

FUTBOLUN FİZİĞİ

2002 Dünya Kupası, fizikçilere futbolun mekaniği ve aerodinamiği üzerine kafa yormak için bekledikleri fırsatı verecek.



FUTBOL dünyanın en popüler sporu. Bu yaz, Dünya Kupasını televizyonda, pek çoğu futbolcu olan yüz milyonlarca seyirci izleyecek. Bu ilgi düzeyine karşın oyunun bilimsel yönüne gösterilen ilgi, şaşılacak derecede az. Oysa bir fizikçi için fut-

bolun mekanik ve aerodinamiğinden, birbirinden ilginç birçok soru çıkar.

Futbolun fiziği söz konusu olduğunda çoğu zaman falsolu vuruşlar konuşulur. Örneğin 1974 Dünya Kupasında televizyon izleyicileri, Brezilyalı Roberto Rivelini'nin herkese küçük dilini yutturan "muz" biçimli fal-

solu şutuna hayran olmuşlardı. O zamandan beri topa böylesine falsoaldırmak oyunun önemli becerilerinden birisi olarak sayılıyor.

Ama meraklıları, ustaca falso verilmiş bir şut görmekten hiç bıkmıyorlar. 1997'de bir diğer Brezilyalı, Roberto Carlos'un Fransızlara çektiği falsolu şuta herkes bayılmıştı. 30 metreden yaptığı serbest vuruşta top barajın en az bir metre açığından geçtikten sonra, içeri falso alarak Fransızların kalesine doksandandırmıştı. İngiliz futbolseverler David Beckham'ın bir an önce iyileşerek Dünya Kupasında benzeri şutları atmasını umuyorlar.

Fizikçilerin çoğu, falsolu gidiş ya da uçuşun Magnus olayından ileri geldiğini bilseler de, açıklamasını yaparken işler biraz berraklığından kaybeder. Falsolu uçuşun açıklamasına geçmeden önce daha basit bir problemi, topun sıçrayışını ele alalım. 1966 Dünya Kupasında Wembley'de İngilizlerin Almanları 4-2 yendiği maçta Geoff Hurst'ün attığı ve tartışması hâlâ süren 3. golü kim unutabilir? Hurst'ün şutu üst direktten kale "içine" sıçradıktan sonra Alman savunma oyuncusu tarafından uzaklaştırılmıştı. Bu nasıl olabiliyor?

Sıçrama

Topun yerden sıçrayışı futbolda çok önemlidir. Sert yüzeylerde topun fazla sıçraması oyunu altüst ederken, top yumuşaksa sıçrayış ölür gider. Bunun kadar önemli bir nokta, vuruşun kendisinin de ayaktan gerçekleşen sıç-

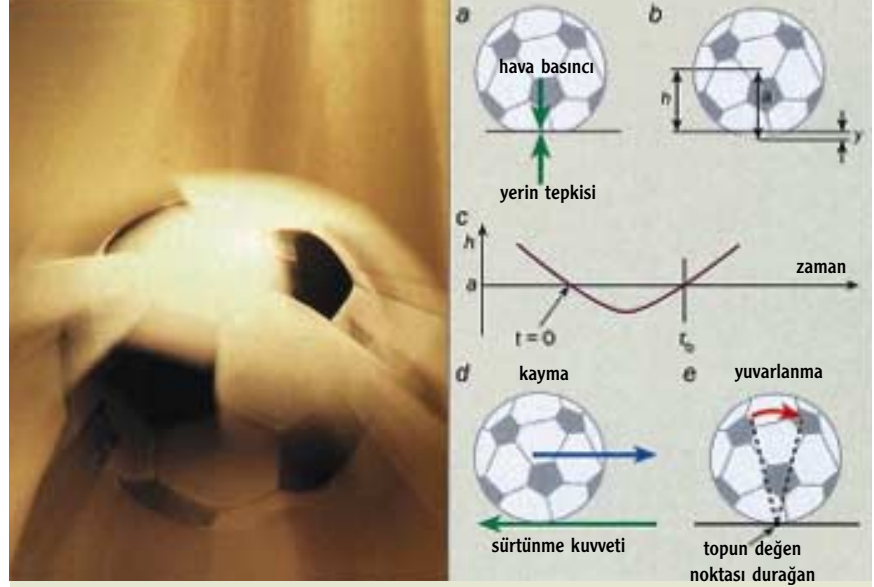
rama olması. Bir de topun esnekliğinin, kendi malzemesinden değil, içindeki basınçlı havadan ileri gelmesi meselesi var. Sönük bir top yerde kalakalır.

