



# STRUKTURALNA, BIOMEHANIČKA I FUNKCIONALNA ANALIZA SMEČA U ODBOJCI

Predrag Nemeć\*,  
Vesna Nemeć,  
Radovan Ilić,  
Miloš Milošević

Univerzitet Singidunum,  
Beograd, Srbija

## Rezime:

U radu je primenom Selspot 3D sistem za praćenje i merenje kretanja i tenziometrijske platforme urađena strukturalna, biomehanička i funkcionalna analiza smeća u odbojci. Strukturalna analiza ukazuje da se smeć može uslovno podeliti u 4 faze: faza zaleta, faza odskoka, faza leta - smeća i faza doskoka. Biomehanička analiza daje sve aspekte operacionalizacije efikasnog smeća. U tom smislu daje u svakoj fazi smeća njegove kinematičke i dinamičke parametre. Funkcionalna analiza ukazuje na to da reverzibilna kontrakcija predstavlja integralni deo svih opisanih pokreta u odbojci, da je jako složena i uslov za šampionska postignuća, da se ona mora posebno učiti i trenirati uz različitu upotrebu uma, trenažnih metoda i sredstava.

## Ključne reči:

informacione tehnologije, Selspot 3D sistem za praćenje i merenje kretanja, faze smeća, reverzibilna kontrakcija.

## 1. UVOD

Danas je gotovo nemoguće bilo koji sportski sistem [1] i njegovo uspešno funkcionisanje, zamisliti bez primene informacione tehnologija. Posebno je nemoguće zamisliti pripremu vrhunskih sportista, posmatrajući je prvenstveno sa aspekta visoke trenažne tehnologije i nastupa sportista na važnim takmičenjima [2, 3, 4]. Isto važi i za savremenu odbojku [5, 6],

U odbojci, za potrebe strukturalne, biomehaničke i funkcionalne analize, kao i za potrebe upravljanja trenažnim procesom, potrebno je upotrebljavati savremene informacione tehnologije. U ovom radu prikazaćemo njenu primenu u strukturalnoj, biomehaničkoj i funkcionalnoj analizi smeća u odbojci [1, 2, 4, 5].

## 2. METODOLOGIJA

Na rezultatima jednog vrhunskog odbojkaša urađena je strukturalna, biomehanička i funkcionalna analiza smeća u odbojci [1, 2, 3, 5]. U tu svrhu korišćen je Selspot 3D sistem za praćenje i merenje kretanja i tenziometrijska platforma. Selspot sistem pruža precizne podatke o merenju

Odgovorno lice:

Predrag Nemeć

e-pošta:

pnemeć@singidunum.ac.rs



mnogih vrsta kretanja pa tako i odbojku i kombinovan sa primenom MultiLab softverskog paketa korišten je za kompletnu analizu podataka smeča. Kamere umrežene u Selspot sistem registruju X i Y kordinate signala, beleže digitalni signal, a zatim šalju podatke u računar radi analize i pisanja izveštaja. 3D analiza je moguća već sa dve kamere dok sistem podržava umrežavanje čak 16 kamera i 120 LED dioda [7]. Osnovna brzina uzorkovanja je 10 kHz, sa dve kamere i 5 LED dioda brzina uzorkovanja je 1000Hz, rezolucija je 0.025% od mernog opsega a nelinearnost detektora je manja od 0.1% opsega [7]. Sistem omogućava i unos 48 analognih kanala koji podržavaju analogne senzore, kao što su senzori sile, EMG elektrode, i slično. Na ovom mestu treba naglasiti da informacione tehnologije nisu nužno digitalne već mogu biti i analogne, dok se izbor jednog ili drugog načina beleženja signala u istraživanjima zasniva na njihovoj ontološkoj razlici [8].

Podaci prikupljeni kamerama i drugim senzorim dalje su sinhronizovani od strane sistema. MultiLab je programski paket visokog nivoa koji izvodi sve proračune za uglove, brzine, ubrzanja, trenutke i slično i pruža prilagođene izveštaje koji sadrže sve informacije potrebne za sofisticiranu analizu kretanja [7]. Uz pomoć tenziometrijske platforme merila se produkcija mišićne sile u smeču [1, 5]. Piezoelektrični senzori ugrađeni u platformu velikom brzinom (1000 Hz) registruju kompresione sile tokom izvođenja odskoka i omogućavaju detaljnu dinamičku analizu svih faza skoka i visoku validnost svakog izvedenog pokreta. Osim standardnih parametara, tenziometrijska platforma omogućava praćenje dinamike i tranzitivnosti razvoja sile, brzinu izvođenja skoka, stepen dubine odskoka (doskoka), efekte istežanja, sposobnosti brzog smenjivanja ekscentrične i koncentrične kontrakcije kao i transfer elastične energije.

