Hayvanların Toplu Hareketlerinin Dinamiği
Koyun Sürülerinin Fiziği

Dr. Mahir E. Ocak [*TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*

Hayvan sürülerinin toplu hareketlerini açıklayan fiziksel modeller geliştirmek üzerine onlarca yıldır bilimsel çalışmalar yapılıyor. Bu modellerin uygulama alanları sadece hayvan sürüleriyle de sınırlı değil. Araç trafiği ya da yayaların hareketleriyle ilgili basit modeller bile gerçek hayatta karşımıza çıkan trafik sıkışıkları ya da tehlike altındaki insanların panik hâlinde kaçışması gibi karmaşık durumları gayet başarılı bir biçimde betimleyebiliyor. Son zamanlarda üzerine çalışmalar yapılan konulardan biri ise koyun sürülerinin toplu hareketlerini modellemek. Geliştirilecek algoritmalar sayesinde gelecekte bir gün koyun sürülerini güden robotlar ya da insansız hava araçları geliştirmek mümkün olabilir.

sanddebeatthell / iStock

Sürü İçinde Yaşamanın Avantajları

Sürü hâlinde yaşamanın pek çok avantajı vardır: yırtıcı hayvanlara karşı korunma, çevreyi toplu hâlde algılama, bilgiyi paylaşma ve işleme... Bu avantajlardan yararlanılabilmesi için sürünün birlik ve beraberliği her durumda korunabilmelidir. Dolayısıyla hareket hâlindeki sürülerin de bir arada kalmayı başarabilmesi gerekir.

Philip Thurston / iStock

Farklı hayvan türlerindeki sürülerin toplu hareketlerinin gerçekleşme biçimi arasında doğal olarak farklılıklar var. Örneğin bazı hayvan türlerinde toplu hareketleri yönlendiren bir lider bulunmazken bazı hayvan türlerinde ise hiyerarşi gözlemleniyor. Örneğin sığırcık sürüleri, toplu hareketlerin bir lider tarafından yönlendirilmediği türlerin örneklerinden. Fil sürüleri ve zebra sürülerinde ise bireyler bir çizgi hâlinde hareket ediyor ve sürünün en önündeki birey, harekete liderlik ediyor. Bu tür hiyerarşilerin hem avantajları hem dezavantajları var. Kararların sürü içinde uzlaşarak değil de bir lider tarafından verilmesi hâlinde sürü çok daha hızlı bir biçimde uygulamaya geçebiliyor. Kararların bir lider tarafından verilmesinin dezavantajı ise karar alma sürecinde kullanılan bilginin sınırlı kalması, farklı bireylerin sahip olduğu farklı bilgilerin karar alma sürecine katkıda bulunmaması.

Reynolds Algoritması

Yazılım mühendisi Craig Reynolds, 1987 yılında kuş sürülerinin hareketleri için bir algoritma geliştirmişti. Kuşların sadece yakın çevrelerindeki diğer kuşların hareketlerini algılayıp tepki vermesine dayalı algoritma, birkaç basit kuralla kuş sürülerinin hareketlerini gayet başarılı bir biçimde simüle edebiliyordu.

Reynold'un algoritmasındaki sanal kuşlara İngilizcede kuş anlamına gelen bird ve insan benzeri robot anlamına gelen droid kelimelerinin bir araya getirilmesiyle türetilmiş bir isim veriliyor: boid. Bu sanal kuşların toplu hâlde hareket ederken uyması gereken üç basit kural var:

1. Yakın çevredeki aşırı kalabalıklaşmış boidlerden uzaklaş,

2. Hareket yönünü yakın çevredeki diğer boidlerin ortalama hareket yönüne ayarla

3. Yakın çevredeki diğer boidlerin ortalama konumuna (yakın çevredeki boidlerin kütle merkezine) doğru yol al.

Ashley Cooper / SPL

Sığırcık sürüsü

Bu kuralların birincisi çarpışmaları engelleyen bir itici kuvvet tanımlar, ikincisi ve üçüncüsü ise sürünün bir bütün hâlinde hareket etmesini sağlar.

Lion King (Aslan Kral) filminde antilop sürüsünün hareketlerini simüle etmek için boid modeli kullanılmıştı.

