



# Kalabalıkların Dinamiği

Günlük hayatta bazen planlayarak bazen planlamadan kalabalığa dahil oluyoruz. Sokaklarda yaya olarak, trafikte sürücü ya da yolcu olarak. İşyerlerinde, okullarda, alışveriş merkezlerinde tanımadığımız birçok insanla sözsüz de olsa ne kadar çok iletişime geçiyoruz. Genelde huzurlu bir şekilde gerçekleşen bu kolektif iletişim, birden kaosa dönüşebiliyor. Hınca hınç dolu bir stadyumda bir konser ya da bir futbol maçı izlemiş, stadyum çıkışı sakın sakın ilerleyen insan selinin birden itişip kakışan bir insan yığınına dönüştüğüne şahit oluyoruz. Her yıl dünyanın birçok yerinde kontrolden çıkan kalabalıklar içinde yaralananlar ve ölenler oluyor. Bir yangın alarmı üzerine çıkışlara koşan insanlar birbirlerini ezip geçebiliyor. O durumlarda, içinde bulunulan mekânın mimarisi, çıkışları ve tahliye stratejileri ne kadar düşünülerek, planlanarak yapılmış olursa olsun facialar önlenemeyebiliyor. Bilim insanları uzun yıllardır kalabalıkların dinamiğini anlamak için çeşitli modeller geliştiriyor ve kalabalıkların panik durumlarında nasıl davranışlar sergileyeceğini önceden belirlemeye çalışıyor.

**B**ilim insanları genelde kalabalıkların dinamiğini çok parçacıklı fiziksel bir sisteme benzeterek anlamaya çalışıyor. İnsan kalabalıklarının davranışları gaz ve sıvı moleküllerinin davranışlarına uyarlanıyor. Bu kavramsal yaklaşımlar kullanılarak kalabalıkların bilgisayar simülasyonları, arka planda çok parçacıklı sistem dinamiğini işleten bilgisayar modelleri geliştiriliyor. Bu modellerin tercih edilmesinin en büyük sebebi bir sürü insanın bir araya getirilerek nasıl hareket ettiklerinin bilim insan-

larınca inceleneceği laboratuvar deneylerinin zor ve riskli olması. Riskli olsa da zaman zaman böyle deneyler yapılması gerekmiş. Örneğin uçak tasarımcılarının yaptığı tasarımlar acil durum tahliye testlerinden geçmek zorunda. Airbus 380 için yapılan teste 900 yolcudan 30'u -biri ağır olmak üzere- yaralanmış. Gerçek deneylerden mümkün mertebe kaçınıldığı için, geliştirilen modeller genellikle bina içlerine ve dışına yerleştirilen, trafik kontrolünde kullanılan video kameraların kayıtlarıyla karşılaştırılıyor.

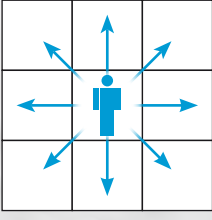




## Kalabalıklar nasıl modelleniyor?

Bu modeller her yerde ve her zaman işlemiyor. Tabii ki temel neden matematiksel modellerde insan psikolojisi faktörünün denklemlere dahil edilememesi. İnsan davranışları düzensiz ve tam olarak öngörülemmez. Aynı koşullardaki iki insan tamamen farklı davranabilir. Tek tek yayaların hareketleri veya bir topluluktaki her bir bireyin davranışı ayrı ayrı hesaplanıp toplandığında sonuçta kalabalığın topluca gösterdiği davranış elde edilemiyor. Diğer bir deyişle her bir parçacığın dinamiği birbirine eklenerek sistemin dinamiğine ulaşılamıyor. İnsan faktörü, yani kişisel kararlar ve psikoloji işin içine girdiği için bunun böyle olduğunu dü-

şünebilirsiniz. Ancak bu durum atmosfer, sıvılar, tektonik tabakalar hatta ekonomi gibi başka birçok sistem için de geçerli. Bu tür sistemlere lineer olmayan sistemler deniyor. Bu sistemler lineer olmayan matematik denklemleriyle formüleleştiriliyor. Garip bir şekilde bilim insanları bu denklemlere genellikle her bir etmeni (yani sistemin her parçasını) ayrı ayrı simüle ederek ulaşıyor. Pratik uygulamalar için daha elverişli olduğundan bu yöntem tercih ediliyor. Etmen-tabanlı modeller (agent-based models) adı verilen bu modellerle, özellikle yayaların davranışı başarılı bir şekilde bilgisayar simülasyonuna dökülebiliyor.