Sıçrayışın fiziğine ilişkin bir sezgi edinmek için topun düşey olarak yere geldiğini düşünelim. Yere çarptığında topun alt yüzeyi yassılaştır. İç basıncın uyguladığı kuvvetle yerden yukarıya olan tepki kuvveti dengelenir. İç basınç büyük oranda düzgün dağılmış olduğundan, tepki kuvveti topun yerle temas ettiği alanın büyüklüğüyle, bu da (fazla büyük olmamak koşuluyla) topun düşey olarak ne kadar deforme olduğuyla orantılıdır. Basit bir hesap, topun $y = a - h$ deformasyonunun t zamanıyla sinüzoidal olarak değiştiğini gösterir: $y \propto \sin(cp/m)^{1/2}$. Burada c , p ve m topun sırasıyla çevresi, iç basıncının dış basınçtan farkı ve kütesidir. Sıçrama $t_p = \pi(m/cp)^{1/2}$ kadar sürer.

Sıçrama süresini veren bağıntıdaki her üç parametrenin de (çevre, basınç, kütle), oyunun kurallarının belirlediği parametrelere uygunluğu çok güzel. Kütle 0,45 kg, çevresi 70 cm ve iç basınç farkı 0,85 atmosfer ($8.6 \times 10^4 \text{ Nm}^{-2}$) olan tipik bir topun sıçrama süresi 8 milisaniye kadardır. Bu sonuç, hızlı kameralar kullanılarak gerçekleştirilmiş durumda. Bu sürenin, ardışık televizyon karelerinin 40 milisaniyelik atlama hızından 5 kez küçük olması ilginçtir. Buna göre izleyiciler çoğu kez asıl sıçrayışı kaçırmırlarken, beyin kalan aralığı "doldurur".

Sıçrayışa ilişkin bu süre ve hareket hesapları, top kılıfının esnemesinden ileri gelen yitimleri yoksa. Bu yaklaşıklık zaman ölçeğini önemli ölçüde etkilemez, ama açıkça topun kinetik enerjisini olduğundan fazla verir. Bu etki, ampirik olarak topun sıçramadan sonraki hızını $v = -e v_0$ olarak verir (v_0 , topun çarpma hızı; e ise esneme katsayısıdır). Tam esnek bir çarpışma da 1 değerini alan e , yüzeyin doğasına bağlı olup sert bir yüzey için 0,8; kısa kesilmiş çim zemin için 0,6 kadardır.

Top zemine açıyla geldiğinde sıçramanın fiziği daha karmaşıktır. Başlangıçta top, yerde darbe hızının yatay bileşeniyle kayarak, yatay bir sürtünme kuvveti oluşturur. Bu kuvvetin iki etkisi olur: yatay hareketi yavaşlatır ve



Futbol Topunun Sıçrayışı

Şut çekildiğinde, top aslında ayakta sıçradığı halde, topun zeminden nasıl sıçradığı da futbolda anahtar bir rol oynar.

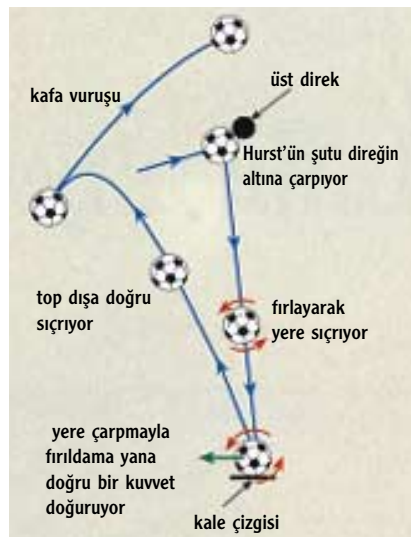
(a) Sıçrama sırasında hava basıncının topun kılıfına etkileyen kuvveti, yerin tepkisiyle dengelenmektedir.