Boid modeli ilk olarak Reynolds'un çalışanı olduğu Symbolics firması tarafından yayımlanan "Stanley and Stella in: Breaking the Ice" adlı kısa animasyon filminde kuşların ve balıkların hareketlerini simüle etmek için kullanılmıştı. İlerleyen yıllarda "Lion King" ve "Batman Returns" gibi pek çok filmde yarasa, penguen ve antilop gibi hayvan sürülerinin toplu hareketlerini simüle etmek için boid modeli kullanıldı.

Boid modelinin uygulama alanı sadece bilgisayar grafikleri ile sınırlı değildir. İnsansız hava ve kara aracı sürülerini toplu hâlde hareket ettirmek için de Reynolds algoritması kullanılabilir.

Toplu Hareketler ve Faz Dönüşümleri

Canlı organizmaların toplu hareketleri üzerine yapılan araştırmalar "aktif madde" biliminin ortaya çıkmasına yol açtı. Aktif madde terimi kendi itkisiyle (enerji tüketerek) hareket eden maddeyi tanımlamak için kullanılır. Hayvan sürülerinin yanı sıra bakteri kolonileri, canlı dokularda toplu hâlde göç eden hücreler ve kendi itkisiyle hareket eden kolloidler de aktif madde biliminin kapsamına girer.

1990'ların sonralarında fizikçiler Tamás Vicsek ve Andras Czirók aktif maddenin toplu hareketleriyle düzenli dizilerdeki parçacıkların manyetik spinlerinin davranışları arasında benzerlikler tespit etti. Düzenli dizilerdeki manyetik spinler de yakın çevrelerindeki diğer manyetik spinlerin durumunu "algılar" ve "cevap verir". Aktif madde ile düzenli dizilerdeki manyetik spin sahibi parçacıklar arasındaki en temel fark, aktif maddenin hareketli olması, düzenli dizilerdeki parçacıkların ise belirli konumlarda bulunmasıdır.

Vicsek ve Czirók'un elde ettiği sonuçların en önemlilerinden biri, grup hareketlerinde ani faz dönüşümlerinin gerçekleşebileceğinin ve hangi fazların (hangi tür davranışın) hangi koşullar altında ortaya çıktığının bir faz diyagramı içinde özetlenebileceğinin gösterilmesi oldu. Bir tür maddenin katı, sıvı, gaz hâllerinin hangi sıcaklık ve basınç koşulları altında ortaya çıktığının maddeye özgü faz diyagramlarında betimlenmesine benzer biçimde, hangi tür grup davranışının hangi koşullar altında ortaya çıktığı da faz diyagramlarında betimlenebilirdi.

Koyun Sürelerinin Dinamikleri

Son zamanlarda üzerine çalışmalar yapılan konulardan biri koyun sürülerini modellemek. Çeşitli araştırma grupları, gerçek koyun sürülerini doğada gözlemleyerek sürülerin dinamiklerini daha iyi anlamaya ve bu dinamikleri en iyi betimleyen modeller geliştirmeye çabalıyor. Konuyu zorlaştıran en önemli etkenlerden biri, koyunların genel kanının aksine pek de uysal hayvanlar değil farklı kişiliklere sahip canlılar olması. Sürüdeki tüm bireylerin birbirinin tıpa tıp aynısıymış gibi ele alındığı modellerle gerçekçi bir koyun sürüsü modeli elde etmek zor. Ayrıca gerçek

sürülerin davranışları, Reynolds algoritması benzeri algoritmaların betimlediğinden çok daha karmaşık. Örneğin gerçek sürüler sürekli hareket hâlinde değil. Hayvanlar beslenmek ya da dinlenmek için mola veriyor, yeni beslenme alanları arıyorlar.