### 3. STRUKTURALNA ANALIZA SMEČA

Jedan od najvažnijih tehničko-taktičkih elemenata u odbojci predstavlja smeč [5, 6]. Njegova uloga u nadigravanju može da se višestruko ispoljava. Pozicija gde se smeč izvodi u početku nadigravanja je svakako servis. Kako se igra odvija tako je važnost smeča sve više dolazila do izražaja. Osim smečiranja iz zone napada u poslednje vreme sve češće se viđa da u odlučujućim akcijama smeč izvodi korektor iz zone odbrane. Iako je tačno da postizanje poena u igri implicira po pravilu više ili manje složenu motoričku aktivnost nekoliko igrača, što može slikovito da se predstavi kao lanac čija snaga zavisi o snazi najslabije karike, ipak poslednja karika tog

lanca najčešće predstavlja smeč kojim se pokušava postići poentiranje. Sam smeč može bitno smanjiti verovatnoću postizanja poena, iako su sve prethodne radnje izvedene besprekorno, kao što može i da nadoknadi propuste koji su mu prethodili.

Smeču na mreži prethodi više radnji, a najvažnija je zamah ruku i postavljanje šake pre udarca po lopti. Sve ostalo ima za cilj da obezbedi najbolje uslove za uspešno izvođenje. Osim toga, ova analiza će prikazati smeč - servis sa daleko visokim skokom i pravolinijski smeč prema mreži u pravcu kretanja koji se najčešće sreće u igri.

Smeč se odvija kroz četiri faze [5, 6]. Međutim u kinematičkoj analizi (Slika 1) se detaljnije opaža svako kretanje koje se dešava u pojedinoj fazi.

#### *Prva faza - Zalet*

Prva faza predstavlja uvodni deo udarca koji se vrši pri napadu [5, 6]. Zalet je dužine od 3 do 5m koja se prelazi sa dva ili tri koraka. On se tretira kao horizontalna brzina. Ponekad se ova daljina može preći i sa manje koraka. Kretanje koje igrač koristi može biti pod uglom, pravolinijsko ili korigovano, u zavisnosti od putanje lopte. Kod desnorukog igrača, ukoliko se govori o kretanju koje sadrži četiri koraka, prvi korak čini desna noga. Ovaj korak je mali i vrši se pre nego što igrač sazna putanju lopte. U ovom slučaju se obično prilikom gaženja ne oslanja na petu. Drugi, levi korak je veći i on je najvažniji jer njime igrač određuje ritam svog kretanja. Gazi se sa pete na prste i u trenutku vršenja ovog pokreta igrač uočava putanju leta lopte. Treći, odnosno desni, korak je posle malog naskoka koji sledi nakon drugog koraka. Ovaj korak se vrši skoro istovremeno sa četvrtim (levim) korakom i on priprema odskok. Poslednji korak prekida pravolinijsko kretanje, stopalo je okrenuto blago ka unutra i ono daje impuls pri odskoku.

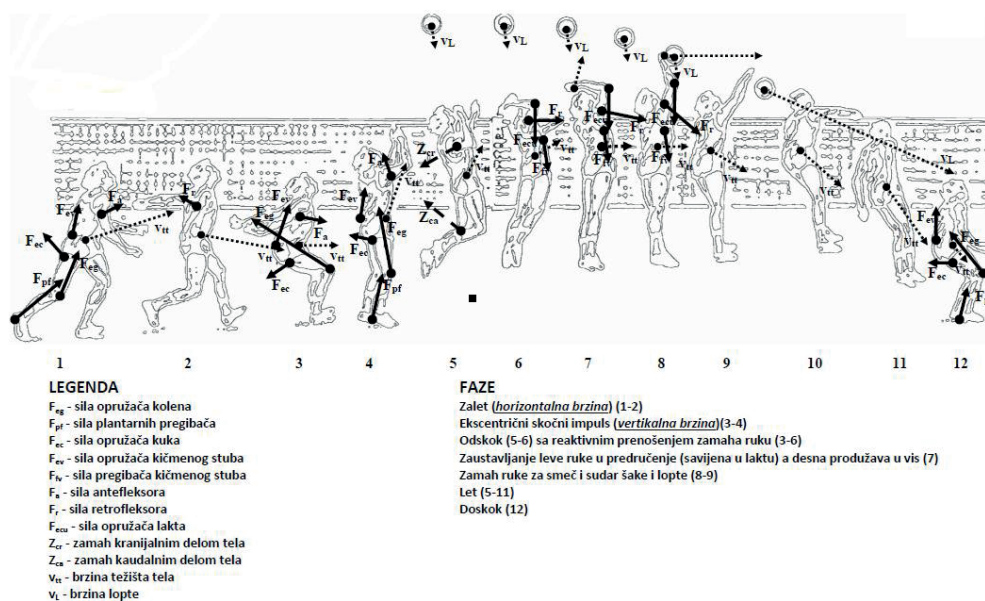
Aktivna je muskulatura koja pripada kinetičkom lancu ekstenzora na telu sportiste, a posebno mišići plantarni fleksori u gornjem skočnom zglobu, zatim mišićna grupa ekstenzora u zglobu kolena i ekstenzori u zglobu kuka. Ove mišićne grupe se kod zaleta u fazi zadnjeg odskoka angažuju u koncentričnom režimu naprezanja. Mišićne grupe koje pripadaju ekstenzorima kičmenog stuba se u ovoj fazi naprežu u izometrijskom režimu. Ove motoričke aktivnosti prati i odgovarajući rad gornjih ekstremiteta koji u većoj meri igra stabilizujuću, odnosno kompenzatornu ulogu, pa se neće posebno analizirati.



