

# فیزیک فوتبال

فوتبال مردمی ترین ورزش جهان است. علیرغم چنین علاقه ای، توجه اندک به جنبه های علمی بازی چشمگیر است. برای نمونه گلف و کریکت مورد توجه بیشتری قرار گرفته اند. اما برای یک فیزیکدان، مکانیک و آئرودینامیک فوتبال پهنه وسیعی از سوالات جالب را فراهم می آورد.

هنگامی که موضوع فیزیک فوتبال پیش می آید اغلب صحبت بر سر خط سیر منحنی توپ فوتبال است. برای مثال در طول برگزاری جام جهانی ۱۹۷۴ بینندگان تلویزیون از مشاهده ضربه موزی شکل غیر منتظره بازیکن برزیلی "روبرتو ریولینو" به شگفت آمدند. از آن هنگام توانایی منحرف کردن مسیر توپ به عنوان یکی از مهارتهای بازی به حساب می آید.

اما بینندگان هرگز از مشاهده یک ضربه ماهرانه قوس دار خسته نمی شوند. در سال ۱۹۹۷ طرفداران فوتبال در سراسر دنیا با مشاهده شوت قوس دار کاملاً ویژه ای که توسط یک بازیکن برزیلی دیگر - روبرتو کارلوس - در بازی مقابل فرانسه نواخته شد، هیپنوتیزم شدند. ضربه او که یک شوت آزاد از فاصله ۳۰ متری دروازه حریف بود قبل از آنکه قوس برداشته و در گوشه دروازه فرانسه

فرود آید، دیوار دفاعی آنها را با فاصله حداقل ۱ متر دور زد.

بیشتر فیزیکدانان میدانند که خط سیر منحنی توپ بخاطر اثری بنام اثر مگنوس است، اما تا حدی در تشریح آن نامطمئن بوده و توضیحات ساده ای که انتشار می یابد اغلب گمراه کننده است. قبل از در نظر گرفتن مسیر منحنی توپ اجازه دهید با مسئله ساده تری یعنی جهش توپ شروع کنیم. این موضوع باز هم بطور ضمنی به جام جهانی اشاره دارد. چه کسی می تواند گل سوم و بحث برانگیز گئوف هورست را در پیروزی ۴ بر ۲ انگلستان در مقابل آلمان غربی در جام جهانی ۱۹۶۶ فراموش کند؟ شوت هورست از روی تیرک عمودی به داخل گل و سپس به بیرون پرید و در نهایت توسط یک مدافع آلمانی برگشت داده شد. چگونه چنین چیزی ممکن است اتفاق بیافتد؟

## جهش توپ

اینکه توپ چگونه از روی زمین می جهد موضوع مهمی در فوتبال است. بر روی سطوح سخت جهش بلند توپ می تواند بازی را بی مزه کننده کند در حالی که یک



آشکارا موجب  
می شود که میزان

انرژی جنبشی برآورد شده توپ بیشتر از حد واقعی  
گردد .

اینکه چگونه توپ پس از آنکه تحت زاویه ای به زمین  
می خورد از روی آن جهش می کند، بسیار پیچیده است.  
توپ ابتدا با سرعت افقی برخوردش روی زمین سر  
خورده و یک نیروی اصطکاک افقی تولید می کند. این  
نیرو دارای دو اثر است: موجب کاهش حرکت افقی  
گشته و یک گشتاور بر توپ اعمال می کند. وجود  
گشتاور به آن معناست که توپ ضمن آنکه در طول  
جهش کند می شود شروع به غلتیدن هم می کند. بسته به  
زاویه ای که توپ با آن به زمین برخورد می کند دو  
حالت ممکن است اتفاق افتد. تویی که با زاویه کمی  
نسبت به زمین به آن برخورد می کند می تواند حتی پس  
از تکمیل شدن جهش روی زمین بلغزد. اما اگر توپ با  
زاویه تندی به زمین برخورد کند قسمت پایینی به حالت  
سکون در می آید و توپ در ادامه زمان جهش روی  
زمین می غلتد .