Remus86 / iStock

Paris'teki Cergy Üniversitesinden Fernando Peruani ve arkadaşları, sadece birkaç bireyden oluşan Merino Arles türü ufak koyun sürülerini gözlemleyerek bir model oluşturdu. Büyük bir arazide serbestçe dolaşan koyunların zamanlarının büyük kısmında otladıkları görüldü. Ancak koyunlar sık sık bir çizgi hâlinde dizilerek dolanmaya başlıyor. Koyunlar dolanırken en öndeki birey lider rolünü üstleniyor. Ancak liderlik rolü sürüdeki bir koyunun tekelinde değil. Otlayan koyunlardan herhangi biri dolanmaya başladığında geçici olarak eşitler arasında birinci konumuna geliyor. Ta ki sürü yeniden bir yerde durup otlamaya başlayana kadar. Araştırmacılar, liderlik rolünün süredeki koyunlar arasında sürekli el değiştirmesinin bilgi paylaşımı ve birikimi sağladığı ve böylece uzun müzakerelere gerek kalmadan da farklı bireylerin sahip olduğu farklı bilgilerin karar alma sürecine katkıda bulunduğu hipotezini öne sürüyor.

Peruani ve arkadaşlarının geliştirdiği modelde sürüdeki herhangi bir koyun, olasılıklar dâhilinde otlamayı bırakıp dolanmaya başlayabiliyor. Koyunlardan herhangi biri yürümeye başladığında diğerleri de onu takip etmeye başlıyor. Modeldeki sanal koyunlar arasında sürünün bir arada kalmasını sağlayan bir çekici kuvvet tanımlanıyor. Sistem "otlama fazından" "yürüme fazına" geçtiğindeyse koyunlar hızlarını ve doğrultularını yakınlarındaki diğer koyunlara göre ayarlıyor.

Peruani ve arkadaşlarının yaptığı simülasyonlarda sürüler, koyunların kümelenmiş bir hâlde bulundukları otlama fazıyla çizgi hâlinde hareket ettikleri yürüme fazı arasında aralıklı olarak geçiş yapıyor. Araştırmacıların yaptığı hesaplar, liderlik rolünün olasılıksal olarak sürekli el değiştirmesinin iddia ettikleri gibi etkin bir biçimde bilgi paylaşımı sağladığını gösteriyor. Bu deneysel ve kuramsal çalışmalar az sayıda koyun içeren ufak sürülerle sınırlıydı. Ancak gözlemler "liderini takip et" tarzı hareket etmenin daha büyük sürülerde de var olduğunu gösteriyor. Fakat hareket hâlindeki büyük sürülerde aynı anda birden fazla çizgi görülebiliyor.

Çoban Köpekleri

Çobanlar, koyun sürülerini gütmek için çoğu zaman çoban köpeklerinden yardım alır. Çoban köpeklerinin görevi basit, azımsanacak bir iş değildir. Bir çoban köpeğinin arazide görev yapmaya başlamadan önce birkaç ay eğitimden geçmesi gerekir.

Eliandr Photography / iStock

Harvard Üniversitesinden makine mühendisi Lakshminarayanan Mahedevan'a göre çoban köpeklerinin yaptığı iş esasen kontrol teorisiyle alakalı bir problem: Bir koyun sürüsü bir noktadan bir başka noktaya verimli ve doğru bir biçimde nasıl yönlendirilebilir?

