تحلیل فیزیکی ضربات قوس دار در فوتبال

عبدالکریم افروزه
کارشناس ارشد فیزیک
محسن افروزه
کارشناس ارشد تربیت بدنی

مقدمه

فوتبال مردمی‌ترین ورزش جهان است، اما کمتر کسی به جنبه‌های علمی و فیزیکی آن توجه می‌کند. در بحث علمی فوتبال، اغلب صحبت بر سر مسیر منحنی توپ است. تماشاگران هرگز از مشاهده‌ی یک ضربه‌ی ماهرانه‌ی قوس‌دار خسته نمی‌شوند. دوست‌داران فوتبال در سراسر دنیا، هیچ‌گاه شوت قوس‌دار روبرتو کارلوس برزیلی را در بازی مقابل فرانسه در سال ۱۹۹۷ از یاد نمی‌برند؛ یک ضربه‌ی آزاد از فاصله‌ی ۳۰ متری که دیوار دفاعی را با فاصله‌ی حداقل یک متر دور زد و در گوشه‌ی دروازه‌ی فرانسه فرود آمد. دیوید بکهام، بازیکن انگلیسی تیم «رئال مادرید» اسپانیا، یک فوق ستاره است که به خاطر ارسال‌های دقیق توپ با پاهایش شهرت دارد. او از معدود بازیکنانی است که توانایی فرستادن توپ برای هم‌بازی‌هایش را به صورت قوس‌دار و بسیار دقیق، در حالت حرکت و ایستاده دارد.

مقاله‌ی حاضر به بررسی فیزیکی این نوع ضربات می‌پردازد. اکثر فیزیک‌دانان، خط سیر منحنی توپ را ناشی از اثر «مگنوس» می‌دانند که در این مقاله به آن می‌پردازیم. برای تشریح این موضوع از موضوع ساده‌تری به نام جهش توپ شروع می‌کنیم.

جهش توپ

این‌که چگونه توپ از روی زمین می‌جهد، نقش کلیدی در فوتبال دارد. در طول یک جهش، نیروی ناشی از فشار هوای روی پوشش تخت‌شده‌ی توپ، با نیروی عکس‌العمل زمین خنثا می‌شود. توپی که تحت زوایای کوچک به زمین می‌خورد، در طول جهش روی زمین می‌لغزد، در صورتی که در برخورد با زوایای بزرگ‌تر، تا هنگام ترک زمین روی آن می‌غلتد.

سه عاملی که بازده زمانی جهش را معین می‌کنند، عبارت‌انداز: محیط، فشار و جرم توپ. یک توپ معمولی با جرم ۴۵۰ گرم و محیط ۷۰ سانتی‌متر و فشار ۸۵. اتمسفر، دارای زمان جهشی برابر ۸ میلی ثانیه است این نتیجه توسط دوربین‌های بسیار سریع تأیید شده است. چون این زمان از فاصله‌ی زمانی ۴۰ میلی‌ثانیه‌ای میان تصاویر متوالی تلویزیون کوتاه‌تر است، لذا اغلب متوجه جهش واقعی نمی‌شویم.

این‌که چگونه توپ پس از آن‌که تحت زاویه‌ای به زمین می‌خورد، از روی آن جهش می‌کند، بسیار پیچیده است. توپ ابتدا با سرعت افقی برخوردش، روی زمین سر می‌خورد و یک نیروی اصطکاک افقی تولید می‌کند. این نیرو دارای دو اثر است که یکی موجب کاهش حرکت افقی می‌شود و دیگری گشتاور بر توپ اعمال می‌کند. وجود گشتاور به این معناست که توپ، ضمن آن‌که حرکتش در طول جهش، کُند می‌شود، شروع به غلتیدن هم می‌کند. گل بحث‌برانگیز **هورست** برای انگلستان در جام جهانی ۱۹۶۶، شاید از مشهورترین جهش‌های توپ در فوتبال باشد؛ توپی که از روی تیرک عمودی به داخل گل و سپس به بیرون پرید و درنهایت توسط مدافع آلمانی برگشت داده شد.

