بهینه‌سازی الگوی شوت روی پای فوتبال براساس سرعت توپ

مصطفی حاج لطفعلیان[۱]، حیدر صادقی[۲]، سروش باقری کودکانی[۳]

۱. دانشجوی دکتری بیومکانیک ورزشی دانشگاه خوارزمی *
۲. استاد دانشکدهٔ تربیت‌بدنی و علوم ورزشی دانشگاه خوارزمی
۳. کارشناس ارشد بیومکانیک ورزشی دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۴/۳۰

چکیده

از تحلیل تکنیک ورزشکاران نخبه و استخراج پارامترهای سینماتیک و سینتیک به‌عنوان روشی برای تعیین الگوی تکنیک بهینه یاد می‌شود. هدف این مطالعه، یافتن الگوی بهینهٔ شوت فوتبال براساس حداکثر سرعت شوت با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی براساس روابط حاکم بر حرکت بود. مزیت این روش درمقایسه با روش‌های تجربی، امکان تغییر تک‌تک متغیرها، کم‌هزینه‌بودن و اجرای مدل برای دفعات بسیار زیاد بود. طبق نتایج پژوهش، علی‌رغم وجود اختلاف معنادار در الگوی حرکتی هر سه مفصل بررسی‌شده، بین شوت بهینه و شوت آزمودنی‌ها و افزایش ۶۲/۵٪ در سرعت شوت، شباهت الگوی حرکتی شوت بهینه با مطالعات تجربی گذشته و بررسی گشتاورهای ایجادشده در مفاصل، نشان‌دهندهٔ قابل‌اجرا بودن این الگو برای انسان و صحت حل بهینه است. به کمک مدل ساخته‌شده در این مطالعه می‌توان با مداخلهٔ به‌موقع اندام‌ها و عضلات در حرکت، گشتاور وابسته به حرکت را در اندام دور از تنه تاحدی که مفاصل بتوانند گشتاور ایجادشده را تحمل و به توپ منتقل کنند، افزایش داد؛ بنابراین، لازم است عضلات تقویت شوند و هماهنگی عصبی عضلانی نیز افزایش یابد. درنهایت، باید گفت این مدل به‌عنوان یک ابزار می‌تواند در اختیار مربیان قرار گیرد تا به کمک آن الگوی بهینهٔ حرکت هر فرد را به‌صورت اختصاصی به وی آموزش دهند.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، مدل‌سازی دینامیکی، الگوی حرکتی، شوت فوتبال

*نویسنده مسئول : **Email** : mostafa.H.Lotfalian@gmail.com

مقدمه

حرکت، موضوع علم دینامیک می‌باشد و برای بررسی دقیق آن به‌کارگیری روابط و معادلات دینامیکی حاکم بر حرکت موردنیاز است؛ لذا، فهم و درک ما از جزئیات حاکم بر حرکت و روابط بین متغیرهای مؤثر بر آن بدون به‌کارگیری معادلات حرکت ناقص خواهد بود. دست‌یابی به چنین درکی می‌تواند به‌کمک مدل‌سازی محقق گردد. مدل‌سازی فرایندی است که به‌کمک آن می‌توان یک مسئلهٔ دشوار را به یک شکل قابل‌فهم و ساده موردبررسی قرار داد. یکی از اهداف مدل‌سازی مهارت‌های ورزشی، دست‌یابی به یک تکنیک بهینه و برتر می‌باشد. به انتخاب بهترین (بیشترین) و یا بدترین (کمترین) موقعیت و یا حالت از بین موقعیت‌ها و حالت‌های دردسترس، بهینه‌سازی گفته می‌شود (ملانی[1]، ۱۹۹۹، ص ۱۲۱). برای یک مسأله ممکن است جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسهٔ آن‌ها و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف تعریف می‌شود. در سیستم‌هایی که بهینه می‌شوند ۳ بخش تابع هزینه[2]، متغیرهای طراحی[3] و قیدها[4] می‌بایست مدنظر قرار گیرند. در جریان بهینه‌سازی یک تکنیک، برای رسیدن رسیدن به تابع هدف می‌بایست متغیرهای طراحی به‌گونه‌ای تعیین شوند که تمامی قیدها ارضا شوند و تابع هزینه نیز به حداقل برسد (نیگ و هرزوگ[5]، ۱۹۹۹، ص. ۴۲۳). هدف از بهینه‌سازی، یافتن بهترین جواب قابل‌قبول با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسأله است. درحال‌حاضر، مدل‌هایی برای تکنیک‌های ورزشی طراحی شده است که هدف بیشتر آن‌ها بهینه‌سازی تکنیک موردنظر می‌باشد. در بین این مدل‌ها، تعدادی برای تحلیل و بهینه‌سازی حرکات پایه مانند دویدن، راه‌رفتن و پریدن طراحی شده‌اند (آلینگر و واندنبرگت[6]، ۱۹۹۷، ص. ۲۷۹؛ هابارت[7]، ۱۹۸۴، ص. ۷۷۷) و هدف تعداد محدودی از این مطالعات، بهینه‌سازی مهارت-های پیچیده همانند شوت فوتبال بوده است (آلینگر و واندنبرگت[8]، ۱۹۹۷، ص. ۲۷۹؛ چانگ، براون، بلوسویک و هاسیانگ[9]، ۲۰۰۱، ص. ۵۲۷).

1. Melanie
2. Cost function
3. Design variable
4. Constrain
5. Nigg and Herzog
6. Allinger and Van den Bogert
7. Hubbard
8. Allinger and Van den Bogert
9. Chang C, Brown D R, Bloswick D S, Hsiang

شوت روی پا یک مهارت پایه و کاربردی در بازی فوتبال است که در بیشتر مواقع هدف از انجام آن، اجرای یک ضربهٔ پر سرعت است (بارفیلد، کرکندال و یو[1]، ۲۰۰۲، ص. ۷۲). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که سرعت پا در لحظهٔ ضربه به توپ، تأثیر مستقیمی بر سرعت توپ بعد از ضربه دارد و می‌تواند پارامتر مناسبی برای بررسی سرعت شوت باشد (اندرسون[2]، ۱۹۹۹، ص. ۱۲۱؛ دورج، اندرسون، سورنسون و سیمونسون[3]، ۲۰۰۲، ص. ۲۹۳؛ لوانون و داپنا[4] ۱۹۹۸، ص. ۹۱۷). برای دست‌یابی به حداکثر سرعت شوت، علاوه‌بر داشتن آمادگی فیزیولوژیکی و عضلات قدرتمند به توالی و هماهنگی مناسب در میزان فعالیت عضلات و زمان‌بندی درست در حرکت اندام‌ها و به‌طورکلی، به یک الگوی حرکتی مناسب نیازمندیم.