(b) Top merkezinin yerden yüksekliği h , a -y olarak yazılır. Burada a topun yarıçapı, y ise deformasyon miktarıdır.

(c) Düşey olarak yere çarpan bir top için y değeri sıçrama sırasında t zamanıyla sinüzoidal olarak şu bağıntıyla değişir: $y \propto \sin(cp/m)^{1/2}$. Burada c , p ve m sırasıyla topun çevresi, iç basıncının dış basınçtan farkı ve kütesidir. Sıçrama $t_p = \pi(m/cp)^{1/2}$ kadar sürer.

(d) Yere, yataya yakın bir açıyla çarpan top sıçrayana dek kayar. (e) Yere düşeye yakın bir açıyla çarpan top ise yerden ayrılırken fırlamaya başlar.

topa bir dönme momenti uygular. Bu momentin etkisiyle top yerde yavaşlarken yuvarlanmaya da başlar. Yerde ya-



Gol mü?

İngilizlerin 1966 Dünya Kupası finalinde Almanlara karşı kazandıkları 4-2'lik zaferdeki olguların dizilişi. Top kale çizgisine çarparak dışarıya sıçırıyor.

pılan açıya göre iki özel durum söz konusudur. Yere yakın bir açıyla çarpan top sıçrama bittiğinde kaymayı sürdürebilir. Ama top dikeye yakın açıyla çarparsa sıçrama tamamlanınca ya dek, alt yüzeyi duracağından top yerde yuvarlanır.

Eğer topun yerde kazandığı geri fırlama çok yüksek olursa topun hızlanması bile mümkündür. Ancak, bu olağanüstü bir olgudur; top normalde sıçrama sırasında yavaşlar. Buna karşılık televizyonlar için maçları anlatanların ıslak zeminde topun "hız kazandığını" söylemeleri pek de ciddiye alınmaz. Böyle anlaşılması, bir olasılıkla bu gibi durumlarda kayma sırasında beklenen yavaşlamanın gerçekleşmemesinin, izleyene hızın arttığı izlenimini vermesine bağlı olabilir.

1966'da Hurst'ün Almanya'ya attığı gol, belki de futbol tarihinde, üzerinde en çok konuşulan goldü. Her iki sıçrama da (direkten ve yerden) yukarıda sunulan kavramlar yardımıyla betimlenebilir. Ancak, direktten sıçrama-

Futbol Aerodinamiği

Çoğu fizikçi Stokes yasasını iyi bilir. Bu yasa kürelerin viskoz (iç sürtünme yaratan) bir sıvadaki hareketini betimler (Stokes rejimi). Çok düşük hızlarda havada giden topun engellenmesi yalnızca bu viskozlukla belirlenebilir. Hava topun etrafında akış çizgileri halinde hareket ederken viskozlukta doğan yavaşlama, top üzerinde de sürükleyici bir etki yapar. Bu sürükleyici kuvvet topun v hızıyla orantılıdır.

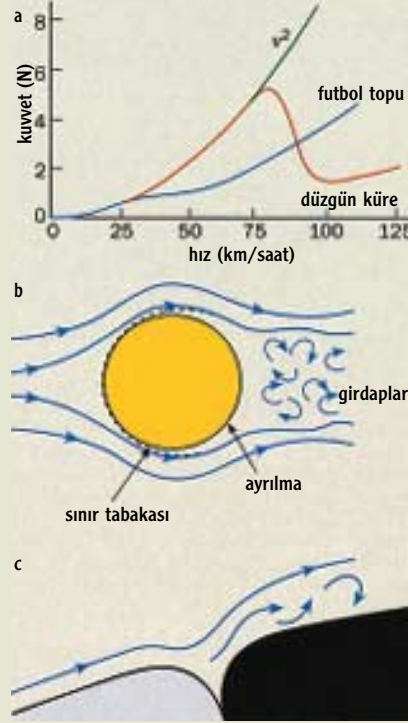
Yüzeyindeki "sınır koşulu" topun aerodinamiğinde önemli bir rol oynar. Ders kitapları çoğu kez viskozluğun olmadığı akışı inceler; bu durumda hava küre yüzeyinde "kayar". Oysa gerçekte topa değen hava yüzeyde tutulur ve onunla birlikte hareket eder. Bu sınır koşulu ise viskozlukla topun uzaklarına kadar kendisini gösterir.