Hüresel otomat modellerde bir hücre içine yerleştirilmiş insan ve oklarla belirtilmiş yönde yer değiştirerek geçebileceği diğer hücreler.

## Sosyal Kuvvet Modeli

Etmen-tabanlı modellerden en bilineni Dirk Helbing'in sosyal kuvvet modeli. İnsanların yolda ilerlerken maruz kaldığı sosyal kuvvetleri dikkate alan bu model, aslında grup dinamiğinin kurucusu kabul edilen, toplumsal psikoloji alanındaki çalışmalarıyla bilinen psikolog Kurt Lewin'in 1950'lerde öne sürdüğü sosyal alanlar kuramına dayanıyor. Lewin'e göre insan davranışı kişiliğin ve çevrenin matematiksel bir fonksiyonu. İnsan çevreden gelen duyuşsal bir uyarana karşı geçmiş deneyimlerine ve o an içinde bulunduğu durumu nasıl algıladığına bağlı olarak kişisel hedeflerine uygun bir davranışsal tepki veriyor. Dirk Helbing çok karmaşık durumlarda bu tepkinin kestirilmesi zor olsa da, yolda ilerleyen yayalar için bu tepkinin o kadar karmaşık olmadığını ve tahmini (stokastik) davranış modelleri geliştirilebileceğini savunuyor.

Lewin'in insan davranışlarının sosyal alanlar tarafından yönlendirildiği fikrini yayalara uygulayan Helbing'in diferansiyel denklemi dört kısımdan oluşuyor. Birinci kısım her bir yayanın hedefine en rahat nasıl ulaşabileceği bilgisini taşıyor. İster atılan bir top olsun ister bir foton, tüm fizik sistemleri olası tüm yolların arasından en etkin olanı seçiyor. Fizik yasalarının doğasında bulunan "en az eylem" ilkesinin insanların da doğasında bulunduğundan hareketle, her bir yayanın kendisi için en kısa ve en etkin yolu seçmesi formülün ilk terimini oluşturuyor. İkinci terim her bir yayanın diğer yayalarla ve yoldaki engellerle arasında belli bir mesafe tutma çabasını yansıtır. Sosyal psikoloji, bu noktada fiziğin tersine işliyor. İnsanların yolda yürürken birbirinden sakınması parçacıklar arası çekim kuvvetine ve Newton yasalarına uymuyor. Her etkiye belli bir tepki de söz konusu değil. Yine de insanın yolda giderken arkadaşına rastlaması ya da o sırada yol kenarında gerçekleşen bir sanat gösterisine doğru yönelmesi gibi çekici sosyal kuvvetler de denkleme katılıyor. Denklem bu üçüncü kısmında, kişi yaklaştıkça çekici kuvvetin azalması da dikkate alınıyor. Son olarak bir yayanın arkasında gerçekleşen olaylardansa önünde gerçekleşen bir olaydan daha çok etkilenmesi hesaba katılıyor.

Sonuçta, sosyal kuvvet modeli aynı doğrultuda ilerleyen insanların bir süre sonra arka arkaya dizilmesi, zıt yönde ilerleyen iki kalabalık grubun kollar oluşturarak birbirlerinin yanından, birbirlerine sürütmeden geçmesi gibi durumları, kısacası kalabalıkların kendi kendini örgütlemesini, başarılı bir şekilde açıklıyor. Lineer olmayan sistemler, sistemi oluşturan parçalar birbirine girift bir şekilde bağlı olduğundan, böylesi örgütsel davranış biçimleri sergileyebilir.

Örgütsel davranışlar sürtünme etkilerini ortadan kaldırarak enerji tüketimini azalttığı, gecikmelere engel olduğu için normal durumlarda avantajlı olsa da bazı durumlarda tehlikeli olabiliyor. Kitle psikolojisi olarak da yorumlanabilen kendi kendini örgütlenme, özellikle izdiham söz konusu olduğunda irrasyonel bir davranış olarak ortaya çıkıyor ve kötü sonuçlar doğurabiliyor. Birçok insan böyle durumlarda önündeki kalabalığı izleme eğilimi gösteriyor, örneğin birçok çıkıştan sadece birine yöneliyor ve bu süreçte diğer çıkışları göz ardı ediyor. Etmen-tabanlı modeller ayrıca kalabalıkların daralan yollardan geçerken sağa sola yalpalanmasını da açıklıyor.