طی سال‌های اخیر اکثر پژوهشگرانی که به بررسی تأثیر پارامترهای بیومکانیکی بدن بر سرعت شوت روی پا پرداخته‌اند، از تعدادی آزمودنی با سطوح مختلف مهارتی استفاده کرده و پارامترهای موردنظر را با گرفتن میانگین از عملکرد آزمون‌دهندگان گزارش کرده‌اند که شماری از این مطالعات را می‌توان در پژوهش مروری لیز و نولان[5] (۱۹۹۸، ص. ۲۱۱) مشاهده کرد. برخلاف این مطالعات، در پژوهش حاضر با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز و ساخت یک مدل دینامیکی مناسب می‌توان بدون صرف وقت و هزینهٔ زیاد برای گرفتن آزمون، مدل را بارها و بارها با داده‌های ورودی مختلف اجرا کرد و بهترین تکنیک یا الگوی حرکتی را با توجه به قیدها و تابع هدف که در اینجا حداکثر سرعت شوت است، به‌دست آورد. هدف از انجام این مطالعه، به‌دست آوردن یک الگوی بهینه از تغییرات زاویه‌ای مفاصل پای ضربه در فاز رو به جلوی حرکت به‌منظور دست‌یابی به حداکثر سرعت شوت بود.

روش‌شناسی

آزمودنی‌ها و روش اجرا

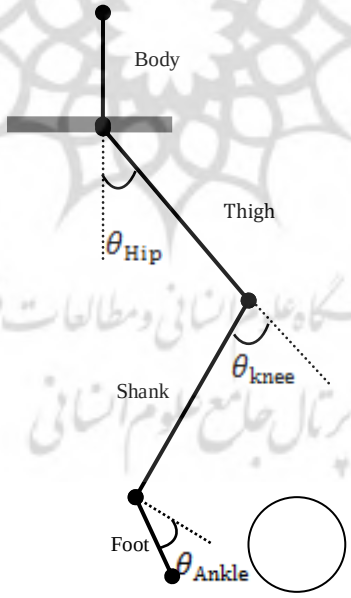
شش نفر فوتبالیست ماهر دانشگاهی با مشخصات فیزیکی و فردی سن ۲/۴۲±۲۵/۱۶ سال، قد ۶/۵±۱۷۳ سانتی‌متر و وزن ۶/۶±۷۰/۸ کیلوگرم که بیش از ۸ سال سابقهٔ انجام ورزش فوتبال را داشتند، به‌صورت نمونهٔ دردسترس انتخاب شدند. تمامی تست‌ها در آزمایشگاه و در فضایی تعیین‌شده انجام شد. آزمودنی‌ها تنها پس از دو گام به سمت هدفی با طول و عرض یک متر که

1. Barfield, Kirkendall and Yu
2. Andersen
3. Dörge, Bull Andersen , SØrensen and Simonsen
4. Levanon and Dapena
5. Lees and Nolan

در فاصلهٔ پنج متری توپ تعبیه شده بود با روی پا و با حداکثر توان ضربه زدند. از توپ سایز ۵ که مطابق با استانداردهای فیفا بود استفاده شد. تمامی آزمودنی‌ها راست‌پا بوده و از پای برتر خود برای شوت‌زدن استفاده کردند. هنگام آزمون اصلی، ۴ تکرار برای شوت روی پا که می-بایست با حداکثر تلاش انجام می‌شد، ثبت و موردپردازش قرار گرفت.

محاسبه و هموارسازی داده‌های سینماتیکی اندام پایین‌تنه

به‌منظور محاسبهٔ جابه‌جایی زاویه‌ای مفاصل پای ضربه، از حرکت ورزشکاران به‌وسیلهٔ یک دوربین کاسیو زد آر ۲۰۰[1] با سرعت تصویربرداری ۲۴۰ فریم بر ثانیه تصویر گرفته شد. این دوربین روی سه‌پایه در فاصلهٔ ۱ متری و عمود بر سطح ساجیتال حرکت قرار داشت. تعداد ۴ مارکر روی مرکز مفاصل الف) برجستگی بزرگ ران، ب) اپی‌کندیل خارجی زانو، ج) قوزک خارجی و د) انگشت کوچک پای راست، چسبانده و کاملاً ثابت گردید تا به کمک آن بعد از فرایند پردازش تصویر، جابه‌جایی زاویه‌ای مفاصل ران، زانو و مچ در صفحه ساجیتال به‌دست آید.



شکل ۱ـ زوایای محاسبه‌شده در پای ضربه حین انجام شوت روی پا

1. Casio ZR-200

کلیهٔ فریم‌های مربوط به حرکت پا به سمت جلو تا لحظهٔ ضربه به توپ، مورد پردازش و تحلیل قرار گرفت. برای‌این‌منظور، یک برنامهٔ کاربردی[1] در نرم‌افزار متلب[2] نوشته شد. کد مربوطه این قابلیت را داشت که دامنه‌ای انتخابی از آرجی‌بی[3] را در تصاویر ضبط‌شده مورد جست‌وجو قرار دهد و مختصات دوبعدی مارکرها را در تمامی فریم‌های موردنظر پیدا کند. درنهایت، زاویهٔ نسبی بین اندام‌ها در هریک از فریم‌ها با فرض بردار‌بودن a و b به‌کمک رابطهٔ ۱ در نرم‌افزار متلب به‌دست آمد.

رابطهٔ ۱
$$\cos\theta = \frac{a.b}{|a|.|b|}$$

در این مطالعه به‌منظور هموارکردن و کاهش نویز و خطای داده‌های مکانی، از نرم‌افزار متلب و از ابزار برازش منحنی[4] استفاده شد و داده‌های جابه‌جایی زاویه‌ای با استفاده از منحنی‌های چندجمله‌ای[5] درجهٔ چهار برازش شدند.