## Druga faza - odskok

Druga faza - noga koja gaji poslednja u zaletu stvara ekscentrični skočni impuls i određuje visinu skoka [5, 6]. Ruke se nalaze iza tela i vrše reaktivno prenošenje zamaha a telo je nagnuto unapred. Ugao između nadkolenice i podkolenice je optimalan. Od tog trenutka počinje skok. Noge se iz polučučnja ispružaju, ruke prolaze pored tela i podižu se prema gore velikom brzinom i težište tela se podiže. Vreme između pliometrije i

miometrije mora biti svedeno na minimum. U tom trenutku ugao u kom se koleno nalazi je između 110 i 120 stepeni i razlikuje se od igrača do igrača u zavisnosti od anatomske razvijenosti tela. Ruke se kreću od zaručenja ka predručenju, i na kraju gore stižu do nivoa glave, gde, kod desnorukih, desna ruka ide u vis a leva ruka se u predručenju savija u laktu, pete se prve spuštaju na tlo, a posle njih prsti. Ispravnost skoka zavisi od položaja težišta tela unazad pre skoka. To se obično reguliše visinom i daljinom skoka prethodne faze i gaženjem na pete.



Slika 1.

Biomehanički posmatrano [1, 2, 4] u ovoj se fazi vrši transformacija kinetičke energije zaleta koja pretežno ovisi o brzini kretanja igrača, preusmeravanjem vektora brzine kretanja težišta tela, u potencijalnu energiju koja je određena visinom na koju će se u bespotpornoj fazi (fazi leta) podići vertikalno težište tela. Ovo preusmeravanje predstavlja u fizičkom pogledu promenu orijentacije i intenziteta vektora količine kretanja, što je ekvivalentno zbirnom impulsu sila koje su u fazi odskoka delovale na težište, odnosno odskočnom impulsu. Zahtev za preusmeravanje vektora količine kretanja težišta tela je uslovljen i zahtevom da se u fazi leta ne dodirne mreža, što za posledicu ima i specifično postavljanje stopala u odnosu na smer kretanja težišta tela i ekscentrično delovanje lanca ekstenzora donjih ekstremiteta. Delovanje aktivne muskulature može da se posmatra u fazi amortizacije i fazi odskoka. U prvoj - amortizacionoj fazi, prevladuje angažman mišićnih grupa

ekstenzora u zglobovima kolena i kuka u ekscentričnom režimu naprežanja. U ovoj fazi se mišići ekstenzori kičmenog stuba naprežu u izometrijskom režimu, što prati angažman mišića antefleksora koji započinju energičan zamah gornjim ekstremitetima.

U fazi odskoka se ekstenzorima u zglobu kolena i kuka pridružuju i plantarni fleksori u gornjem skočnom zglobu. Ovaj kinetički lanac ekstenzora se u ovoj fazi napreže u koncentričnom režimu, dok mišići opružaći kičmenog stuba izometrijskom kontrakcijom održavaju stabilnost trupa.

## Treća faza - faza leta

Treća faza - posle odvajanja nogu od tla počinje faza leta [5, 6]. U ovoj fazi dolazi do reaktivnog prenošenja zamaha gornjim ekstremitetima koji je izvršen za vreme

faze odskoka (Pozicija 5.). Ovo se manifestuje dovođenjem tela u položaj hiperekstenzije u kičmenom stubu i zglobu kuka čime se stvaraju preduslovi za efikasan smeč. Naime, iz ovakvog početnog položaja je moguće na dužem putu delovati silama koje treba da ubrzaju ruku kojom se smečira, čime se povećava udarni impuls i samim tim početna brzina lopte nakon smeča. Ova faza je povezana sa uspešnim računanjem leta lopte za vreme zaleta. Ruke nastavljaju kretanje do visine glave dok se leva ruka zaustavlja ispred tela a desna nastavlja kretanje iza glave, prolazi pored glave. S tim počinje faza napada. Snaga mišića ramenog pojasa je ona koja odlučuje koju tehniku koristimo. Pominjemo tri vrste tehnike:

- ◆ kad lakat prethodi u kretanju u nazad i prolazi pored ramena ili iznad njega
- ◆ ruka se zaustavlja kad lakat prolazi ispod ramena i kretanje je skoro kružno
- ◆ ruka se podiže pravo gore pa se onda savija u laktu i šaka se pokreće unazad.

U fazi leta telo sportiste predstavlja konzervativan sistem koji nema mogućnost da sile koje se generišu kompenzuje silama reakcije podloge, odnosno drugog čvrstog oslonca. Iz tog razloga se virtuelni oslonac za potrebno biomehantičko delovanje dobija reaktivnim prenošenjem količine kretanja, odnosno zamaha pojedinih segmenata tela. Tako se ključni pokret retrofleksije kojeg prati opružanje u zglobu lakta i pregibanje u zglobu šake, kompenzuje pokretom fleksije kičmenog stuba. Sve mišićne grupe uključene u sinhrono izvođenje ovog pokreta se naprežu u koncentričnom režimu rada. Neophodno je konstatovati da brzina izvođenja smečiranja isključivo zavisi od periferne brzine šake.

