining*. Denver, CO: Supertraining Institute, pp. 40-47.

- Spurrs, R. W., Murphy, A. J., & Watsford, M. L. (2003). The effect of plyometric training on distance running performance. *European Journal of Applied Physiology*, 89, 1–7.
- Verkhoshansky, Y.V. (1996). Quickness and velocity in sports movements. *New Studies of Athletics*, 11, 29-37.
- Voigt, M., Bojsen-Moller, F., Simonsen, E. B., & Dyhre-Poulsen, P. (1995). The influence of tendon young's modulus, dimensions and instantaneous moment arms on the efficiency of human movement. *Journal of Biomechanics*, 28, 281-291.
- Williams, D. S., McClay Davis, I., Scholz, J. P., Hamill J., & Buchanan, T. S. (2003). Lower extremity stiffness in runners with different foot types. *Gait and Posture*, 18(6), 511-517.
- Williams, D. S., McClay, I. S., & Hamill, J. (2001). Arch structure and injury patterns in runners. *Clinical Biomechanics*, 16, 341-347.
- Wilson, G. J., Murphy, A. J., & Pryor, J. F. (1994). Musculotendinous stiffness: Its relationship to eccentric, isometric, and concentric performance. *Journal of Applied Physiology*, 76, 2714-2719.
- Wilson, J. M., & Flanagan, E. P. (2008). The role of elastic energy in activities with high force and power requirements: A brief review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22, 1705-1715.
- Zatsiorsky, V. M. & Kraemer, W. J. (2006). *Science and Practice of Strength Training*. Champaign, IL: Human Kinetics, pp. 33–39.
-

Datum prijave: 14.06.2020.

Datum prihvatanja: 14.07.2020.

Kontakt

Bojan Međedović, Fakultet za sport i turizam,
Novi Sad, Radnička 30a
E-mail: bojan.medjedovic@tims.edu.rs

Romana Romanov, Fakultet za sport i turizam,
Novi Sad, Radnička 30a
E-mail: romana.romanov@tims.edu.rs

Jovan Plećaš, Fakultet za sport i turizam,
Novi Sad, Radnička 30a
E-mail: jovan.plecas@tims.edu.rs

Zlatko Ahmetović, Fakultet za sport i turizam,
Novi Sad, Radnička 30a
E-mail: zlatko.ahmetovic@tims.edu.rs