محاسبهٔ سرعت شوت

اندرسون[6] (۱۹۹۹، ص. ۱۲۱) معادله‌ای را پیشنهاد دادند که به کمک آن می‌توان سرعت اولیهٔ توپ را محاسبه کرد.

رابطه ۲
$$\left(\frac{\text{متر}}{\text{ثانیه}}\right)_{\text{سرعت توپ}} = \frac{\text{سرعت پا} \times \text{ممان اینرسی ساق} \times \left[1 + \text{ضریب ارتجاع توپ}\right]}{\text{وزن توپ} \times \left(\text{فاصله زانو تا مرکز توپ}\right)^2 + \text{ممان اینرسی ساق}}$$

ضریب ارتجاع و وزن توپ، مقدارهایی ثابت هستند که می‌توانند مستقیماً وارد معادله شوند. ممان اینرسی ساق و فاصلهٔ مفصل زانو تا مرکز ضربه را نیز می‌توان از روی ویژگی‌های آنتروپومتریکی هر فرد محاسبه کرد. مهم‌ترین قسمت در این معادله، سرعت پا در لحظهٔ برخورد به توپ می‌باشد که برای محاسبهٔ آن می‌بایست از جابه‌جایی خطی پا در لحظهٔ برخورد به توپ استفاده کرد و مقدار سرعت را به‌دست آورد.

1. Marker tracker (MT)
2. MATLAB
3. RGB (Red, Green, Blue)
4. Curve fitting
5. Polynomial
2. Anderson

رابطهٔ ۳ $$\text{طول ساق (متر)} = \text{طول قد} \times ۰/۲۴۶$$

رابطهٔ ۴ $$\text{وزن ساق (کیلوگرم)} = \text{وزن} \times ۰/۰۴۶۵$$

رابطهٔ ۵ $$\text{ممان اینرسی ساق (کیلوگرم} \times \text{متر}^2) = \text{وزن ساق} \times (\text{طول ساق} \times ۰/۳۰۲)^2$$

رابطهٔ ۶ $$\text{ضریب ارتجاع} = -\frac{\text{(سرعت توپ بعد از ضربه} - \text{سرعت پا بعد از ضربه)}}{\text{(سرعت توپ قبل از ضربه} - \text{سرعت پا قبل از ضربه)}}$$

فرایند بهینه‌سازی

کنترل بهینه

چگونگی عملکرد یک سیستم در گرو تعیین پارامترهای ورودی آن می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، هدف در کنترل بهینه محاسبهٔ پارامترهای ورودی برای رسیدن به بهترین خروجی براساس تابع معیار و قیدهای سیستم می‌باشد (ملانی، ۱۹۹۹، ص ۲۱۱). تابع معیار در این مطالعه، الگوی حرکتی مفاصل پای ضربه است؛ به‌طوری‌که، سرعت خطی پا در لحظهٔ برخورد به توپ و یا به‌عبارتی، سرعت توپ پس از ضربه حداکثر شود؛ بنابراین، جابه‌جایی زاویه‌ای مفاصل پای ضربه به‌عنوان پارامتر ورودی و عاملی که می‌بایست بهینه شود درنظر گرفته شد.

الگوریتم بهینه‌سازی

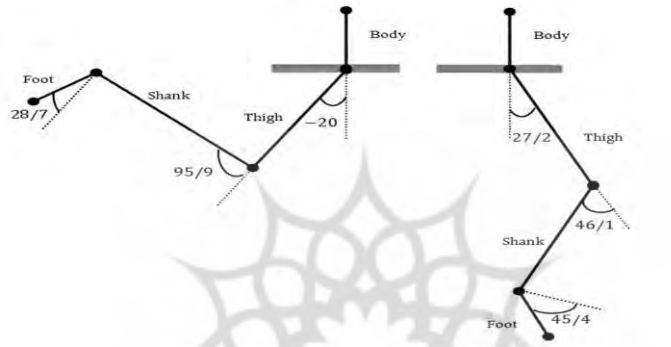
در سال‌های اخیر یکی از مهم‌ترین روش‌های بهینه‌سازی، روش‌های ابتکاری برگرفته از طبیعت بوده است. این روش‌ها شباهت‌هایی با سیستم‌های اجتماعی و یا طبیعی دارند. الگوریتم ژنتیک[1] روشی عمومی از روش‌های فراابتکاری برای بهینه‌سازی گسسته می‌باشد که از علم ژنتیک اقتباس شده و تئوری آن بر پایهٔ فرایندهای ژنتیکی استوار است. این الگوریتم، نوعی روش جستجوی همسایه است که عملکردی مشابه ژن دارد و به‌مرور زمان تکامل پیدا می‌کند. در این مطالعه از این الگوریتم برای یافتن الگوی بهینهٔ شوت فوتبال براساس سرعت شوت استفاده شد.

قیدها و محدودیت‌ها

امروزه در اکثر مطالعات بهینه‌سازی از الگوریتم‌های هوشمند استفاده می‌شود که تعداد تکرارها را برای رسیدن به الگوی برتر کوتاه می‌کند؛ بنابراین، در چنین مطالعاتی استفاده از قیدهای مکانیکی که براساس ساختار آناتومیکی بدن انسان (دامنهٔ حرکتی مفاصل) ایجاد

1. Genetic algorithm

می‌شوند، کفایت می‌کند. در این مطالعه نیز علاوه بر قیدهای مکانیکی، از دامنهٔ حرکتی مفاصل پای ضربهٔ آزمودنی‌ها حین انجام شوت نیز به‌عنوان محدودیت استفاده شد تا تعداد حالت‌های موجود کاهش یابد و مدل سریع‌تر به جواب دلخواه برسد. همچنین، از آنجایی‌که فاز رو به جلوی حرکت شوت مورد بررسی قرار گرفت، سرعت و شتاب در لحظهٔ آغازین حرکت مساوی ۰ فرض شد.