#### Četvrta faza - doskok

Četvrta faza - doskok igrača se dešava na prste obe noge istovremeno, kolena su savijena, daljina skoka zavisi od brzine tela za vreme odskoka [5, 6]. Lopte koje su blizu mreže ne dozvoljavaju slobodno kretanje tela i praćenje ruke posle udarca lopte. Najbolja tehnika se vrši prilikom smečiranja lopte koje su udaljene od mreže.

Kod doskoka se pretežno angažuju mišići plantarni fleksori u gornjem skočnom zglobu, ekstenzori u zglobovima kolena i kuka u ekscentričnom režimu naprežanja, dok se opružači kičmenog stuba izometrijskim naprežanjem angažuju na održavanju stabilnosti trupa.

## 4. BIOMEHANIČKA ANALIZA SMEČA

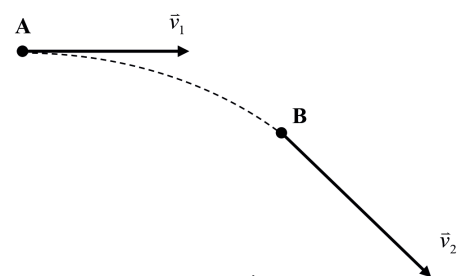
Cilj efikasnog smečiranja predstavlja izvođenje ovog tehničko-taktičkog elementa odbojkaške igre na način kojim se protivnikove šanse blokiranja, odnosno odbrane, minimiziraju. Ako se posmatra izolovano motorička aktivnost igrača koji smečira (Slika 1), postizanje navedenog cilja se operacionalizuje na sledeći način:

- ◆ udarac po lopti izvršiti u optimalnoj tački trajektorije kojom se lopta kreće,
- ◆ udarac po lopti izvesti najvećom mogućom brzinom (snagom),
- ◆ uputiti loptu u željenom smeru.

Biomehantički aspekti operacionalizacije efikasnog smeča su mnogobrojni [1, 2, 4]. U prvom redu je potrebno izvršiti pravilnu procenu prostorno vremenskih parametara koji su relevantni za realizaciju smeča. To podrazumeva izvršiti procenu kretanja lopte i rezultate procene dovesti u vezu sa procenom kretanja sopstvenog tela sa ciljem koordinisanog delovanja sa postizanjem maksimalnih efekata. Pored toga sopstvene motoričke radnje treba da budu izvršene na najbrži i naefikasniji način, kako bi se predupredilo efikasno blokiranje napada od strane protivnika. Iz tog razloga je potrebno da se smanji u maksimalnoj mogućoj meri zalet neophodan za postizanje visokog odskoka neophodnog za kvalitetno smečiranje.

Odskok koji prethodi smečiranju svojom visinom u značajnoj meri utiče na efikasnost smečiranja. Odskok se izvodi sunožnim odrazom koji prati kratak i efikasan zalet. Zalet je potreban da bi se za vreme faze odskoka izmenio vektor količine kretanja težišta tela pod uticajem odraznog impulsa.

Drugi Njutnov zakon definiše da je promena količine kretanja tela u jedinici vremena proporcionalna sili koja je delovala na telo (Slika 2.).



Slika 2.



Ako je količina kretanja ( $K$ ):

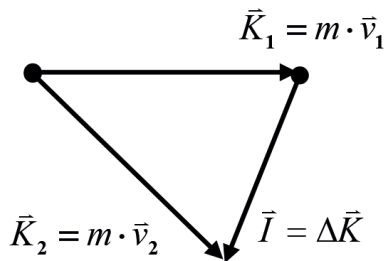
$$\vec{K} = m \cdot \vec{v} \quad (1)$$

gde je  $K$  - količina kretanja,  $m$  - masa tela i  $v$  - brzina kretanja tela, onda se drugi Njutnov zakon može prikazati kao:

$$\vec{F} = \frac{m \cdot \vec{v}_2 - m \cdot \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{K}}{\Delta t} \quad (2)$$

gde je  $F$  - sila.

Ova relacija grafički može da se prikaže na sledeći način:



Slika 3

iz čega sledi:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = \Delta \vec{K} \quad (3)$$

Veličina sa leve strane znaka jednakosti predstavlja impuls sile. Ova relacija se zbog naknadne analize dinamike odskoka može prikazati i na sledeći način:

$$\vec{I} = \int_{t_i}^{t_f} \vec{F}(t) \cdot dt \quad (4)$$

gde je  $I$  - impuls sile koji manifestuje sila  $F(t)$  u vremenskom intervalu  $\Delta t = t_f - t_i$ .