## Hüresel Otomat Modeller

Dar yollardaki insan akışından sürü davranışına kadar birçok gözlemi başarılı bir şekilde açıklayan bir başka model türü de taban-alanı (floor-field) modeller. Taban-alanı modeller, sosyal kuvvet modelinde olduğu gibi klasik fizikteki kuvvet tanımına olduğundan ziyade, kuantum alan kuramındaki kuvvet olgusuna daha yakın bir yaklaşım getiriyor. Bu modellerde yaya arkasında bir iz bırakıyor. Bazı bakterilerin,

organizmaların ve böceklerin önlerindeki bırakıldığı kimyasal izi takip etmesine benzeyen bu modelde de, arkadan gelen yayalar sanal ayak izini takip etme eğilimi gösteriyor. Aslında bu model, bilgisayar dilinde hücrel otomat (cellular automat) denilen modellere benziyor. Bu modellerde yayaların bulunduğu geniş alan ya boş ya da sadece bir yayanın yerleşebileceği 40 cm × 40 cm'lik hücrelere ayrılıyor. Yani alan satranç tahtası gibi karelere ayrılıyor. Her bir kareye (hücreye) potansiyel alan atanıyor. Her bir hücrenin potansiyeli farklı. Örneğin bir hücre çıkışa ne kadar uzaksa potansiyeli o kadar düşük. Eğer bir yayanın önündeki hücreden önceden bir sürü yaya geç-

reye geçiyor. Bunlar gibi geçiş kuralları dışında, her araştırmacı kendi hücrel otomat modeline kendi sınırlamalarını getirip modeli geliştirebiliyor. Örneğin Köln Üniversitesi'nden C. Burstedde, K. Kauck, A. Schadschneider ve J. Zittartz yayaları mutlu ve mutsuz olmak üzere iki gruba ayırıyor. Mutlu yayaların hedeflerine doğru daha kararlı ilerlediği, mutsuz yayaların ise daha rastgele hareket ettiği bir faktörü modellerine ekliyorlar. Hücrel otomat modeli araç trafiğine de 90'lı yılların başında K. Nagel ve M. Schreckenberg tarafından başarılı bir şekilde uygulanmış. Yine ilginç taban-alanı modellerinden biri A. Kirchner ve A. Schadschneider'e ait. Araştırmacılar modelleri için parçacık fiziğinden esinlenmiş. Nasıl atomaltı parçacıkların birbirleriyle etkileşimi bozon denilen parçacıklarla sağlanıyorsa, bu modelde de hücre üzerindeki insanlar hücre üzerindeki bozonlar aracılığıyla haberleşiyor. Yukarıda bahsettiğimiz potansiyelin yerini burada bozon alanı alıyor. İnsanlar her bir hücre üzerindeki bozon alanı yoğunluğunu dikkate alarak kendileri için en uygun hücreye geçiyor. Burada insanlar da fermiyonlar gibi düşünülüyor. Nasıl iki fermiyon aynı kuantum enerji seviyesinde bulunamıyorsa, iki insan da aynı hücreyi işgal edemiyor.