Akışın toptan öteye etkilendiği s uzaklığı kabaca $(\nu t)^{1/2}$ kadardır. Burada ν viskozluk katsayısı, t ise havanın topla etkileştiği süredir. Bu süreyi d/v olarak alabiliriz (d , topun çapı). Bu, $R = vd/\nu$ boyutsuz "Reynolds sayısı" olmak üzere $\delta \sim d/R^{1/2}$ demektir. Cisimlerin akışkanlar içinde hareketini betimlemekte önemli bir belirtici olan R sayısı, bir futbol topu için $3800v$ kadardır (hız km/saat olarak ölçülmelidir).

Stokes rejimi $R < 1$ için geçerlidir. Bu da top hızının saatte 25 cm'den düşük olmasını gerektirir. Daha gerçekçi, yani 25 km/saat gibi bir hızda Reynolds sayısı 100.000 kadardır. Bu ise δ için yaklaşık $d/300$ değerini verir (yaklaşık 1 milimetre). Topun yüzeyindeki bu daracık viskoz bölgeye "sınır tabakası" denilir. Bu kavramı fiziğe 20. yüzyılın başlarında Alman fizikçi Ludwig Prandtl getirmiştir. Bu tabakanın dışında viskozluk etkisi önemini yitirir ve akış "ideal" olur.

Ancak öykümüz bununla bitmiyor. Viskozluk, akış düzeni bakımından önemli olsa bile bunun doğurduğu sürüklenme aslında eylemsizlikle ilgilidir. Akış düzeni sınır tabakasının davranışından etkilenir. Topun ardında sınır tabakası yüzeyden sıyrılarak, özellikle yüksek hızlarda kararsız hale girer (girdaplanma). Düzgün bir küre için bu kararsızlık, sürüklenmede beklenmeyen büyük bir düşmeye yol açar.

Küreye doğru akan (burada tabii ki asıl hareket topta; topun durur, havanın akar alınması çözümü kolaylaştırır) havanın momentumu $\rho v A$ ile (ρ , havanın yoğunluğu; v , kürenin hızı; A , topun kesit yüzölçümü); F_D sürüklenme kuvveti ise $1/2 C_D \rho A v^2$ olarak verilir. Sürüklenme katsayısı denilen C_D deneysel olarak belirlenir. Bu katsayı Reynolds sayısına bağlı olup R havada giden düzgün yüzeyli her boy küre için çok iyi belirlenmiştir. Bu bakımdan futbol topu büyüklüğünde bir küre için sürüklenme kuvvetini hesaplamak kolay-



Hava Akışı ve Toplar

(a) Futbol topuna etkiyen sürüklenme kuvvetinin düzgün bir küreninkine karşılaştırılması. Düzgün küre üzerindeki sürüklenme yaklaşık 80 km/saat'lik "kritik hızda" beklenmeyen bir düşme gösteriyor. Futbol topu içinse 30 km/saat'lik, çok daha az bir değişime söz konusu.

(b) Kritik hızın altında küre çevresinde görülen akış. Hava topun ardına pek erişemeyerek topun arkasında yavaş ilerleyen girdaplı bir izleyiş göstermekte.

(c) Topun dikleş aralıklarının diğer bölgelerde düzgün olan akışı etkileyişi.

dir. Yaklaşık 80 km/saat'lik kritik hızda hem sürüklenme katsayısı hem de sürüklenme kuvveti hızla birlikte azalmaya başlar. Bu hızın üstünde sürüklenme iyice azalır.