Ove relacije se mogu prikazati i na sledeći način:

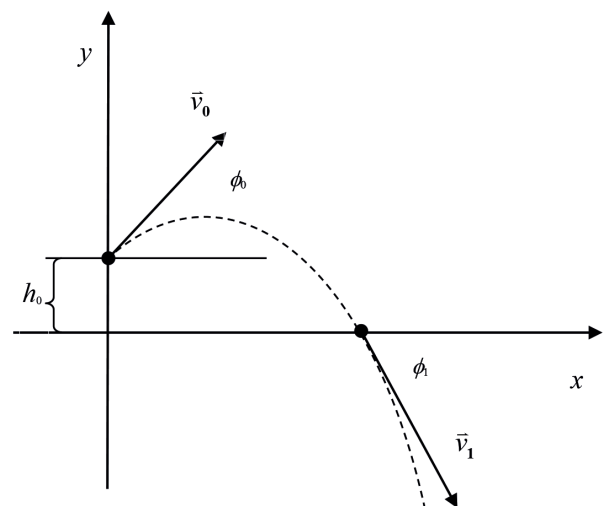
$$\vec{F} = \frac{m \cdot \vec{v}_2 - m \cdot \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (5)$$

odnosno:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (6)$$

Dakle, ukoliko se tokom odskoka realizuje odrazni impuls odgovarajućeg intenziteta, onda se može očekivati daleko viši odskok ukoliko se težište tela igrača prethodno kretalo određenom brzinom, nego ukoliko se odskok vrši iz mesta. Naime, delovanjem odraznog impulsa je moguće da se promeni smer vektora količine kretanja i na taj način doprinese većoj početnoj brzini koju će težište tela imati u trenutku kada igrač napušta podlogu. Veća početna brzina će imati za rezultat i veću vertikalnu komponentu koja direktno uslovljava visinu odskoka.

Ovo proizlazi iz opštih jednačina koje definišu kinematiku materijalne tačke (težišta tela) kod kosog hica u opštem slučaju (Slika 4.):



Slika 4.

$h_0$  - početna visina (razlika nivoa) kod kosog hica sa razlikom nivoa

$\phi_0$  - elevacioni ugao

$\phi_1$  - finalni ugao

$v_0$  - početna brzina težišta igrača

$v_1$  - finalna brzina težišta igrača

Ubrzanje praćene tačke (težišta tela) kod kosog hica sa razlikom nivoa po vertikali je rezultat delovanja sile zemljine teže i odgovara ubrzanju sile zemljine teže:

$$\ddot{y} = -g \quad (7)$$



gde je  $\ddot{y}$  - vertikalna komponenta ubrzanja;  $g$  - ubrzanje sile zemljine teže ( $9.80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Ubrzanje praćene tačke (težišta tela) po horizontali je jednako nuli pošto za vrijeme faze leta na telo ne deluju sile u horizontalnom smeru (podrazumeva se zanemarivanje delovanja sile otpora vazduha):

$$\ddot{x} = 0 \quad (8)$$

gde je  $\ddot{x}$  - vertikalna komponenta ubrzanja.

Iz relacije 7. sledi da je vertikalna komponenta brzine kretanja određena izrazom:

$$\dot{y} = v_{0y} - g \cdot \Delta t \quad (9)$$

gde je  $\dot{y}$  - vertikalna komponenta brzine;  $\Delta t$  - vremenski interval protekao od početka kretanja;  $v_{0y}$  - vertikalna komponenta početne brzine kod kosog hica određena izrazom:

$$v_{0y} = v_0 \cdot \sin \phi_0 \quad (10)$$

gde je  $\phi_0$  - elevacioni ugao kod kosog hica.

Iz relacije 8. sledi da je horizontalna komponenta brzine kretanja određena izrazom:

$$\dot{x} = v_{0x} = v_0 \cdot \cos \phi_0 \quad (11)$$

gde je  $v_{0x}$  - horizontalna komponenta početne brzine kod kosog hica.

Na osnovu relacije 9. položaj tačke čije se kretanje posmatra po vertikali je određen izrazom:

$$y = h_0 + v_0 \cdot \sin \phi_0 \cdot \Delta t - \frac{g \cdot \Delta t^2}{2} \quad (12)$$

gde je  $h_0$  - razlika nivoa kod kosog hica.

Na osnovu relacije 11. položaj tačke čije se kretanje posmatra po horizontali je određen izrazom:

$$x = v_0 \cdot \cos \phi_0 \cdot \Delta t \quad (13)$$

Trajanje kosog hica sa razlikom nivoa je određeno relacijom:

$$\Delta t = \frac{v_0 \cdot \sin \phi_0 + \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0 + v_0^2 \cdot \sin^2 \phi_0}}{g} \quad (14)$$

Iz navedenih relacija se dobija izraz za izračunavanje dometa kosog hica:

$$x = v_0 \cdot \cos \phi_0 \cdot \left( \frac{v_0 \cdot \sin \phi_0 + \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0 + v_0^2 \cdot \sin^2 \phi_0}}{g} \right) \quad (15)$$

iz kojeg se vidi da domet kod kosog hica sa razlikom nivoa ovisi o veličini razlike nivoa, elevacionom uglu i veličini početne brzine.