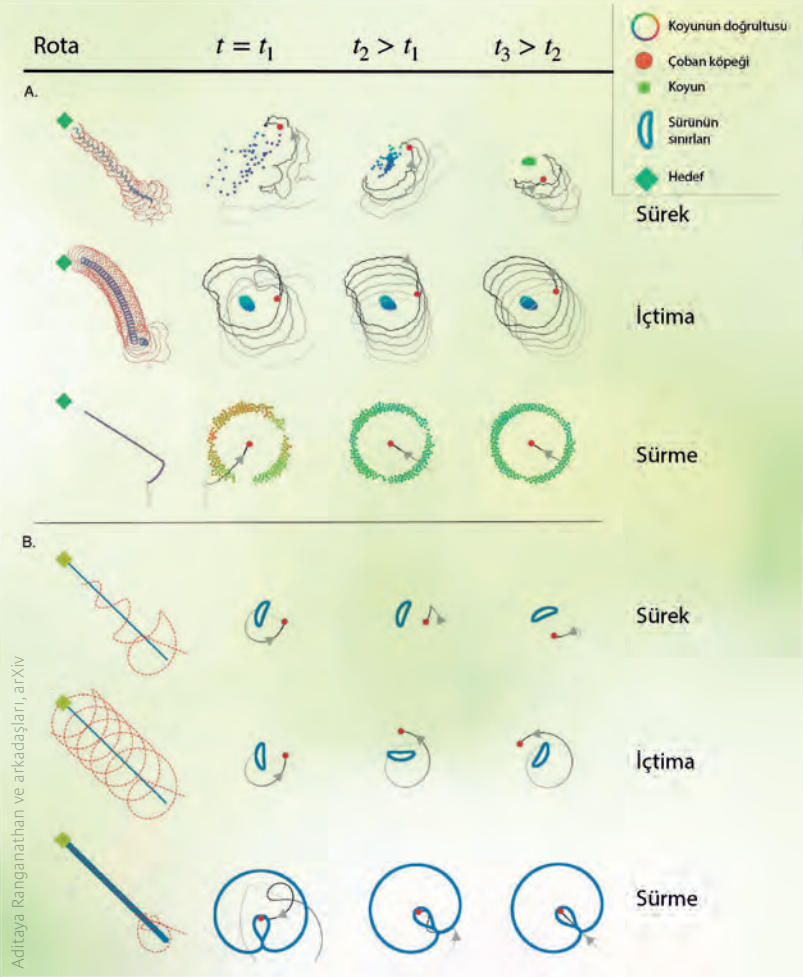
Mahedevan ve arkadaşlarının yaptığı araştırmalar, çoban köpeklerinin yerine getirdiği karmaşık görevin de basit bir modelle betimlenebileceğini gösterdi. Araştırmacılar, ilk olarak gözlemler yoluyla nasıl bir model oluşturulması gerektiği hakkında bir fikir edinmeye çalıştı. Sonuçta çoban köpekleri ve koyun sürüleri arasındaki ilişkinin temelinde iki ana etkenin olduğu sonucuna vardı. Birincisi, koyunlar sürü içinde yaşamanın avantajları nedeniyle bir arada kalmayı sever. İkincisi, koyunlar çoban köpeklerini sevmez. Başka bir deyişle koyunlar arasında "çekim", koyunlarla çoban köpekleri arasındaysa "itme" vardır.

Araştırmacılar iki ayrı model geliştirdi. Bu modellerin birinde koyun sürüsü çok sayıda koyundan oluşan karmaşık bir yapı, diğerinde ise tek bir bütün olarak ele alınıyor. Araştırmacıların diferansiyel denklemlerle formüle ettiği iki modeli kullanarak yapılan simülasyonlar, bir çoban köpeğinin bir koyun sürüsünü bir noktadan başka bir noktaya başarılı bir biçimde götürebilmesinin ya da götürememesinin iki etkene bağlı olduğunu gösteriyor: sürünün büyüklüğü ve çoban köpeğin hareket hızı.

Simülasyonlar sürünün büyüklüğüne ve çoban köpeğinin hareket hızına bağlı olarak dört ayrı durumun ortaya çıkabileceğini gösteriyor. Bu durumlardan birincisi çoban köpeğinin sürüyü yönlendirmeyi başaramaması. Bu durum sürünün görece büyük, köpeğin hızınınsa görece yavaş olması hâlinde ortaya çıkıyor.