اگر توپ چنین چرخش بالایی دارد که سطح تحتانی  
آن به سمت عقب حرکت کند، حقیقتاً می تواند در طول  
جهش شتاب بگیرد. هر چند این رخداد عادی نیست و  
بطور طبیعی توپ توسط جهش کند می شود. لذا شنیدن  
این نکته از مفسر تلویزیون که توپ ضمن جهش از  
روی زمین خیس چمن " سرعت بیشتری به خود گرفته"  
تعجب برانگیز است. فرض محتمل در چنین وضعیتهایی  
آنست که علیرغم عبارت "افزایش سرعت" توپ در طی

توپ نرم مطلقاً به بالا نمی جهد. اما این حقیقت که  
شوت چیزی بجز جهش توپ از روی پا نیست نیز دارای  
همان اهمیت است. نکته مهم دیگر که باید به آن توجه  
کرد آنست که جهش یک توپ گلف یا اسکواش از  
روی یک سطح سخت به دلیل خاصیت ارتجاعی مواد  
تشکیل دهنده آنها است ولی پوشش توپ فوتبال  
هیچگونه خاصیت ارتجاعی ندارد. توپ باد نشده ای که  
به زمین انداخته شود روی زمین می ماند.

از آنجا که ضربه به توپ حقیقتاً یک جهش از روی پا  
است، اینکه چگونه توپ از روی زمین می جهد نقش  
کلیدی در فوتبال بازی می کند.

الف) در طول یک جهش نیروی ناشی از فشار هوا بر  
روی پوشش تخت شده توپ با نیروی عکس العمل  
زمین خنثی می شود.

ب) تویی که تحت یک زاویه کوچک به زمین برخورد  
می کند در طول جهش روی زمین لیز می خورد.

ج) هر چند تویی که تحت یک زاویه بزرگتر به زمین  
برخورد می کند تا هنگام ترک زمین روی آن می غلتد.

تقریباً واضح است که سه متغیری که بازه زمانی جهش  
را معین میکنند- محیط، فشار و جرم توپ- دقیقاً  
همانهایی هستند که توسط قواعد بازی تعیین می شود.  
یک توپ معمولی با جرم ۰،۴۵ کیلوگرم محیط ۷۰  
سانتیمتر و فشار ۰،۸۵ اتمسفر زمان جهشی برابر ۸ میلی  
ثانیه دارد. این نتیجه توسط آزمایشهای انجام گرفته با  
دوربینهای بسیار سریع تایید شده است. جالب است  
اشاره شود که این زمان از فاصله زمانی ۴۰ میلی ثانیه ای  
میان تصاویر متوالی تلویزیون کوتاه تر است و این به آن  
معناست که مغز ما به عنوان تماشاگر این فاصله زمانی را  
پر کرده و لذا اغلب متوجه جهش واقعی نمی شویم.

در محاسبات زمان و حرکت جهش از اتلاف (انرژی)  
بخاطر انعطاف پذیری سطح توپ چشمپوشی شده است.  
این تقریب بر مقیاس زمانی تاثیر قابل توجهی ندارد اما

جهش می‌لغزد و آنقدر که ما از تجربه انتظار داریم سرعش کم نمی‌شود.

گل بحث برانگیز هورست برای انگلستان در جام جهانی ۱۹۶۶ شاید از مشهورترین جهش‌های توپ در فوتبال ناشی شد. هر دو جهش - از روی تیرک عمودی و از روی زمین - را میتوان با استفاده از مفاهیمی که در بالا گفته شد توضیح داد، اگرچه تحلیل جهش از روی تیرک عمودی بخاطر شکل تیرک سخت تر است. آنچه که در حقیقت اتفاق افتاد را تنها میتوان با مطالعه عکسها و تصاویر تلویزیونی توضیح داد. تحلیل حرکت آهسته نشان میدهد که توپ بطور کامل از خط دروازه عبور نکرد و خط نگه دار و داور مسابقه در اعطای گل دچار اشتباه شدند.