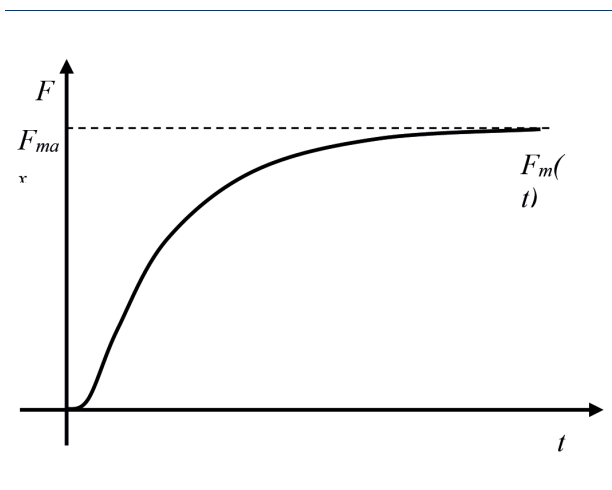
Ugao pod kojim se kreće težište tela u trenutku završetka kosog hica određen je sljedećom relacijom:

$$\phi_1 = \arctg \left( \frac{v_{0y} - g \cdot \Delta t}{v_{0x}} \right) \quad (16)$$

Inspekcijom gore prikazanih matematičkih relacije koje određuju ponašanje materijalne tačke (težišta tela) kod kosog hica u opštem slučaju, ukazuju na ključni značaj vertikalne komponente početne brzine u trenutku napuštanja podloge (jednačina 12.), jer je visina na koju će težište tela igrača da se popne u bezpotpornoj fazi leta, direktno proporcionalna produktu početne brzine i sinusu ugla pod kojim se težište tela kreće u trenutku napuštanja podloge.

Drugi aspekt koji je od posebnog značaja kada se analizira značaj i doprinos zaleta na visinu odskoka koju igrač izvodi je vezan za biomehaniku mišićne kontrakcije. Naime, mehaničko ponašanje aktivnog mišića, ili mišićne grupe, karakteriše i fenomen vremenske zavisnosti nivoa ispoljenih sila. Naime, intezitet sile kojom mišić deluje na svojim pripojima nije konstantan od trenutka uključenja mišića do trenutka u kojem zbog iscrpljenja energetske rezervi dolazi do pada nivoa sile zbog pojave zamora.

Mišićna se sila postepeno razvija u vremenu od trenutka početka kontrakcije do trenutka u kojem se manifestuje maksimalna mišićna sila (Slika 5.).

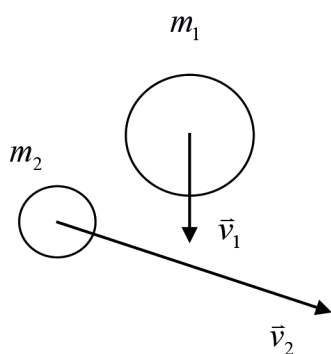


Slika 5.

$$F_m(t) = F_{max} \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t}) \quad (17)$$

Ovu osobinu mišćne kontrakcije kod naprežanja mišića u izometrijskim uslovima opisuje eksponencijalna kriva čiji parametar  $k$  tzv. gradijent sile, opisuje svojstvo koje se naziva eksplozivnošću i predstavlja jednu od komponenti balističkog mišićnog potencijala.

Ukoliko se sunožni odskok vrši iz mesta onda se mišić uključuje u vremenskom trenutku koji odgovara trenutku u kojem sam pokret odskoka započinje. Ukoliko početku odskoka prethodi amortizaciona faza u kojoj mišići prvo treba da svojim impulsom anuliraju količinu kretanja nastalom kao posledicom zaleta, onda se u početnom položaju za odskok aktuelni mišići nalaze već u značajno aktiviranom stanju. Iz tog razloga će isti mišići u odskoku kojem prethodi zalet imati daleko veće impulse sila koje će da manifestuju, od impulsa sila koje bi mogli da relaizuju odskokom iz mesta.



Slika 6.

Sam odskok se vrši sinhronim delovanjem više različitih mišićnih grupa. Njihov je cilj maksimalno moguće podizanje težišta tela u fazi odskoka za što kraći vremenski period. U tome učestvuju pored plantarnih fleksora u gornjem skočnom zglobu, ekstenzora u zglobu kolena i ekstenzora u zglobu kuka i mišići antefleksori u zglobu ramena, jer zamahom ruku i podizanjem težišta gornjih ekstremiteta dolazi i do ukupnog podizanja težišta tela igrača. Kao stabilizatori tokom trajanja odskoka deluju mišići opružači kičmenog stuba, čime se efekat zamaha ruku prenosi na kaudalne regije tela.

U fazi leta je potrebno da se igrač pripremi za snažan udarac po odbojkaškoj lopti. Shematski ovo može da se posmatra kao sudar dva elastična tela koje predstavlja šaka igrača i lopta (Slika 6.). Rezultujuća kinetička energija lopte nakon sudara šake sa loptom će biti jednaka zbiru kinetičkih energija šake i lopte pre sudara.

Kinetička energija šake je proporcionalna masi i kvadratu brzine kojom se težište šake kreće (jednačina 18.).

$$E_k = \frac{m \times v^2}{2} \quad (18)$$

iz čega sledi da je potrebno tehnikom udarca povećati masu koja učestvuje u sudaru, kao i njenu brzinu.