Fetung / iStock

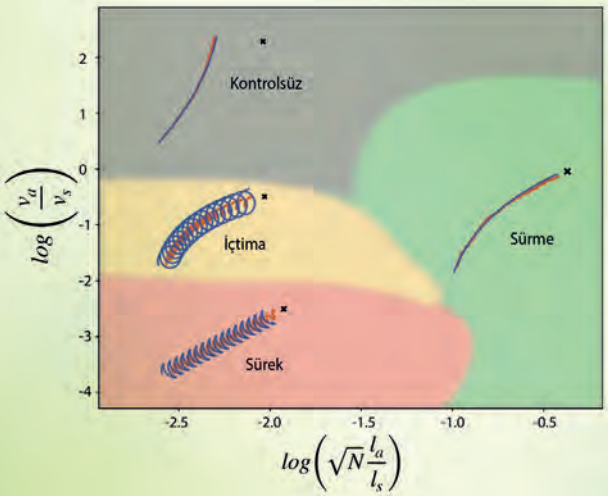
Simülasyonlara göre bir çoban köpeğinin bir sürüyü başarılı bir biçimde yönlendirmesinin üç ayrı yolu var. Sürek olarak adlandırılan birinci yöntemde köpek, sürünün iki ucu arasında ileri geri koşarak koyunları gitmeleri istenen noktaya doğru yönlendiriyor. Sürünün görece küçük, köpeğinse hızlı olması durumundaysa daha iyi bir yöntem var. İçtima olarak adlandırılan bu ikinci yöntemde çoban köpeği, sürünün etrafında heliks benzeri bir rota takip ederek koşuyor. Bu sırada sürünün şekli kendi etrafında dönen bir elips gibi sürekli değişiyor. Sürek ve içtima yöntemlerinin her ikisi de arazide çoban köpekleri tarafından koyun sürülerini gütmek için kullanılan yöntemler. Simülasyonlar, bu iki yönteme ek olarak arazide gözlemlenmeyen üçüncü bir strateji daha olduğunu gösteriyor. Sürme olarak adlandırılan bu yöntemde, tıpkı bir sürücünün bir arabayı içeriden idare etmesine benzer biçimde çoban köpeği de sürüyü içeriden idare ediyor. Çoban köpeği sürünün ortasına gidiyor. Koyunlarsa köpekten uzaklaşıyor ancak bir arada kalmak istedikleri için dağılmıyor. Bu yöntemde çoban köpeği sürünün hareket etmesi istenen iki nokta arasında yol alırken koyunlar da köpeğin etrafında bir halka oluşturup köpekle beraber yürüyor. Bu farklı stratejiler bir faz diyagramıyla betimlenebiliyor. Faz diyagramının bir ekseninde sürü büyüklüğü, diğerinde çoban köpeğinin hareket hızı yer alıyor.



Aditaya Ranganathan ve arkadaşları, arXiv

Mahadevan ve arkadaşlarının simülasyonlarına göre bir çoban köpeğinin başarılı bir biçimde bir koyun sürüsünü idare etmesinin üç ayrı yolu var: sürek, içtima ve sürme. Sürünün çok sayıda koyundan oluşan karmaşık bir yapı olarak ele alındığı modelin verdiği sonuçlar (üstte) ve sürünün tek bir bütün olarak ele alındığı modelin verdiği sonuçlar (altta).

Geliştirilen model her ne kadar başarılı sonuçlar verse de araştırmacılar bazı eksiklikleri olduğunu da belirtiyor. Örneğin modelde hayvanların her yönü görebildikleri varsayılıyor. Koyunların gözleri, av türü hayvanların genelinde olduğu gibi kafalarının yan tarafında yer alır ve bu nedenle görüş açıları daha geniştir. Köpeklerin gözleriyse avcı türü hayvanların genelinde olduğu gibi kafalarının önünde yer alır ve bu nedenle görüş açıları daha dardır. Araştırmacılar, koyunların ve çoban köpeklerinin bu özelliklerinin de modele dâhil edilebileceğini belirtiyor. Ancak bu değişikliklerin faz diyagramında önemli nitel değişimlere yol açmayacağı düşünülüyor.



Farklı fazların hangi koşullar altında ortaya çıktığını gösteren faz diyagramı. Farklı faz bölgelerindeki örnek rota çizimlerinde sürünün kütle merkezinin konumu kırmızıyla, çoban köpeğinin kütle merkezinin konumu maviyle gösteriliyor.

V_a: Koyunların hızı
V_s: Köpeğin hızı
N: Sürüdeki koyun sayısı
l_a: Koyunların büyüklüğü
l_s: Köpeklerin etkileşim mesafesi

Koyun sürülerinin davranışlarını modellemeye çalışırken göz önünde bulundurulması gereken etkenlerden biri de koyunların farklı koşullar altında farklı davranışlar göstermesi. Örneğin bir koyun tek başına olduğunda genellikle köpekten kaçar. Sürülerdeki koyunlarsa genellikle daha bencil davranır: Sürünün dış kısmındaki koyunlar daha iç kısımlara gitmeye ve böylece daha dışta kalan koyunları bir kalkan olarak kullanmaya çalışır. Daha da önemlisi bu genel davranış tipinin tüm koyunlar için geçerli olmaması, koyunların çok farklı karakterlere sahip olabilmesi. Bazı koyunlar köpek gördüğünde kolaylıkla paniklerken bazı koyunlarsa hiç umursamayabiliyor ve hatta köpeğe karşı durabiliyor.