### Kalabalıklar Akışkanlar Mekaniğiyle Anlaşılabilir mi?

Yayaların hareketini ilk olarak akışkanlar mekaniği denklemleriyle açıklamaya çalışan Le Roy F. Henderson olmuş. Henderson 1971'de Nature dergisinde yayımlanan makalesinde akışkanın hızının basınç, sıcaklık, vizkozite (ağdalılık) ve yoğunluk ile ilişkisinin denklemleri olan Navier-Stokes denklemlerini yayaların akışına uygulamış. Bu yaklaşım kabul görmüş ve sonrasında trafik akışlarının modellenmesinde de sıkça kullanılmış. 1998 yılında Boris Kerner Almanya'daki otoyollara yerleştirilmiş video görüntülerini inceleyerek elde ettiği verilerin sonuçlarını Physical Review Letters' da yayımlamış. Kerner trafik akışını üç faza ayırıyor. Birinci faz trafik yoğunluğunun az olduğu, araçların manevra kabiliyetlerinin fazla olduğu, gaz molekülleri gibi serbestçe davranabildikleri evre. Trafik yoğunluğu artıp da araçlar birbirlerine daha yakın olduğunda, trafik de sıvıların akışına benzer bir şekilde akmaya başlıyor. Tahmin edeceğimiz gibi, trafik daha da yoğunlaştığında ortaya çıkan durum katı fazı andırıyor. Araçların topluca hareket ettiği bu fazda, araçlar birbirine daha bağımlı hale geliyor. Bilim insanları akışkanlar dinamiğini kullanarak faz geçişlerinin gerçekleştiği kritik yoğunlukları tespit edebiliyor.

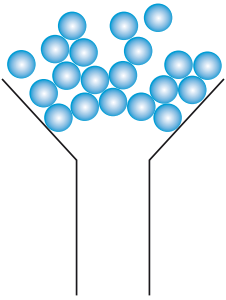
mişse her bir yayanın bıraktığı sanal iz o hücrenin potansiyelini artırdığı için o hücrenin potansiyeli yüksek oluyor. Tüm yayalar düşük potansiyelli hücrelerden yüksek potansiyelli hücrelere doğru hareket ediyor. Tabii işin içine olasılıklar giriyor. Herhangi bir hücreyi hedef belirleyen birden çok yaya varsa, o hücreye geçme olasılığı en yüksek olan yaya hücreye geçme hakkı kazanıyor. Hücre doluyorsa ikinci bir yayanın o hücreye geçme olasılığı sıfır. Belli bir boş hücreyi bir tek yaya hedef edindiyse hamle yapıp o hücre-





Yayaların ve araçların akışına uygulanan denklemlerden biri de akışın, yoğunluk ve yoğunluğun bir fonksiyonu olan ortalama hızın çarpımına eşit olarak verildiği eşitlik. Bu eşitlik trafiğe uygulandığında yüksek trafik yoğunluğunda akış sıfıra yaklaşıyor ve trafik tıkanıldığında sıfır değerini veriyor. Ancak yayalar için durum farklı. Akan insan kalabalıkları, insan yoğunluğunun az olduğu durumlarda gaz molekülleri gibi, daha fazla olduğu durumlarda Newton tipi -yani düzgün akan bir sıvının akışı gibi- davranıyor. Ancak kalabalıklar için hiçbir zaman akışın durduğu bir yoğunluk seviyesi söz konusu olmuyor. Yoğunluğun çok arttığı durumlarda panik yaşanıyor ve insan hareketleri düzensiz ve rastgele bir hal alıyor. Bu size bazı sıvı akışlarında görülen türbülansı anımsatabilir. Ama türbülansın mekaniği daha tam olarak anlaşılmadığı için kalabalıkların dinamiğine de uygulanamıyor. Örneğin yüksek Reynold sayısı olan bir sıvıda görülen eddy dalgaları insan kalabalıklarında gözlenmiyor. Bir sıvının içindeki eylemsizlik kuvvetlerinin sıvının ağırlığına neden olan viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanan Reynold sayısı büyükse, o sıvı hız değişimine ve basınca daha çok direnç gösteriyor ve ani hız ve basınç değişimleri sıvıda türbülans oluşumuna neden olabiliyor. Bu durumda, düzenli akan sıvı birden düzensiz akmaya başlıyor. İnsan kalabalıklarında ve trafikte de benzer olgular görülse de türbülanslı sıvı mekaniğiyle örtüşmüyor.

İnsan kalabalıkları normal durumlarda akışkanlar gibi davranırken aşırı yoğunlukta kum veya tuz gibi tanecikli yapılar gibi akıyor. Kritik yoğunlukta yaşananlar türbülans akışından çok, bir heyelan sırasında meydana gelen çığa benziyor. Bir yığın kumun dar bir bölgeden geçmeden hemen önce oluşturduğu kavis gibi, acil çıkış kapılarında yoğunlaşan insanlar da tam çıkış noktasında kavis oluşturuyor. Yine de insan akışının nasıl tıkanıklığa dönüştüğünün mekaniği tam olarak anlaşılmış değil.