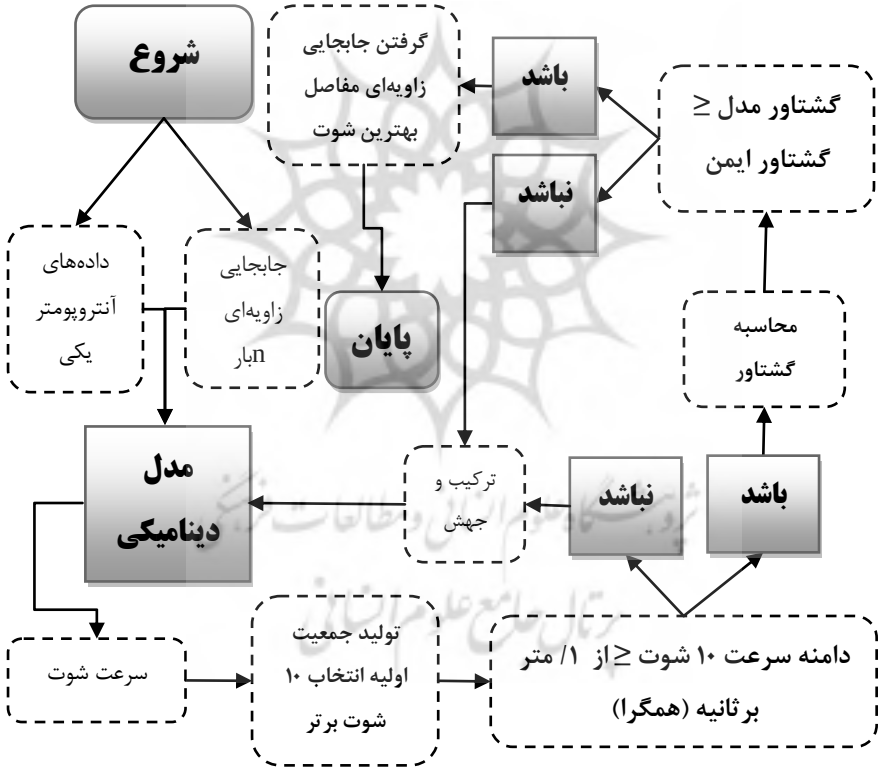
شکل ۲ـ موقعیت پا در لحظهٔ شروع حرکت (سمت چپ) و لحظهٔ ضربه (سمت راست)

ساخت مدل

در فرایند مدل‌سازی، مدل ساخته‌شده می‌بایست تا حد امکان ساده و نزدیک به واقعیت طراحی شود. در این مطالعه برای بهینه‌سازی حرکت شوت با توجه به پیچیدگی معادلات، مدلی دوبعدی به‌کمک نرم‌افزار شبیه‌ساز مکانیکی[1] که یکی از ابزارهای نرم‌افزار متلب است، ساخته شد. این مدل صلب ۴ لینکی از سه مفصل ران، زانو و مچ که هر سه مفاصلی لولایی با یک درجهٔ آزادی بودند و در صفحهٔ ساجیتال حرکت داشتند، تشکیل شد. اطلاعات مربوط به خصوصیات آنتروپومتریکی افراد شامل پارامترهای جرم، طول، ممان اینرسی و موقعیت مرکز ثقل اندام نیز ازطریق معادلات پیشنهادی وینتر[2] (۲۰۰۹، ص. ۸۹) به‌دست آمد. هدف مدل ساخته‌شده یافتن بهترین تکنیک برای رسیدن به حداکثر سرعت شوت بود و مزیت مدل-سازی در این پژوهش، امکان تغییر تک‌تک متغیرها (جابه‌جایی زاویه‌ای مفاصل) به‌صورت دلخواه و اجرای مدل برای دفعات بسیار زیاد بوده است. بدین‌ترتیب، حالت‌های مختلف جابه‌جایی زاویه‌ای مفاصل پای ضربه که ازطریق الگوریتم بهینه‌ساز ارائه گردید، وارد مدل

1. Sim mechanic
2. Winter

دینامیکی شد و سرعت توپ به‌عنوان دادهٔ خروجی مدل دریافت شد. سپس، ۱۰ شوتی که بیشترین سرعت را داشتند انتخاب و جمعیت اولیه را تشکیل دادند. اگر اختلاف دامنهٔ سرعت ۱۰ شوت برتر، کمتر از ۰/۱ متر بر ثانیه می‌بود، به‌عبارتی جمعیت اولیه همگرا می‌شد، اطلاعات سینماتیکی سریع‌ترین شوت از مدل خارج می‌شد. درصورت عدم ارضای این شرط، الگوریتم بهینه‌ساز داده‌های ورودی جدیدی را به‌کمک فرایندهای ترکیب و جهش وارد مدل دینامیکی می‌کرد و تا زمانی که شرط بالا تأیید شود، مدل کماکان به اجرای خود ادامه می‌داد. درنهایت، مقدار گشتاور مفاصل الگویی که باعث ایجاد حداکثر سرعت خطی در پا و به‌تبع آن در سرعت توپ شد، بررسی و درصورتی که مقدار آن کمتر از مقدار گشتاور آسیب‌زا بود، به‌عنوان الگوی برتر شناخته شد.



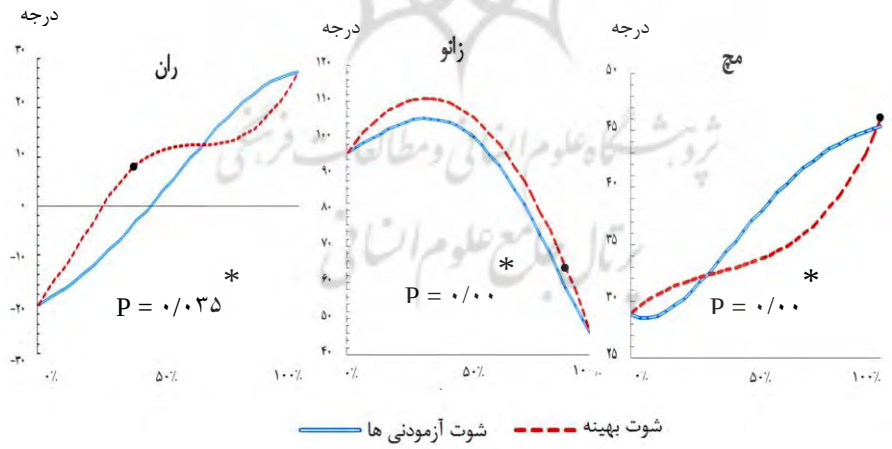
شکل ۳ـ روند بهینه‌سازی سرعت شوت فوتبال

روش آماری

با درنظر گرفتن اطلاعات مربوط به جابه‌جایی حاصل از مدل، وضعیت توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف - اسمیرونوف بررسی شد. از آزمون t زوجی برای مقایسهٔ آماری داده‌های جابه‌جایی زاویه‌ای حاصل از شوت آزمودنی‌ها و داده‌های جابه‌جایی زاویه‌ای حاصل از شوت بهینه در سطح معناداری $P \leq ۰/۰۵$ استفاده شد.

