

## Rozdział 1

# Jak sieci zawładnęły światem

Czy tego chcemy, czy nie, sieci często kojarzą nam się negatywnie. Wpadają w nie niewinne złote rybki, pająk chwyta swoje ofiary. Filmy, takie jak *The Net (System)* z Sandrą Bullock, wyrażają nasze obawy przed wszechogarniającą zależnością od sieci komputerowych. Ostatnie wielkie awarie energetyczne czy lawiny bankructw banków wywołane przez sieć wzajemnych niespłaconych pożyczek utwierdzają nas w przekonaniu, że sieci niosą ze sobą zagrożenia, wobec których pojedynczy człowiek jest bezsilny.

Nie powinniśmy jednak zapominać, że sieci niosą też ze sobą wiele dobrego. Już kilkadziesiąt tysięcy lat temu, dzięki istnieniu początkowo sporadycznych, a później trwałych kontaktów między plemionami rozrzuconymi po całym świecie, dochodziło do propagowania idei, transferu wiedzy (na przykład o wykorzystaniu ognia) i technologii, a nawet do wymiany cennego przez swą odmienność materiału genetycznego.

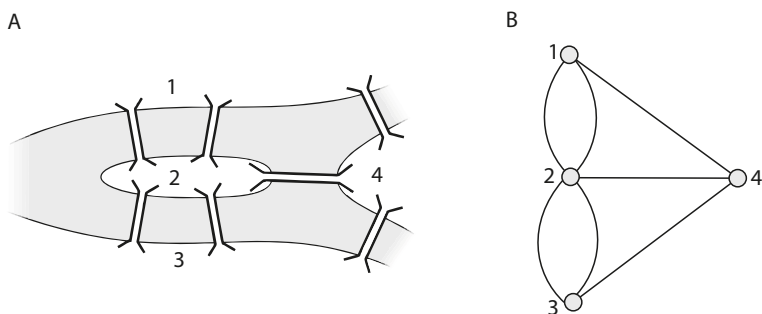
Żadne zwierzę nie wykształciło tak złożonych sieci społecznych jak człowiek. To dzięki nim możliwa była specjalizacja funkcji pełnionych w grupie, pozwalająca stworzyć zgrany i wszechstronny zespół zdolny do skutecznej walki o przetrwanie. Doskonalenie się w polowaniu było możliwe dzięki świadomości, że jest ktoś, kto zajmuje się wychowaniem dzieci, i ktoś, kto zna kogoś świetnie umiającego leczyć rany. W obecnych czasach kontakty znajomych naszych znajomych umożliwiają nam znalezienie atrakcyjnej pracy lub chociażby zdobycie wymarzonego autografu idola.

Również Internet nie jest jedynie źródłem wszelkiego zła. Umożliwia przecież zbliżenie ludzi na niespotykaną dotąd skalę. Łagodzi wyobcowanie i samotność powodowane przez technokratyzację współczesnego świata. Anonimowa znajomość przez sieć to często jedyny kontakt, na jaki potrafią odważyć się dziś tysiące wyalienowanych pracoholików.

Sieci otaczają nas, ale istnieją także w nas samych. Dzięki sieciom oddziaływań między genami nasze komórki potrafią różnicować się i pełnić odmienne

funkcje, tworząc kości, mięśnie czy układ krwionośny. Sam krwioobieg również jest siecią, która na wzór sieci rzecznych, służących do transportu surowców, zaopatrzuje w cenne składniki odżywcze cały organizm. Nie możemy również zapomnieć o największej w naszym organizmie, złożonej z około 100 miliardów elementów sieci neuronowej, czyli mózgu.