اگرچه انگلستان به چهارمین گل نیز دست یافت اما نامحتمل است که این موضوع مانع از بحث مردم در زمینه شوت هورست شود. معهدنا نظریه می‌تواند نقش خود را ایفا کند. نتیجه آنست که اگر توپ تنها یک سانتیمتر پایینتر به تیرک عمودی برخورد کرده بود بطور کامل از خط دروازه عبور میکرد. هرچند آنوقت طرفداران فوتبال از بحث در مورد یک موضوع جالب بدون بهره می‌ماندند.

### ضربه به توپ

ضربه به توپ نیز می‌تواند همانند جهش مورد بررسی قرار گیرد. در یک ضربه پناستی خوب، توپ با سرعتی برابر ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت مسیر ۱۱ متری نقطه پناستی تا دروازه را در یک سوم ثانیه طی می‌کند و این به دروازه‌بان شانس اندکی برای دفع ضربه ای که دقیق زده شده میدهد. سرعت پا چیزی حدود ۸۰ کیلومتر بر ساعت است.

بیومکانیک یک ضربه سریع نیز جالب توجه است. قسمت بالایی ران مجبور به چرخیدن و قسمت پایینی به عقب خم می‌شود. در هنگام چرخش به دور مفصل ران

قسمت پایینی یا تحت یک نیروی گریز از مرکز قرار میگیرد که میخواهد پا را به بیرون پرتاب کند. در طول فرآیند ضربه زدن، پاشتاب گرفته و ران در حین ضربه زدن راست می‌شود. این مطلب همانند ضربه رانشی در بازی گلف است.

در یک ضربه ساده بازیکن سعی می‌کند تا پا را در راستای مرکز توپ هدایت کرده تا از حرکت توپ به سمت جهت دلخواه اطمینان حاصل نماید. یک ضربه ماهرانه که در آن سعی می‌شود تا مسیر توپ چرخشی بوده ولی به هدف اصابت کند، نیاز به مهارت بیشتری دارد. برای آنکه درایم چگونه بازیکنان میتوانند مسیر توپ را کج کنند لازم است تا ابتدا نگاهی داشته باشیم بر چگونگی پرواز توپ در طول مسیرش.

### آئرودینامیک توپ فوتبال

بیشتر فیزیکدانان با قانون استوکس که به شرح حرکت یک کره در یک شاره چسبناک می‌پردازد آشنا هستند. در سرعتهای بسیار کم، رانش تویی که در هوا حرکت می‌کند تماماً توسط چسبندگی معین می‌گردد. هوا در اطراف توپ در راستای خطوط جریان حرکت می‌کند و جریان تکه شده منجر به استرسهایی می‌گردد که در نهایت یک نیروی رانشی روی توپ اعمال میکنند.

کتب درسی اغلب شرایط ریاضی ساده تری از جریان هوا را که بدون چسبندگی است بررسی میکنند که در آن هوا به سادگی از روی سطح کره سر می‌خورد. هر چند در حقیقت هوایی که با سطح کره در تماس است در سطح آن نگه داشته شده و با آن حرکت می‌کند. این شرط مرزی آنگاه بر جریان هوای دور از سطح توپ از طریق نیروی چسبندگی تاثیر میگذارد.

## رانش توپ فوتبال

اگرچه اندازه گیریهای دقیقی در زمینه آئرو دینامیک کره های صاف انجام شده اما نتایج یکسانی برای توپهای فوتبال بدست نیامده است. حال چگونه میتوان دریافت که یک توپ فوتبال چگونه رفتار می کند؟ اولین راهنما، اندازه گیریهای بعمل آمده روی کره های ناصاف همانند توپ گلف بود. آنها یک افت ناگهانی در ضریب رانش را نشان می دهند اما گودیهای روی توپ گلف موجب میشوند تا این افت در سرعتهای خیلی پایین تری نسبت به آنچه برای کره صاف بدست آمده اتفاق افتد.