نتایج

پس از اجرای مدل برای بیش از ۲۰۰۰ مرتبه، الگوریتم طراحی‌شده سریع‌ترین شوت قابل‌اجرا را با توجه به قیدها و محدودیت‌های لحاظ‌شده پیدا کرد. براین‌اساس، سینماتیک مفاصل ران، زانو و مچ این شوت در صفحهٔ ساجیتال به‌صورت تابعی از زمان انجام حرکت به‌منظور انجام مقایسه با شوت‌های آزمودنی‌ها از مدل دریافت شد. نتایج نشان‌دهندهٔ وجود اختلاف معنادار بین شوت بهینه و میانگین شوت‌های آزمودنی‌ها در جابه‌جایی زاویه‌ای مفاصل ران، زانو و مچ بود ($P_{hip}=۰/۰۳۵$). ($P_{ankle}=./..$) و ($P_{knee}=./...$). شکل ۴ تغییرات جابه‌جایی زاویه‌ای هریک از مفاصل را در شوت بهینه و میانگین شوت آزمودنی‌ها نمایش می‌دهد.



شکل۴ـ نمودار جابه‌جایی (درجه)ـ زمان (٪) مفاصل پای ضربه در شوت بهینه و شوت آزمودنی‌ها

جدول ۱، ماکزیمم سرعت زاویهٔ مفاصل را در دو الگو نشان می‌دهد. درضمن، مقدار سرعتی که برای شوت بهینه به‌دست آمد ۳۲/۵۶ متر بر ثانیه بود که این سرعت در حدود ۶۲/۵٪ بیشتر از میانگین سرعت شوت آزمودنی‌ها برآورد شد.

جدول ۱ـ ماکزیمم سرعت زاویه‌ای (Deg/s) در مفاصل پای ضربه در شوت بهینه و شوت آزمودنی‌ها

پارامتر	مفصل	شوت بهینه	شوت آزمودنی‌ها x(SD)
حداکثر سرعت زاویه‌ای (N.m)	ران	۲۹۵/۸	۲۱۶/۱(۱۶/۲)
	زانو	۶۲۸/۱	۴۸۷/۲(۲۶/۲)
	مچ	۱۴۷/۳	۹۱/۸(۷/۲)

بحث و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مطالعه، یافتن بهترین الگوی حرکتی برای شوت روی پای فوتبال به‌منظور دست‌یابی به حداکثر سرعت شوت بود. بررسی جابه‌جایی زاویه‌ای مفاصل در هر لحظه از زمان حین مطالعهٔ یک حرکت خاص، مقدمهٔ انجام تحلیل بیومکانیکی است؛ زیرا، بسته به هدف مطالعه می‌توان دامنهٔ حرکتی، سرعت، شتاب و گشتاور خالص واردشده به مفاصل را نیز محاسبه کرد. در این پژوهش از جابه‌جایی زاویه‌ای مفاصل برای محاسبهٔ الگوی حرکتی شوت فوتبال استفاده گردید. همان‌طور که در بخش روش‌شناسی اشاره شد، دلیل اصلی استفاده از مدل در مطالعات بهینه‌سازی، امکان تغییر تک‌تک متغییرها و از آن مهم‌تر، اجرای مدل برای دفعات نامحدود می‌باشد؛ عاملی که اگر قرار باشد توسط آزمودنی انجام شود با صرف وقت و هزینهٔ بسیاری همراه است؛ لذا، تا اینجا استفاده از مدل مقرون به صرفه است؛ اما چالش بزرگ در چنین مطالعاتی این است که آیا تکنیک بهینه‌ای که از مدل خارج می‌شود قابل‌تعمیم به انسان است یا به‌عبارتی، آیا انسان می‌تواند در عالم واقع عملکردی شبیه مدل داشته باشد یا خیر؟ بنابراین درصورتی‌که بتوان دلائلی برای این چالش یافت، می‌توان به این نتیجه رسید که مدل به‌درستی طراحی شده است؛ لذا لازم است ویژگی‌های بیومکانیکی شوت بهینه بررسی شود. یکی از ویژگی‌های یک شوت روی پای فوتبال، مداخلهٔ متوالی و باترتیب اندام‌ها در فاز رو به جلوی حرکت است؛ به شکلی که ابتدا مفاصل پروگزیمال و سپس مفاصل دیستال به حداکثر سرعت زاویه‌ای خود می‌رسند (تامی[1]، ۱۹۸۹، چکیده). شیب نمودار جابه‌جایی زاویه‌ای ـ زمان، برابر با سرعت زاویه‌ای است؛ لذا همانطور که در شکل ۴ با نقطهٔ مشکی مشخص شده است،