Kritik hızın altında, kinetik enerjinin sınır tabakasında viskozlukla yitimi havanın kürenin ardına dolanmasına engel olur; böylece de akış yüzeyden "ayrılır". Bu süreç kararsız olup kürenin arkasında girdaplı ve yavaş giden bir iz bırakır.

Kritik hızda sınır tabakası kararsızlaşıp dışarıda daha hızlı akan havayla karışır. Bu, akışın momentumunu artırıp ayrılmayı geciktirerek izin kılmasına ve sürüklenmenin azalmasına yol açar. Bu etkiler deneysel olarak enine boyuna incelenmiş olup C_D 'nin Reynolds sayısına bağlılığı, düzgün küreler için geçen yüzyılın başlarında elde edilmiştir.

dir. Yani hem yardımcı hakem hem de orta hakem, golü vererek hata yapmış oluyorlar.

Evet, İngiltere maçta bir gol daha attı ama bu, insanların Hurst'un bu golünü tartışıp durmalarını engellemez. Gene de kuramın yapabileceği

bir katkı var: Top, direğin bir santimetre daha altına gelmiş olsaydı, kale çizgisini geçebilecekti. Ama bu kez de futbol meraklıları, tartışacakları ilginç bir konudan yoksun kalacaklardı.

Vuruş/Şut

Topa vuruş da bir sıçrama olarak ele alınabilir. Eğer ayak, vuruş anında v hızıyla hareket ediyorsa top, değmeden önce ayağa göre $-v$ hızıyla ayağa doğru gelir ve sıçrayarak $+ev$ hızıyla gider. Demek ki topun hızı, toplam $(1+e)v$ kadar değişiyor. Bu ise topun uçup gittiği asıl hızdır. Sıkı bir penaltı atışında top 130 km/saat kadar hızla hareket eder ve atış noktasından kaleye olan 11 m'lik yolu saniyenin üçte biri kadar bir sürede alarak kaleciye iyi bir atışı kurtarmak için çok az bir süre tanır. Ayağın vuruş hızı ise 80 km/saat kadar olacaktır.

Hızlı bir vuruşun biyomekaniği de ilginçtir. Bacağın üst kısmı kalça etrafında dönmeye zorlanırken diz altı kısım başlangıçta arkada kalır. Dönme tamamlanırken alt kısım ve ayak "savrulur". Bu süreçte ayak hızlanır ve bacağın üst ve alt kısmı hizaya girer.

Basit bir vuruşta oyuncu istediği yöne gideceğinden emin olmak için ayağını topun merkezine yöneltmeye çalışır. Topa falso vererek hedefe göndermeyi amaçlayan daha incelikli bir vuruş, daha büyük bir beceri gerektirir. Ancak oyuncuların, topun yolunu nasıl eğilttiklerini anlamak için, önce topun uçuşta nasıl devindiğini incelemek gerekiyor.

Magnus Olayı

Peki, Rivelino, Carlos ve Beckham gibi oyuncular topa falsoyu nasıl veriyorlar? İpucu, fırlıdayan topa etkiyen enine kuvvette yatıyor. Bu olgu 18. yüzyılda İngiliz matematikçi ve mühendis Benjamin Robins ve 19. yüzyılda Alman fizikçi Gustav Magnus tarafından incelenmiş. Bu tür olaylar genellikle Bernoulli ilkesiyle açıklanır. Buna göre fırlıdayan top, havanın, topun bir yanında hızlanırken diğer yanında yavaşlamasına yol açar; bu da basıncın hızlı yanda azalmasına, yavaş yanda artmasına yol açarak topun bu basınç farkıyla yana itilmesini, yani