Yüksek yoğunluktaki insan kalabalıklarının da tanecikli yapılar gibi dar bir boğazdan geçerken kavis oluşturdukları gözleniyor.



### Kalabalıkların Türbülansı: Panik

İnsan kalabalığının bir noktada nasıl tıkanıdığı konusunda en bilinen çalışmalardan biri Dresten Teknoloji Üniversitesi'nden Dirk Helbing ve Anders Johansson'a ait. Helbing ve Andersson şeytan taşlamaya gitmek için aynı anda yüzbinlerce hacının geçtiği Cemalat köprüsünde 2006 yılında yaşanan faciannın video kayıtlarının analizini yapıyor. Köprüye doğru ilerleyen her hacının hızını ve konumunu belirleyen bir bilgisayar algoritması kullanıyorlar. Araştırmacılar yerel insan yoğunluğu metrekare başına 6 insana çıktığında akış hızının 3 kat azaldığını tespit ediyor. Bu sayı 7'ye çıktığında ise, o ana kadar giderek azalan bir hızla da olsa akan kalabalık birden yeni bir evreye giriyor. Araştırmacılar bu evreyi "dur-git" fazı olarak adlandırıyor. Dakikalarca devam eden bu sürede insanlara kuş bakışı bakıldığında ortaklaşa durup kalan insanlar ilerleyen bir şok dalgası olarak görülebiliyor. "Dur-git" fazının başlamasından tam 30 dakika sonra tehlikeli olan üçüncü ve son evreye giriliyor. İnsanlar artık her yöne savrulan, istemsiz hareket eden düzensiz bir kalabalığa dönüşüyor. Helbing'in kalabalık türbülansı olarak adlandırdığı bu faz sırasında, bir insan yere düştü mü yere düşen i insan sayısı artıyor ve daha çok alanı kaplıyor. Araştırmacıların üç evreye ayırdığı "kalabalığın kritik noktalarını" belirleyen şey insan yoğunluğu değil. Asıl belirleyici faktör kalabalığın basıncı. Hesaplar kalabalıkların türbülansı durumunda insan vücudu üstündeki basıncın dayanılmaz

bir değere ulaştığını gösteriyor. Futbol stadyumlarında yaşanan facialardan sonra çelik parmaklıkların büküldüğü gözleniyor. Yerden 70 cm yüksekteki ve 5 cm çapındaki çeliği bükmek için gereken kuvvetin yaklaşık 460 kiloluk bir ağırlığın uyguladığı kuvvete eşit olduğu düşünülünce, insanların panik durumlarındaki davranışlarının neden irrasyonel olarak nitelendirildiğini anlamak zor değil.

Helbing ve Andersson'un çalışması neticesinde hazırlanan görüntü tanımlama yazılımı Suudi Arabistan hükümeti tarafından Hac güzergâhındaki belli noktalara yerleştirilmiş. Kalabalığın basıncı belli noktaya ulaştığında görevliler kalabalığı yönlendirerek izdihamı engellemeye çalışıyor. Benzer bir proje ile Almanyada kalabalık mekânlara, örneğin futbol stadyumlarına yerleştirilen video kameraların görüntülerinin bilgisayara aktarılıp değerlendirilmesi ve mekânda görevli kişilerin bu bilgilere her an ulaşmasının sağlanarak kalabalığı müsait çıkışlara yönlendirmesi hedefleniyor. Helbing ve Anderson başka iki meslektaşıyla birlikte, hepsi birer trafik mühendisi sayılabilecek karıncaların davranışlarını incelemiş. Karınca kolonisinin yuvasına yakın bir yere şeker bırakılmış ve karıncalara gıda kaynakları ile yuvaları arasında iki yol seçeneği sunulmuş. Kısa yolu hemen keşfeden birkaç karıncayı arkadaşları takip etmiş. Ancak bu yoldaki yoğunluk kritik değere ulaşınca bir karıncanın o yolu tıkayıp arkadan gelenleri ikinci yola yönlendirdiği gözlenmiş.