Ovo se dobija sinhronim delovanjem mišića pregibača u zglobu kuka koji trup igrača iz položaja kojeg u fazi leta karakteriše hiperekstenzija kičmenog stuba, dovodi u položaj fleksije u zglobu kuka i simultane fleksije kičmenog stuba pod dejstvom pregibača kičmenog stuba. Na taj način se referentni koordinatni sistem vezan za centar zgloba ramena ruke koja udara po lopti, ubrzava i u trenutku sudara šake sa loptom rezultujuća brzina predstavlja zbir brzina koje su proizvedene delovanjem pregibača u zglobu kuka i pregibača kičmenog stuba s jedne strane i delovanjem retrofleksora u zglobu ramena aktivne ruke.

Sam pokret ruke koja udara po lopti predstavlja u suštini rotaciono kretanje sistema nadlaktica - podlaktica sa centrom rotacije u zglobu ramena u kojem mišićna grupa retrofleksora predstavlja osnovni aktuator pokreta. Brzina šake se određuje u skladu sa sledećim izrazom:

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (19)$$

gde je  $v$  - brzina kretanja šake,  $\omega$  - ugaona brzina kretanja sistema nadlaktica - podlaktica i  $r$  - udaljenost šake od centra rotacije.



Učestvujuća masa u sudaru šake sa loptom se povećava izometrijskom kontrakcijom mišića pregibača šake, opružača u zglobu lakta i retrofleksora u zglobu ramena, čime se masa celog tela unosi u udarac koje se izvodi.

## 5. FUNKCIONALNA ANALIZA SMEČA

Svi pokreti u smeču sastoje od ekscentričnih i koncentričnih faza u kojima skraćanju mišića predhodi, posebno kod vrhunskih odbojkaša, njegovo naglo izduženje (Slika 1). Kombinacija ekscentrično koncentrične kontrakcije (ciklus) u opisanim pokretima naziva se reverzibilna kontrakcija [4, 5]. U ekscentrično koncentričnom ciklusu u fazi skraćivanja (koncentrična kontrakcija) ostvaruje se veća sila nego pojedinačno u ekscentričnoj ili koncentričnoj kontrakciji mišića iz nekoliko razloga. Prvo, u najvišoj tački ciklusa, u trenutku kada prestaje izduživanje a počinje skraćivanje mišića, sila se razvija u izometrijskim uslovima. Drugo, obzirom da sila počinje da raste u ekscentričnoj fazi, vreme u kome je moguće generisati silu u reverzibilnoj kontrakciji se produžuje. Treće, na nivo sile utiče mišićno tetivna elastičnost (akumulacija elastične energije u fazi izduživanja mišića i tetiva) i četvrto refleksna kontrakcija mišića. Već je rečeno da se dužina svih mišića koji učestvuju u smeču menja ali se naglo menja i njihov nivo sile. To je posebno izraženo kod opružača nogu nakon kontakta sa tlom u doskocima ili doskok odskocima. Dakle, mišići se forsirano izdužuju a u isto vreme se jako povećava njihova napetost. Te promene u isto vreme kontroliše i delimično održava u ravnoteži zajedničko dejstvo dva motorička refleksa: refleks na istezanje, održavajući optimalnu dužinu mišića i refleks Goldžijevog tetivnog organa, sprečavajući izuzetno veliko i štetno mišićno naprezanje. Ekscentrično pražnjenje ka mišiću u fazi izduživanja modifikuje se zajedničkim delovanjem dva refleksa, refleksa na istezanje i tetivnog Goldžijevog refleksa. Refleks na istezanje ima pozitivno dejstvo (povećanjem pražnjenja) a Goldžijev refleks negativno (inhibitorno) eferentno dejstvo i njihovo dejstvo je mera ispoljene sile. Ono što je važno za učenje reverzibilne kontrakcije pri velikim mišićnim naprezanjima u odbojci je da aktiviranje Goldžijevog tetivnog organa sprečava dalju aktivnost mišića odnosno koncentričnu kontrakciju jer sprečava eferentni priliv u mišić. Međutim, u doskocima sa amortizacijom ili blokadom, doskok odskocima, naglom izduženju mišića pri servisu, usled mogućnosti narušavanja integriteta organizma umrežuje amplifikatorskim i dezinhibicionim dejstvima na različitim nivoima. U tom slučaju retikularni sistem