Futbol Topunun Sürüklenmesi

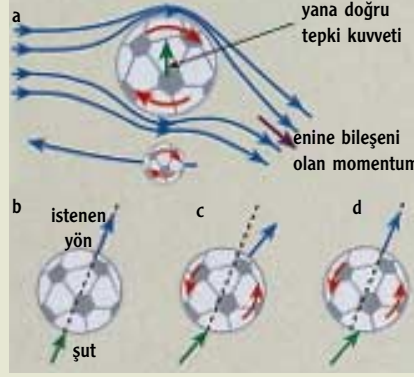
Düzgün kürelerin aerodinamiğine ilişkin pek çok ayrıntılı ölçüm olduğu halde futbol topları için benzeri sonuçlar yok. Peki, topumuzun nasıl davranacağını nasıl bulacağız? İlk ipucu, pürtüklü kürelerden geldi. Sürüklenme katsayısı, üzerlerindeki çukurcuklar yüzünden golf toplarında çok daha düşük hızlarda düşer. Geçiş değeri, düzgün kürelerde $R = 350.000$ olurken golf toplarında 7 kat azalır. Çukurcuklar, sınır tabakası kararsızlığının oluşmasını, yani sürüklenmenin düşmesini öne alıyor olmalı.

Öyleyse, futbol topu düzgün müdür, pürtüklü mü? Bilinen bir şey var ki, hem plastik toplarla hem de “has” dikişli toplarla oynayan futbolcular bunların hareket farkını bilirler. İyi bir futbol topunun uçuşu, belirgin bir şekilde daha güvenilirdir. Neden? İki top arasındaki en açık farklılık, asıl futbol topunun yüzey parçalarının birbirlerine dikili olduğu yerlerdeki kesintilerdir. Dikişler yüzeye tipik 2 mm derinliğinde girintiler oluşturur. Bu yüzey pürüzlülüğü, yüzey katmanının hesaplanan kalınlığı kadardır. Anlaşılan dikişler yüzey katmanında kararsızlık oluşturarak, karışmayı başlatıp ayrılmayı geciktiriyor ve sürüklenmeyi azaltıyor.

Önceden yapılmış hazır veriler olmadıysa, futbol topu üzerindeki sürüklenmeyi ve bunun havanın hızına bağımlılığını belirlemek için yapılan bir deneyde, temel fikir topu bir iple sarkaç gibi asarak, hızı bilinen bir hava akımına maruz bırakmaktır. Denge konumunda sarkacın düşeyden ayrılma açısı (θ) ölçülüp, bilinen ağırlığı (mg) da kullanılırsa, sürüklenme kuvveti (mg) $tg\theta$ olarak ölçülmüş olur (g , yerçekimi ivmesidir).

Araştırmacılar, “sarkacı” ciplerinin yanından uzattıkları bir çubuğa asıp cibi yakındaki bir hava alanındaki boş bir pistte çeşitli sabit hızlarda sürdüler. Sapmaları da bir video kameralarla kaydederek ölçtüler.

Sonuçlarda iki nitelik, açıkça görülüyordu. Önce; sürüklenme hızı, düzgün küreler için he-



Magnus Olayı

(a) Fırıldayan top uçuşta hava akışını bir yana iter. Top üzerinde bunun tepki kuvveti ise Magnus kuvvetidir. Havaya göre top sola gittiği için resimdeki gibi “yukarıya” sapacaktır.

(b) Topa düz vurulduğunda fırlatma olmayacağı için top falso almaz.

(c) İstenen yöne bir açı yapılarak aynı noktadan vurulan top fırlar ama yanlış yöne sapar.

(d) Topun hedefe yeniden yönelmesi için doğru açı ve merkez dışı noktadan yeterli şiddetle vurulması gerekir.

saplanan 80 km/saat değil, 40 km/saat çıktı. İkincisi, yalnızca sürüklenme katsayısındaki düşme F_D , sürüklenme kuvveti bağıntısındaki v^2 bağımlılığını tam karşılıyordu. Ölçülen sürüklenme kuvveti, böylece –yüksek hızlarda tekrar artmadan önce– düzgün kürede görüldüğü gibi keskin bir düşüş göstereceğine, bir “yayla” görünümü alıyor.

Futbol maçları topun bu sürüklenmelerinden çok etkilenir. Sıkı kaleci vuruşları (degaj), normalde orta yuvarlağın gerisine yaklaşırken, hiç hava sürüklenmesi olmasa, karşı kaleyi aşır seyrilere dek erişebilir. Havanın etkisi rüzgârda daha iyi belli olur. Rüzgâr karşıdan 65 km/saat hızla estiğinde de kaleci vuruşunu yavaşlattığı gibi yere düşene dek geriye bile döndürebilir.

uçuşun falsolu hale gelmesini sağlar.