ضربه به توپ

ضربه به توپ را نیز می‌توان همانند جهش مورد بررسی قرار داد. در یک ضربه‌ی پنالتی خوب، توپ با سرعتی برابر ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت، مسیر ۱۱ متری را در یک سوم ثانیه طی می‌کند و سرعت پا در حدود ۸۰ کیلومتر بر ساعت است. در طول فرایند ضربه زدن، پا شتاب می‌گیرد و ران در حین ضربه زدن راست می‌شود؛ مانند ضربه رانشی در گلف. برای آن‌که دریابیم، چگونه بازیکنان می‌توانند مسیر توپ را کج کنند، لازم است نگاهی به چگونگی پرواز توپ در طول مسیرش داشته باشیم.

آیرودینامیک توپ

در سرعت‌های بسیار کم، چگونگی رانش توپی که در هوا حرکت می‌کند، تماماً توسط چسبندگی معین می‌شود.

در یک ضربه‌ی پنالتی خوب، توپ با سرعتی برابر ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت، مسیر ۱۱ متری را در یک سوم ثانیه طی می کند

هوا در اطراف توپ در راستای خطوط جریان حرکت می کند و جریان تکه شده، به استرس هایی می انجامد که درنهایت یک نیروی رانشی روی توپ اعمال می کنند.

رانش توپ

آشکارترین تفاوت میان دو نوع توپ عبارت است از بریدگی های سطح توپ که در فواصل میان تکه های به هم دوخته شده، وجود دارند. احتمالاً تکه دوزی موجب ایجاد نوعی ناپایداری در لایه‌ی مرزی می شود و مخلوط شدن را آغاز می کند که رانش را کاهش می دهد.

بازی فوتبال تا حد بسیار زیادی تحت تأثیر نیروی رانشی است. در نبود رانش، ضربات دروازه‌بان می تواند در جمعیت نقطه‌ی مقابل زمین فرود آید. اثر هوا هنگام باد بیشتر مشخص می شود؛ به‌طوری که بعضی دروازه‌بانان موفق شده‌اند، از مقابل دروازه‌ی خود گل به‌ثمر برسانند. و برعکس هم ممکن است به حدی سرعت شوت را کم کند که پس از برخورد با زمین، به عقب برگردد.

تحلیل ضربات قوس‌دار

چگونه بازیکنانی چون کارلوس و بکهام قادرند، توپ را در مسیر منحنی به حرکت درآورند؟ کلید این موضوع در نیروی متقاطع روی توپ چرخان نهفته که در قرن هیجدهم، توسط ریاضی‌دان انگلیسی، **بنجامین**، و در قرن نوزدهم توسط فیزیک‌دانان آلمانی، **مگنوس** مطالعه شده است. اثر مگنوس بیان می‌دارد که سرعت حرکت هوا روی قسمتی از توپ که در جهت جریان هوا حرکت می کند، بیشتر است و روی قسمت دیگر، کم‌تر! بنابر «اصل **برنولی**» سرعت بیشتر جریان هوا سبب کاهش فشار می شود. اختلاف فشار در دو سمت توپ، سبب ایجاد نیروی برایندی می شود که به اثر مگنوس مربوط است. به این نیروی برایند، «نیروی بالابر» هم گفته می شود. چرخش توپ در حال دوران موجب می شود، هوای اطراف توپ در یک سمت آن سریع‌تر از سمت دیگرش حرکت کند. اصل برنولی نیز که طبق آن، افزایش سرعت در مسیر جریان باعث کاهش فشار می شود، به‌وجود اختلاف فشار میان دو سطح توپ اشاره می کند. این اختلاف فشار نیرویی یک‌طرفه به‌وجود می‌آورد که موجب انحنای مسیر توپ می شود. اگر بازیکنی بتواند ضربه‌ای به قدر کافی محکم بزند تا سرعت اولیه‌ی توپ ۲۵ تا ۳۰ متر بر ثانیه باشد، آن‌گاه نه فقط توپ در وهله‌ی اول تندتر حرکت می کند، بلکه سرعت خود را برای مسافت طولانی‌تری نسبت به توپ آهسته‌تر، حفظ خواهد کرد. هم‌چنین معلوم می شود که با کند شدن حرکت توپ در مسیرش به سوی دروازه، نیروی کشش بازدارنده افزایش می یابد و انحنای ناشی در اثر مگنوس بیشتر می شود. برای رساندن سرعت توپ به ۲۵ متر بر ثانیه، سرعت پا هنگام ضربه زدن به توپ باید برابر ۲۰/۸ متر بر ثانیه باشد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

۱. مجله‌ی فیزیک مرکز نشر دانشگاهی

2. Physicsweb.org