počinje da deluje amplifikatorski povećavajući eferentni priliv. Zatim se centralno inhibiraju Renshaw-ovi inhibitorni interneuroni što rezultira slobodnim prolazom povećanog eferentnog konsektivnog priliva impulsa. I periferno se inhibira Goldžijev tetivni organ čime se skida poslednja smetnja povećanom prilivu eferentnih impulsa u mišić. Neuralna dezinhibicija, iz rečenog uslova, utiče na porast refleksa na istezanje (skraćuje se vreme latencije refleksa a povećava se brzina i nivo generisane sile u refleksu). Dalje, neuralna dezinhibicija uslovljava povećanja brzine uključenja i nivoa sinhronizacije rada motornih jedinica mišića, promenu obrazca uključenja motornih jedinica pri čemu se prve uključuju motorne jedinice najvećeg praga paljenja i sile (unutarmišićna koordinacija) i reprogramiranje (povećanjem) granice sile svih motornih jedinica iznad maksimuma izmerenog na standardnim testiranjima. Dakle, najveći uticaj enormnom povećanju sile uz skraćivanje vremena njenog generisanja u reverzibilnoj kontrakciji u svim fazama smeča ima neuralna komponenta mišićne kontrakcije, u prvom redu dezinhibicioni proces na svim nivoima. Najveći izazov šampionskom umu u učenju i vladanju reverzibilnom kontrakcijom je učenje i vladanje dezinhibicionim procesom u reverzibilnoj kontrakciji i ako na testiranjima imaju mnogo veće nivoe maksimalne sile od onih koji dobro vladaju reverzibilnom kontrakcijom, po pravilu od njih imaju slabiji servis, smeč, skokove i slabije doskok odskoke zbog neobučenosti, pored ostalog i u savladavanju efekata Goldžijevog tetivnog refleksa u fazi koncentrične kontrakcije. S obzirom na to da reverzibilna kontrakcija predstavlja integralni deo svih opisanih pokreta, da je jako složena i uslov za šampionska postignuća, ona se mora posebno učiti i trenirati uz različitu upotrebu uma, trenajnih metoda i sredstava. Naravno, neki od opisanih pokreta mogu se realizovati samo uz pomoć koncentrične kontrakcije ali će onda svi efekti biti dosta slabiji.

## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu urađenih analiza smeča u odbojci (strukturalna, biomehantička i funkcionalna) primenom kamere visoke rezolucije i tenziometrijske platforme može se konstatovati sledeće. Rezultati strukturalne analize ukazuju da se smeč može uslovno podeliti u 4 faze: faza zaleta, faza odskoka, faza leta i faza doskoka. Rezultati biomehantičke analize daju sve aspekte operacionalizacije efikasnog smeča u odbojci. U tom smislu, prikazani su u svakoj fazi smeča njegovi kinematički i dinamički





parametri. Rezultati funkcionalne analize ukazuje na to da reverzibilna kontrakcija predstavlja integralni deo svih opisanih pokreta u odbojci. Da bi rečena kretanja odbojkaša imala šampionske odlike u njihovoj totalnoj, vrhunskoj samoaktuelizaciji na takmičenjima, reverzibilna kontrakcija treba da što kraće traje uz velike količine generisane sile. Uvećanje sile i skraćenja vremena reverzibilne kontrakcije svih mišića protagonista servisa i smeča predstavlja rezultat inhibicije Renshaw – ovih interneurona, inhibicije refleksa Goldžijevih organa, porasta refleksa na istezanje, skraćenja vremena smenjivosti ekscentrične i koncetrične kontrakcije, povećanja brzine i sinhronizacije uključivanja motornih jedinica, poboljšanja unutar i međumišićne koordinacije, odnosno reprogramiranja granica sile motornih jedinica, što pretpostavlja povećan i sinhron priliv impulsa i promenu obrasca regrutovanja motornih jedinica. S obzirom na to da reverzibilna kontrakcija predstavlja integralni deo svih opisanih pokreta, da je jako složena i uslov za šampionska postignuća, ona se mora posebno učiti i trenirati uz različitu upotrebu uma, trenažnih metoda i sredstava.

## LITERATURA

- [1] P. Gavrilović, Komparativna analiza karakteristika prelaznog režima generisanja mišićne sile kod sportista različite sportske orijentacije pri voljnim kontrakcijama u dinamičkim uslovima naprezanja mišića. [Comparative analysis of transitional regime of force development in athletes competing in different sports with willing contractions and dynamic muscle work. In Serbian.]. PhD Thesis, Belgrade: Faculty of Sport and Physical Education, 1992.
- [2] V. Ivančević & T. Ivančević, Natural biodynamics. Singapore: World Scientific, 2006.
- [3] M. Milošević & M. Milošević, Physical Preparation of Elite Athletes: Standardization of Management Processes. Belgrade: APP, 2010.
- [4] M. Milošević & M. Milošević, Special physical education: Textbook on the management of the construction of the physical integrity and capacity of police officers. Saarbrücken, Saarbucksen: Lambert Academic Publishing, 2014.
- [5] P. Nemeč, M. Milošević, V. Nemeč & M. Milošević, Production and development of muscle force in elite male volleyball players' spike. Sport Science, 2016, 9(2), 32 – 40.
- [6] D. Tomić & P. Nemeč, Volleyball in theory and practice, Belgrade: SIA. 2012.
- [7] M. Berger & J. Westermarck, J. Selspot 3-D motion analysis system, Proceedings SPIE 1356, Image-Based Motion Measurement, La Jolla, United States. 1990.
- [8] M. Milosevic, Srpski film u doba novih medija, Odbranjena doktorska disertacija, Beograd: Fakultet dramskih umetnosti. 2019.