Georgia Teknoloji Enstitüsünden kimya mühendisi Tuhin Chakrabortty ve biyomoleküler mühendis Saad Bhamla, koyunların farklı karakterlerini de göz önünde bulunduran bir model geliştirdi. Araştırmacılar daha uysal koyunları "hafif" koyunlar, daha agresif koyunlar ise "ağır" koyunlar olarak adlandırıyor.

Charabortty ve Bhamla'nın simülasyonlarına göre sürünün davranışı, büyük oranda hafif koyunlardan mı yoksa ağır koyunlardan mı oluştuğuna bağlı olarak değişiyor. Simülasyonlardaki sürüler, çoban köpeğinin baskısına maruz bırakıldığında üç ayrı durum gözlemlenebiliyor. Birincisi, koyunlar düzensiz bir biçimde hareket etmeye başlıyor ve panikleyen koyunlar etrafa dağılıyor. İkincisi, koyunlar bir araya gelerek kümeleniyor. Üçüncüsü, koyunlar yüzlerini köpeğe doksan derece dönüp umursamadan otlamaya devam ediyor. Bu davranış biçimleri de yine bir faz diyagramıyla özetlenebiliyor.

Hayvan sürülerinin dinamiklerini modellemek için yapılan çalışmalarda biyolojik sistemlerin karmaşıklığının yerini fiziksel sistemlerin basitliği alıyor. Sanal hayvanların hareketlerinin basit birkaç fiziksel kuralla tanımlandığı bu modeller, karmaşık sistemler için başarılı sonuçlar da verebiliyor.

Son zamanlarda üzerine yoğunlaşılan konulardan biriyse koyun sürülerinin dinamiklerini modellemek. Bugüne kadar geliştirilen modeller hem doğada gözlemlenen süreçleri başarılı bir biçimde simüle edebiliyor hem de koyun sürülerinin farklı davranışlarının hangi koşullar altına ortaya çıktığının anlaşılmasına yardımcı oluyor. Gelecekte bir gün geliştirilen algoritmaların koyun sürülerini güden robotlar ya da insansız hava araçları gibi cihazların geliştirilmesine imkân vereceği umut ediliyor. Koyunlar gibi farklı kişiliklere sahip, hangi koşullar altında hangi tepkiyi vereceği kolayca tahmin edilemeyen canlılardan oluşan sürülerin basit birkaç fiziksel kuralla hareket eden teknolojik cihazlar tarafında kontrol edilmesinin gerçekten de mümkün olup olmayacağını zaman gösterecek. ■

Kaynaklar

Ball, Phillip, "Field work – the physics of sheep, from phase transitions to collective motion", Physics World, https://physicsworld.com/a/field-work-the-physics-of-sheep-from-phase-transitions-to-collective-motion/, 2024.
Ranganathan, A., ve ark., "Emergent Strategies for Shepherding a Flock", arXiv, https://arxiv.org/abs/2211.04352, 2024.
Czirók, A., ve ark., "Collective Motion of Self-Propelled Particles: Kinetic Phase Transition in One Dimension", *Physical Review Letters*, Cilt 82, s. 209, 1999.
Czirók, A., ve ark., "Spontaneously ordered motion of self-propelled particles", *Journal of Physics A: Math. Gen.*, Cilt 30, s. 1375, 1997.
Gómez-Nava, L., ve ark., "Intermittent colletive motion in sheep results from alternating role of leader and follower", *Nature Physics*, Cilt 18, s. 1494, 2022.
Bhamla, S. Ve Chakrabortty, T., "Controlling noisy herds", arXiv, https://arxiv.org/abs/2406.06912v1, 2025.