1. Toomey

مفصل ران شوت بهینه زودتر به حداکثر شیب می‌رسد. پس از آن، مفصل زانو و درنهایت، مچ است که در انتهای فاز رو به جلوی حرکت حداکثر سرعت را تجربه می‌کند. طبق نتایج پژوهش‌های گذشته حین انجام شوت روی پا، مفصل ران تقریباً در نیمهٔ راه به حداکثر سرعت زاویه‌ای خود می‌رسد و حدوداً در همین زمان است که سرعت زاویه‌ای زانو به‌سرعت شروع به افزایش می‌کند و تقریباً در انتهای مسیر به ماکزیمم مقدار خود دست پیدا می‌کند و درنهایت، این مفصل مچ است که سرعتش زیاد می‌شود و در لحظهٔ اصابت پا به توپ، به حداکثر سرعت زاویه‌ای خود می‌رسد؛ بنابراین می‌توان گفت روند و شکل کلی جابه‌جایی زاویه‌ای که توسط مدل و الگوریتم بهینه‌ساز ارائه شد، تقریباً مشابه نتایجی بود که آزمودنی‌ها در این مطالعه و سایر مطالعات مشابه (بال[1]، ۲۰۱۱، ص. ۱۵۴۵؛ نانومی، آسای، ایکیگامی و ساکورایی[2]، ۲۰۰۲، ص. ۲۰۲۸؛ تامی، ۱۹۸۹، چکیده) نشان دادند. حاج لطفعلیان، لنجان‌نژادیان و مجتهدی (۱۳۹۲، ص. ۱۰۹) مقدار همبستگی سرعت توپ و حداکثر سرعت بازشدن مفصل زانو را ۰/۷۲ و همبستگی سرعت توپ و حداکثر فعالیت عضلات چهارسر ران را ۰/۴۳ محاسبه کردند. از این مطالعه شاید بتوان این نتیجه را برداشت کرد که عامل دیگری به‌غیر از فعالیت عضلات چهارسرران در افزایش سرعت زاویه‌ای زانو مؤثر است. اگر به جابه‌جایی زاویه‌ای مفاصل درگیر در دو الگوی بهینه و الگوی آزمودنی‌ها (شکل ۴) و ماکزیمم سرعت زاویه‌ای مفاصل (جدول ۱) دقت شود، مشاهده می‌شود که الگوی بهینه در نیمهٔ اول فاز رو به جلوی حرکت در مفصل ران، دارای سرعت زاویه‌ای بیشتری نسبت به الگوی آزمودنی است. به اعتقاد نایتو، فوکویی و ماریاما[3] (۲۰۱۰، ص. ۲۵۹) این افزایش سرعت ران که ناشی از نیروی جانب مرکزی[4] است که از انقباض عضلات فلکسور ران به‌وجود می‌آید، در ابتدای فاز رو به جلو یک نیروی گریز از مرکز[5] در ساق ایجاد می‌کند که عکس‌العمل نیروی جانب مرکز ران است و باعث می‌شود تا ساق، در فاز رو به جلو مقداری به عقب برگردد و فلکشن داشته باشد؛ بنابراین سرعت بالای ران الگوی بهینه در ابتدای فاز رو به جلو، باعث افزایش دامنهٔ حرکتی زانو می‌شود و سپس کاهش ناگهانی سرعت ران در الگوی بهینه و نیروی کوریولیسی[6] که ناشی از چرخش ران و ساق است، در امتداد شعاع ساق ایجاد می‌شود و منجربه افزایش سرعت زاویه‌ای اکستنشن زانو می‌گردد

1. Ball
2. Nunome, Asai, Ikegami, Sakurai
3. Naito, Fukui, Maruyama
4. Centripetal force
5. Centrifugal force
6. Coriolis force

(زاتسیورسکی[1]، ۲۰۰۲، ص. ۲۲۴). این اتفاق دوباره در دو لینک ساق و پا نیز به همین شکل رخ می‌دهد. به‌صورتی‌که سرعت زیاد ساق در انتهای فاز رو به جلو، باعث جاماندن پا و به‌وجود آمدن پلانتار فلکشن در مچ تا لحظهٔ ضربه به توپ می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، مداخلهٔ اندام‌ها و سرعت زاویه‌ای بیشتر مفصل ران به شکلی که بیان شد در الگوی بهینه باعث ایجاد یک حرکت شلاقی بزرگتر نسبت به الگوی آزمودنی‌ها شده و درنهایت، با افزایش گشتاور وابسته به حرکت در زانو منجربه افزایش سرعت زاویه‌ای زانو و افزایش سرعت شوت می‌گردد.

در سال‌های اخیر پژوهشگران زیادی سرعت توپ را حین شوت روی پا محاسبه کرده‌اند و با توجه به متفاوت‌بودن خصوصیات آزمودنی‌ها و شرایط آزمایش، نتایج مختلفی را به‌دست آوردند که نام تعدادی از آن‌ها و سرعت شوت ارائه‌شده را می‌توان در قالب جدولی در پژوهش مروری کلیز و کاتیز[2] (۲۰۰۷، ص ۱۵۴) مشاهده کرد. طبق این جدول، دامنهٔ سرعت شوت‌ها بین ۱۸ تا ۳۲/۱ متر بر ثانیه بود که سریع‌ترین شوت محاسبه‌شده، برای آزمودنی‌های حرفه‌ای به‌دست آمد. این مقدار می‌تواند دلیلی بر قابل‌اجرابودن الگوی شوت بهینه توسط انسان باشد؛ زیرا این مقدار، اختلاف ناچیزی با سرعت محاسبه‌شده توسط الگوریتم بهینه‌ساز دارد. به‌علاوه، ازآنجایی‌که هدف مطالعهٔ حاضر یافتن سریع‌ترین سرعت شوت بود، بیشتربودن سرعت شوت بهینه از شوت آزمودنی‌ها می‌تواند قابل‌توجیه باشد.

گشتاور، عامل ایجاد حرکت در مفصل است و یک شوت فوتبال ازطریق ایجاد گشتاور در مفاصل مختلف، البته به‌صورت نظام‌دار و توالی‌وار و انتقال آن به توپ تشکیل می‌شود. سائوسیدیس و زاتسیورسکی[3] (۱۹۹۶، ص. ۸۷۰)، گشتاور و انرژی به‌وجودآورندهٔ حرکت هماهنگ و تناوبی پا قبل از ضربه را یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر سرعت شوت دانسته‌اند؛ لذا هر اندازه این گشتاورها بیشتر باشند و با ترتیب و مقدار مناسبی در مفاصل ایجاد شوند، باعث افزایش سرعت شوت می‌شوند؛ بنابراین برای تعمیم نتایج حاصل از مدل به انسان، دانستن حداکثر گشتاوری که یک فرد قادر است در هریک از مفاصلش تحمل کند می‌تواند به پژوهشگر در یافتن سریع‌ترین شوت کمک شایانی کند. چافین و اندرسون[4] (۱۹۹۹۱، ص. ۲۲۰) جدول ۲ را ارائه کردند که به‌کمک آن می‌توان حداکثر گشتاور ممکن (انسان قادر به ایجاد آن باشد) را در زوایای مختلف دامنه به‌دست آورد.