حال سطح توپ فوتبال صاف است یا خشن؟ بازیکنانی که هم با یک توپ پلاستیکی صاف و هم با یک توپ مناسب چند تکه بازی کرده اند می دانند که این توپها رفتار متفاوتی از یکدیگر نشان می دهند. پرواز یک توپ فوتبال خوب بطور چشمگیری قابل اعتمادتر است. چرا چنین است؟ آشکارترین تفاوت میان دو نوع توپ عبارتست از بریدگیهای سطح یک توپ فوتبال که در فواصل میان تکه های بهم دوخته شده وجود دارند. دوختن نوعی دندانانه دندانانه شدن را در سطح بوجود می آورد که برای نمونه ۲ میلیمتر عمق دارند. این ناصافی در سطح در حدود ضخامت اندازه گیری شده برای لایه مرزی است. احتمالاً تکه دوزی موجب ایجاد یک ناپایداری در لایه مرزی شده و مخلوط شدن را آغاز می کند که خود موجب تاخیر در جداسازی گشته و رانش را کاهش میدهد.

یک بازی فوتبال تا حد بسیار زیادی تحت تاثیر نیروی رانشی است. اگر هیچ رانش هوا وجود نداشت ضربات دروازه بان - که اغلب به پشت دایره مرکزی می رسد - در جمعیت نقطه مقابل زمین فرود می آمد. از آنجا که کوتاهی مسیر پرواز بخشی از تجربیات ما است، لذا آنرا در بست قبول می کنیم. اثر هوا در هنگام باد بیشتر مشخص

می گردد. برخی از دروازه بانان حتی موفق شده اند با ضربه ای از مقابل دروازه خود گل به ثمر برسانند ضمن قدردانی از بادی که موجب شده تا توپ به پشت دروازه بان حریف که از خط خود جلوتر آمده است بیافتد. در مقابل، بادی که سرعتی برابر ۶۵ کیلومتر بر ساعت دارد قادر است تا سرعت یک شوت به سمت دروازه را در حین پرواز به حد کافی کم کند به نحوی که پس از برخورد با زمین به سمت عقب حرکت نماید.

## اثر مگنوس

حال چگونه بازیکنانی همچون ریولینو و کارلوس قادرند توپ را در مسیری منحنی به حرکت در آورند؟ کلید این مسئله در نیروی متقاطع روی توپ چرخان نهفته که در قرن هجدهم توسط مهندس و ریاضیدان انگلیسی بنام بنجامین رویینزو سپس در قرن نوزدهم توسط فیزیکدان آلمانی بنام گوستاو مگنوس مطالعه شده است. توضیحات اثر مگنوس اغلب بیان می دارند که چرخش یک توپ در حال دوران موجب می شود تا هوای اطراف توپ در یک سمت آن سریعتر از سمت دیگرش حرکت کند و آنگاه اصل برنولی که می گوید - افزایش سرعت در مسیر جریان باعث کاهش فشار می شود - به وجود اختلاف فشار میان دو سطح توپ اشاره می کند. این اختلاف فشار نیرویی یکسویه ایجاد کرده که موجب انحنای مسیر توپ می گردد. البته میان سرعت باد در دو طرف توپ اختلاف وجود دارد اما چرخش توپ موجب رانش این اختلاف سرعت از طریق نیروی چسبندگی شده و حضور این نیرو معادله برنولی را بی اعتبار می سازد. بعلاوه الگوی واقعی شارش با جدایی دیفرانسیلی و دنباله متلاطم تغییر شکل یافته - محاسبات فشار - تعادل را بسیار پیچیده می کند.