Tabii insan kalabalıklarının dinamiğini anlamak yaşanabilecek izdihamı ve paniği önlemek anlamına gelmiyor. Paniğin psikolojik boyutu da var. Kalabalıkların paniği üzerine çalışan sosyal psikologlar genelde paniği doğal ya da teknolojik afetler sırasında yaşananlarla ilişkilendirmiş. Bu konuda çalışan sosyologlardan Richard LaPierre paniği işlevini yerini getiremeyen kaçış davranışı olarak tanımlamış. Yukarıda değindiğimiz, kaçış sırasında alternatif çıkışların göz ardı edilmesi durumunun, çoğunluğun bilecek ve akıllıca davranacağına olan inancımızdan kaynaklandığını düşünebilirsiniz. Ancak bilim insanları, örneğin ateşten kaçmaya çalışan farelerde de görülen bu davranışı genellikle korku sırasındaki dikkat azalmasına bağlıyor. Araştırmacılar acil durumlarda bir mekânın tahliye edilme süresiyle çıkış kapılarının genişliğinin son derece ilişkili olduğunu ortaya koyuyor. Örneğin Guanquan Chu ve arkadaşlarının hazırladığı bilgisayar simülasyonu sonuçlarına göre özellikle 2 metrelik bir kapıdan yapılan tahliye 1 metrelik bir kapıdan yapılanaya göre çok daha hızlı gerçekleşiyor. Daha geniş kapılardan yapılan tahliyeler ile karşılaştırıldığında bu fark daha az. Zaten belli bir genişlikten sonra kapı genişliğine bağımlılık ortadan kalkıyor. Dar kapılardan toplu geçişleri konu alan simülasyonların bir kısmında insanların geniş yollardaki gibi arka arkaya dizilerek şeritler oluşturduğu gözleni-

yor. Ancak Armin Seyfried gibi bazı araştırmacılar bu sıralanmanın yan yana düzgün şeritler gibi değil de bir fermuarın dişleri gibi, iç içe geçmiş sıralar halinde olduğunu belirtiyor. Ayrıca dar kapılardan geçerken insanların birbirlerine yardımsever davranmalarının çıkışı hızlandırdığı, ancak biraz daha geniş kapılarda aksine çıkışın yavaşladığı tespit ediliyor. Tokyo Üniversitesi'nden Daichi Yanagisawa'nın araştırmasına göre ise çok dar olmayan çıkış kapılarının yakınlarına yerleştirilen bir engel kapının önündeki yığılmayı önleyerek tahliyeyi hızlandırabiliyor.

Panik durumlarında kısa vadeli kişisel çıkarların ön plana çıktığını ve insanların birbirini ezip geçtiği ve bencilce davrandığını savunanlar olsa da bunun tersi gözlemler de var. Sosyolog Norris Johnson'un bir gece kulübünde çıkan bir yangında ve bir rock müzik konseri sırasında yaşanan izdihamı incelediği çalışmasının sonuçları beklenilenin aksini destekliyor. Her iki olayda da insanların genellikle işbirliği içinde davrandığı gözleniyor. Bu çalışma, birbirine yardım eden insan oranının, kaçmak için yarışan insan oranından çok daha yüksek olduğunu ortaya koyuyor. Afet araştırmacıları kaçma ihtimalinin çok çok azaldığı ve ümidin tükendiği durumlarda, örneğin batmış bir denizaltıda ya da çökmüş bir kömür madeninde ise insanların panik yaşamadığını ve daha sakin davrandığını belirtiyor.



## Domino ve Kelebek Etkileri

Gerçekleşen bir olayın kendisine benzer bir olayı tetiklemesi ve bu olayın da bir başka benzer olayı tetiklemesi şeklinde devam eden olaylar zinciri, ard arda dizilmiş domino taşlarına benzetilerek domino etkisi olarak adlandırılıyor. Fiziksel bir sistemde bu etkinin görülebilmesi için etmenlerin birbirine yakın konumlanması ve olaylar zincirini başlatacak bir tetikleyici gerekiyor. Domino taşlarından biri hafifçe itilince kütle merkezi kayıyor ve o taş kütleçekiminin etkisi altında hareket geçerek açılacak momentum kazanıyor. Kazandığı momentumu ve enerjiyi çarptığı diğer dominoya aktararak onun da devrilmesine neden oluyor. Her bir dominonun devrilmesi için gereken enerji aktarılan enerjiden daha düşük olduğu için -arada ufak sürtünme etkileri enerjinin bir kısmını kullanırsa da- taşlar arka arkaya devriliyor.