Tabii, topun iki yanındaki hava hızı farklıdır. Ancak dönen topun bu farkı doğurması, viskozluk kuvvetinden kaynaklanır. Bu kuvvetin varlığıysa Bernoulli ilkesini burada geçersiz kılar. Dahası, asıl akış düzeni –ayrılma farklılıkları, saptırılmış girdaplı iz vb.– basınç-denge hesabını çok karmaşık hale getirir.

Gene de yana doğru kuvvetin kökenini anlamamızın basit ve ikna edici bir sezgisel açıklaması var: Fırıldayan top, havayı bir yanında hızlandırır, diğer yanında da yavaşlatır. Hızlandığı yanda havanın artan momentumu, onu topun arkasına daha çabuk götürerek ayrılmayı geciktirir. Daha genel terimlerle diyebiliriz ki akış düzeninin

de gelen hava akımı, toptan “sıçrayarak” onu yana iter.

Topun üzerindeki enine kuvvetin uçuş sırasında yaklaşık olarak sabit olduğunu varsayarsak topun bir t süresi içindeki yana doğru d yerdeğiştirmesi t^2 ile orantılıdır. Topun ileri gitme uzaklığı $x = vt$ olduğuna göre, yana doğru d sapması, x^2 ile orantılı olacaktır. Yani topun yörüngesi, parabol şeklini alır. Magnus kuvvetinin hız ve



fırıldamaya bağımlılığı, topun $x = L$ 'deki son $d = D$ sapmasının hesaplanmasında kullanıldığında, D/L oranı bu süre içinde topun dönme sayısı ile orantılı çıkar.

Her ne kadar futbol topları üzerindeki bu enine kuvvet ölçülmemişse de, başka toplar üzerinde yapılan ölçümler orantı katsayısını 0,01 olarak vermektedir. Örneğin $L = 20$ m'lik bir yol boyunca $D = 1$ m sapan bir topun havada 5 tur dönmüş olması gerekir. Ne var ki falsolu şutların televizyondan incelenmesi sonucunda, büyük falsoların daha az dönmeyle de oluştuğu gözlenebilmekte. Anlaşılan ortada pek de anlamadığımız bir şeyler dönüyor!

Beckham Gibi Saptır!

Peki, falsolu uçuş nasıl oluşacak? Bu soru yukarıda üzerinde durduğumuz tüm fiziği bir araya getirir. Belirli bir falsolu uçuşun aerodinamiği doğru fırlatma, hız ve ilk vuruş yönü gerektirir. Bu uçuşu doğuracak şut, ayağın topa tam gerektiği gibi vurmamasını bekler. Bundan sonra istenen vuruşu, mekanik denklemleri ayrıntıyla hesaplar.

Şut çekilirken topa tam gitmesi istenen yönde merkezi olarak vurulması bu amaca ters düşer. Top fırlamaz ve uçuşta falso almaz. Eğer topa gene aynı noktadan istenen fırlatmayı sağlayacak bir açıyla vurulursa yörünge eğrilir ama yön değişir. Ancak şut merkez dışı bir noktadan yeterli bir açı ve fırlatmayla çekildiğinde hem falso hem de uçuşun varacağı yön doğru olabilir.

İşte falsolu şut böyle çekiliyor! Şimdi kuramlara eğilimli okurlar, kalemi kâğıdı alıp hemen hesapları elden geçirmeye başlayabilirler. Daha pratik olanlarsa topu alıp bunu sahada deneyebilirler. Öte yandan bu makaleyi okuduğunuzda Dünya Kupasında sıkı bir vuruş yapmak için fazla geç kalmış olsanız da bu yeni edindiğiniz bilgiyle belki mahalle takımınıza caka satabilirsiniz. Belki pek çoğunuz da, maçları bekleyip, televizyon karşısında her falsolu vuruşta “ben bunun sırrını biliyorum” diyeceksiniz.

John Wesson

Physics World, Mayıs 2002

Çeviri: R. Ömür Akyüz,

Yeditepe Üniversitesi