---

2. Zatsiorsky
3. Kelis and Katis
4. Tsaousidis and Zatsiorsky
2. Chaffin and Anderson

جدول ۲ـ حداکثر گشتاور زوایای مختلف حرکت در مفاصل مختلف (θ = موقعیت زاویه‌ای)

خم‌کردن ران	$Torque\ (N.m) = [820.21 + 34.29\ (180 - \theta)\ - 0.11426\ (180 - \theta)^2][0.1304]$
بازکردن زانو	$Torque\ (N.m) = [1091.9 - 0.0996(180 - \theta) + 0.17308\ (180 - \theta)^2 - 0.00097(180 - \theta)^3][0.0898]$
بازکردن مچ پا	$Torque\ (N.m) = [3356.8 - 18.4\ (\theta + 90)\ ][0.0816]$

از آنجایی‌که در ساخت مدل دینامیکی از روند دینامیک معکوس (ورودی مدل، سینماتیک، خروجی مدل و سینتیک) استفاده‌شده‌بود، گشتاور خالص ایجادشده در هریک از مفاصل بررسی‌شده در حین حرکت قابل‌محاسبه بود. جدول ۳ مقدار ماکزیمم گشتاور ایجادشده در مفاصل پای ضربه را نشان می‌دهد.

جدول ۳ـ ماکزیمم گشتاور تولیدی (N.m) در مفاصل پای ضربه در شوت بهینه و شوت آزمودنی‌ها

پارامتر	مفصل	شوت بهینه	شوت آزمودنی‌ها x(SD)	مقدار ایمن (پیشنهاد چافین و اندرسون ((۱۹۹۱))
حداکثر گشتاور (N.m)	ران	۳۷۳/۵	۲۵۱(۱۹/۵)	۴۴۶/۶
	زانو	۱۴۷/۴	۱۳۹(۲۵/۳)	۳۷۵/۰۴
	مچ	۴۱/۴	۳۳/۱(۱۰)	۹۶/۱۹

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود مقدار این پارامتر در هر سه مفصل بررسی‌شده، در شوت بهینه بیشتر از ماکزیمم گشتاور در شوت آزمودنی‌ها بود. بااین‌حال، مقدار گشتاوری که برای هریک از مفاصل در الگوی بهینه به‌دست آمد در تمامی زوایا کمتر از مقدار پیشنهادی چافین و اندرسون (۱۹۹۱، ص. ۲۲۰) بود؛ یعنی درصورتی‌که یک آزمودنی الگوی پیشنهادی پژوهش را دقیقاً اجرا کند، گشتاورهای ایجادشده در مفاصل او به اندازه‌ای نیست که به وی آسیب بزند. البته، ازآنجایی‌که خصوصیات آنتروپومتریکی افراد (در اینجا طول، وزن، مرکز ثقل و ممان اینرسی اندام پایین‌تنه) در توانایی آن‌ها در تولید گشتاور مؤثر است، باید گفت که این مدل و این شوت خاص برای افرادی با ویژگی‌های شرکت‌کنندگان این پژوهش قابل‌انطباق

است. به‌علاوه، الگوی پیشنهادی مدل برای افراد حرفه‌ای اجرایی می‌باشد و قطعاً یک فرد عادی قادر به ایجاد و تحمل این مقدار گشتاور نخواهد بود.

براساس نتایج پژوهش، با وجود ماهربودن آزمودنی‌ها سرعت شوت بهینه به‌طور محسوسی بیشتر از سرعت شوت آزمودنی‌ها محاسبه گردید. درنتیجه، شوت بهینه الگوی مناسب‌تری را نسبت به شوت آزمودنی‌ها ارائه کرد. امروزه قابلیت اجرای مهارت‌های ورزشی یکی از بخش‌های مهم در مطالعات استعدادیابی است (نوری و صادقی، ۱۳۹۲، ص. ۲۷)؛ بنابراین، پژوهشگران به‌دنبال یافتن بهترین عملکرد هستند تا از آن به‌عنوان هدف استاندارد استفاده کنند و مدل-های بهینه‌شده درصورت انسانیزه‌شدن می‌توانند کمک شایانی به این پژوهشگران بکنند. با توجه به نتایج پژوهش می‌توان پی برد که برای انجام یک شوت سریع، وجود هماهنگی عصبی عضلانی به‌منظور ایجاد توالی و مداخلهٔ با ترتیب اندام‌ها کمک می‌کند تا گشتاور تولیدی در اندام نزدیک تنه که مستقیماً وابسته به قدرت عضلات است، در زمان مناسبی به اندام دور از تنه منتقل شود و منجربه افزایش گشتاور وابسته به حرکت گردد. البته نباید از یاد برد که با فرض ثابت‌بودن دامنهٔ حرکتی، افزایش بیش از حد گشتاور وابسته به حرکت در مدل دینامیکی باعث افزایش سرعت زاویه‌ای و به‌تبع آن افزایش گشتاور مفاصل دور از تنه می‌شود و نیاز است که در انسان مقدار آن از حد گشتاور ایمن فراتر نرود که این مسئله در فرایند بهینه‌سازی رعایت شد؛ بنابراین، گشتاور بیشتر اندام نزدیک تنه و به‌تبع آن گشتاور وابسته به حرکت بزرگتر در اندام دور از تنه، دو عامل مهم بودند که منجربه سریع‌تر شدن شوت بهینه نسبت به شوت آزمودنی‌ها شدند. درنهایت، باید گفت این مدل به‌عنوان یک ابزار می‌تواند اطلاعات آنتروپومتریکی و سینماتیکی حاصل از حرکت شوت هر فرد را به‌عنوان ورودی دریافت و الگوی بهینهٔ شوت را محاسبه کرده و در اختیار مربیان بگذارد تا توصیه‌های لازم را جهت بهبود کیفیت شوت ارائه دهند.