Yazımızın ilk kısımlarında bahsettiğimiz kalabalıkların dinamiğini anlamak için kullanılan modeller, domino etkisini de içerecek şekilde geliştirilebiliyor. Örneğin birçok gözlemi başarılı bir şekilde açıklayan taban-alanı modelleri, insanlar arası mesafenin azaldığı, yoğunluğun arttığı durumlarda insanların birbirine değmesi, itmesi gibi fiziksel kuvvetleri göz önüne almıyor. Kirchner'in taban-alanı modeline fiziksel kuvvetleri ekleyen M. Helein ve Tony White, ilerleyen bir kalabalığın arkasında bulunan bir kişinin uyguladığı kuvvetin insandan insana aktararak topluluğun ön kısımlarında nasıl hissedildiğini açıklıyor. Yine bu modelde meydana gelebilecek yaralanmalar da hesaba katılmış oluyor. İnsanların birbirine yaslanmak zorunda olduğu durumlarda kuvvetler vektörel toplanarak öndeki taraftaki kişinin maruz kaldığı kuvvet hesaplanabiliyor.

İnsan kalabalıkları gibi lineer olmayan sistemlerin bir diğer özelliği de sistemdeki bir etmenin tüm sistemin dinamiğini etkilemesi. Lineer olmayan sistemler başlangıç durumlarına hassas bir şekilde bağlıdır, o nedenle de başlangıçtaki küçük bir değişiklik sistemin evrimini tamamen değiştirebilir. Sistemdeki bir etmenin davranışındaki küçük bir değişim, etkisini çoğaltarak sistemi önceden tahmin edilemeyen yeni doğrultulara yönlendirebiliyor. Kelebek etkisi olarak adlandırılan bu etkinin en bilinen örneği, bir yerde bir kelebeğin kanat çırpması sonucunda oluşan hava hareketinin bambaşka bir yerde fırtınaya sebep olması. Lineer olmayan sistemlere örnek gösterilen atmosferde de, ilgili olmayan değişkenler birbirinden güçlü bir şekilde etkilenebiliyor.



Dur-git evresine girmiş insan kalabalığında, bir kişinin ani bir hareketi, örneğin yere düşmesi ya da hızını birden çok düşürmesi oluşan şok dalgasının değişmesine, "kalabalık türbülansı" evresine girişin hızlanmasına neden olabiliyor. Benzer durum trafikte de var. Trafiğin tıkanma nedeninin çoğunlukla araç yoğunluğu değil, aniden meydana gelen bölgesel hız değişimleri olduğu söyleniyor. Exeter Üniversitesi'nden araştırmacılar, özellikle trafiğin sıkışık olduğu durumlarda bir sürücünün geç tepki vererek frene olması gerekenden geç basması sonucunda oluşan ve geriye doğru ilerleyen dalgaları inceliyor. Bir araçtaki ani hız azalmasının çoğalan etkisinin trafikte kilometrelerce ötesini nasıl etkilediğini çoğumuz fark etmişizdir.

Yolda yürürken uzun vadeli planlar yaparak her adımımızı hesaplayarak atmasak da içinde bulunduğumuz kalabalık kendiliğinden örgütleniyor. Ancak kalabalığa daha çok kişi dahil oldukça her birimiz birbirimize daha bağımlı hale geliyoruz. Parçası olduğumuz bu sistemler öyle ilginç ki her insanın hayatında dönüm noktaları olduğu gibi insan kalabalıkları için de belli dönüm noktaları var. Bilim insanları kalabalıkların dinamiğini anlamaya, bu dönüm noktalarını tahmin etmeye çalışıyor.

### Kaynaklar

Halbing, D., Johansson, A., "The dynamics of crowd disasters: An empirical study", Physical Review E, Cilt 75, Şubat 2007.  
Burstedde, C. ve diğ., "Simulation of pedestrian Dynamics using a 2-dimensional cellular automaton", Physica A, Cilt 295, s. 507-525, Haziran 2001.  
Helein, C. M., White, T., "Macroscopic effects of microscopic forces between agents in crowd models", Physica A, Cilt 373, s. 694-712, Ağustos 2006.

Kirchner, A. ve Schadschneider, A., "Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian Dynamics", Physica A, Cilt 373, 260-276, 2002  
Quarantelli, E. L., The Sociology of Panic, Smelser and Baltes International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences, 2001