در سالیان اخیر، الگوی برتر انجام یک شوت با کیفیت، از طریق بررسی پارامترهای بیومکانیکیِ شوت تعدادی آزمودنی حرفه‌ای محاسبه شده و به‌کارگیری روش‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی، با وجود استفاده در تعدادی از مهارت‌های ورزشی، جهت یافتن الگوی بهینه شوت روی پای فوتبال مورد استفاده قرار نگرفته است.

نتایج این مطالعه نشان داد که با تغییر الگوی حرکتی شوت فوتبال، می‌توان سرعت شوت را به مقدار قابل توجهی افزایش داد و الگوریتم‌های بهینه‌ساز و معادلات حرکت، کمک شایانی به یافتن این الگو می‌کنند.

منابع

۱. حاج‌لطفعلیان، م. لنجان نژادیان، ش. مجتهدی، ح. (۱۳۹۲). بررسی سرعت شوت فوتبال ازطریق مقایسهٔ خصوصیات بیومکانیکی مفصل زانو در دو شوت زمینی و هوایی. طب ورزشی. ۵(۱۳):۱۲۲ـ۱۰۹.

۲. نوری، م ح. صادقی، ح. (۱۳۹۲). طراحی نرم‌افزار استعدادیابی بر پایهٔ منطق فازی در رشتهٔ بسکتبال. طب ورزشی. ۵(۱۳): ۳۸ـ۲۷.

3. Allinger, T. L. Van den Bogert, A. J. (1997). Skating technique for the straights, based on the optimization of a simulation model. Medicine and Science in Sports and Exercise. 29(2): 279-288.
4. Andersen, T. (1999). Collisions in soccer kicking. Sports Engineering. 2(2): 121-125.
5. Ball, K. A. (2011). Kinematic comparison of the preferred and non-preferred foot punt kick. Journal of Sports Sciences. 29(14): 1545-1552.
6. Barfield, W. R. Kirkendall, D. T. Yu, B. (2002). Kinematic instep kicking differences between elite female and male soccer players. Journal of Sports Science and Medicine. 1(3): 72-79.
7. Chaffin, D. B. Anderson, G. B. (1991). Occupational biomechanics. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
8. Chang, C. Brown, D. R. Bloswick, D. S. Hsiang, S. M. (2001). Biomechanical simulation of manual lifting using space time optimization. Journal of Biomechanics. 34: 527-532.
9. Dörge, H. C. Bull Andersen, T. SØrensen, H. Simonsen, E. B. (2002). Biomechanical differences in soccer kicking with the preferred and the non-preferred leg. Journal of Sports Sciences. 20(4): 293-299.
10. Hubbard, M. (1984). Optimal javelin trajectories. Journal of Biomechanics. 17(10): 777-787.
11. Kellis, E. Katis, A. (2007). Biomechanical characteristics and determinants of instep soccer kick. Journal of Sports Science and Medicine. 6(2):154-165.
12. Lees, A. Nolan, L. (1998). The biomechanics of soccer: A review. Journal of Sports Sciences. 16(3): 211-234.
13. Levanon, J. Dapena, J. (1998). Comparison of the kinematics of the full-instep and pass kicks in soccer. Medicine and Science in Sports and Exercise. 30(6):

917-927.

14. Melanie, M. (1999). An introduction to genetic algorithms. Fifth printing. England: Massachusetts London: Cambridge.

15. Naito, K. Fukui, Y. Maruyama, T. (2010). Multijoint kinetic chain analysis of knee extension during the soccer instep kick. Human Movement Science. 29(2):259-276.
16. Nigg, B. M. Herzog, W. (1999). Biomechanics of the musculo-skeletal system. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
17. Nunome, H. Asai, T. Ikegami, Y. Sakurai, S. (2002). Three-dimensional kinetic analysis of side-foot and instep soccer kicks. Medicine and Science in Sports and Exercise. 34(12): 2028-2036.
18. Toomey, M. J. (1989). Thigh and shank interactions during soccer place kicking. International Society of Biomechanics. News Letter. 6. (Abestract).

19. Tsaousidis, N. Zatsiorsky, V. (1996). Two types of ball-effector interaction and their relative contribution to soccer kicking. Human Movement Science. 15(6): 861-876.

20. Winter, D. A. (2009). Biomechanics and motor control of human movement.fourth edition. New Jersey. John Wiley & Sons Inc.
21. Zatsiorsky V. 2002. Kinetics of human motion. 1set ed. Champaign. Illinois: Human Kinetics.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Optimization of soccer Instep Kick Pattern, Based on the Ball Speed

M.Haj Lotfalian[1], H. Sadeghi[2], S. Bagheri Kudakani [3]

1. Ph.D student, University of Kharazmi
2. Full Professor, University of Kharazmi
3. MSc, University of Isfahan

Received date: 2014/18/03 **Accepted date: 2014/21/07**

Abstract

Finding the optimal techniques is one of the aims of sport biomechanics science. According to previous soccer kick studies, the pattern of optimal technique has been computing by analyzing the kinematic and kinetic parameters of elite soccer player. The purpose of this study was finding the optimal soccer kick pattern in forward swing phase to achieve a maximum speed shot. The solution approach which is suggested to produce the optimal technique is to use the mechanical modeling by applying the motion equations. This model has some advantages compared to experimental study such as changing the model parameters separately, low cost and run repeatedly the model. A two-dimensional four-link dynamic model is introduced and by applying the appropriate constraints, the genetic algorithm is used to achieve the optimal technique. The computed pattern was compared with six skill subject's patterns that Acquired by cameras (240Hz). The results showed significant deference in joints angular displacement patterns between computed and subjects techniques. Also, the computed pattern velocity increased 62.5 percent more than subject's pattern and the computed pattern was similar to reported in previous studies. Therefore, the computed pattern is valid for human according to human body physiology and mechanics. Using the model in this study can create interaction between joint and segments and enhance Motion-Dependent Moment in distal segment and improve speed and quality of the kick. Therefore, it is important and necessary to enhance muscle strength and improve neuromuscular coordination. In a nutshell, this model is an apparatus which can available for trainers to teach optimal technique of soccer instep kick to athletes specifically.

Keywords: Optimization, Dynamic Modeling, Motion Pattern, Soccer Kick

***(Corresponding Author)** **Email:** mostafa.H.Lotfalian@gmail.com