Jak widzimy, sieci są wszędzie, choć nie zawsze zdajemy sobie z tego sprawę. Historycznie pierwszy raz stały się obiektem badań w 1736 roku, gdy szwajcarski matematyk i fizyk Leonhard Euler rozwiązał za ich pomocą zagadnienie mostów królewieckich. Popularny wówczas problem, którym zainteresował się Euler, sformułowany był następująco (patrz rysunek 1.1): czy można przejść kolejno przez wszystkie siedem mostów w Królewcu tak, żeby każdy przekroczyć tylko raz i wrócić do miejsca, z którego się wyruszyło? Euler wykazał, że jest to niemożliwe, a jego praca na ten temat była pierwszą publikacją z teorii grafów, rodzącej się właśnie gałęzi matematyki.



**Rysunek 1.1.** Zagadnienie mostów królewieckich. A. Czy można przejść kolejno przez wszystkie siedem mostów w Królewcu tak, żeby każdy przekroczyć tylko raz i wrócić do miejsca, z którego się wyruszyło? B. W 1736 r. Euler jako pierwszy pokazał, że jest to niemożliwe. Problem mostów królewieckich zobrazował za pomocą prostego grafu, a następnie udowodnił ogólne twierdzenie, że jeśli stopień każdego wierzchołka dowolnego grafu spójnego jest liczbą parzystą, to w grafie musi być przynajmniej jedna zamknięta ścieżka zawierająca każdą krawędź tego grafu

Dwieście lat później sieciami zainteresowali się socjologowie. Początki socjologicznej analizy sieci społecznych sięgają lat trzydziestych ubiegłego wieku i prac Jacoba Moreno. Starał się on zrozumieć, jak relacje interpersonalne wpływają na psychologiczne funkcjonowanie jednostki. W tym celu wprowadził pojęcie socjogramu, będącego graficzną prezentacją stosunków między ludźmi, więzi społecznych, relacji sympatii-antypatii czy uznania w grupie społecznej, oraz związaną z tym pojęciem metodę. Należy podkreślić, że analiza sieci społecznych rozwijała się początkowo zupełnie niezależnie od prac matematyków. Dopiero z biegiem lat metody wypracowane w naukach ścisłych zaczęły przenikać do środowiska socjologów, tworząc nowoczesne i efektywne narzędzie pozwalające badać skomplikowane struktury relacji między różnego rodzaju podmiotami społecznymi.

Wieloelementowość i wielopoziomowość tych relacji uzasadnia traktowanie sieci jako tak zwanych układów złożonych. Pojęcie złożoności ugruntowało się w drugiej połowie ubiegłego wieku, gdy zaczęto badać systemy, których właściwości nie można było wywieść z właściwości elementów składowych. Trudność opisu takich układów metodami klasycznej fizyki i matematyki sprawiła, że układ złożony jawił się jako niemal żywy organizm rządzący się tajemniczymi i niezrozumiałymi prawami. Z licznych przykładów takich układów i zachodzących w nich procesów warto wymienić między innymi kolonie mrówek, klimat, mózg, korki uliczne, lawiny, jak również sieci.

Złożoność sieci nie ulega wątpliwości. Sieci, zbudowane z setek, tysięcy, a nawet milionów elementów pełniących zazwyczaj różnorakie funkcje, powiązanych w skomplikowany, a jednak precyzyjny sposób, rosną, dopasowują się do zmian otoczenia, optymalizują swoje działanie, tworząc przydatne i usuwając zbędne powiązania, prawie jak żywe istoty.

Sieci złożone bardzo długo broniły się przed ujarzmieniem za pomocą teorii sprowadzających ich funkcjonowanie do paru prostych wzorów i reguł. Właściwie nawet dzisiaj wielokrotnie jedynym narzędziem do ich analizy pozostają symulacje komputerowe. Tym większe znaczenie w rozwoju nauki o sieciach należy przypisać pracom Paula Erdősa i Alfreda Rényiego z początków lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Tych dwóch węgierskich matematyków, przyjąwszy, że sieci powstają w sposób losowy, wprowadziło do ich analizy rachunek prawdopodobieństwa. Zamiast badać jeden przypadek, utworzyli cały zbiór sieci (zespół statystyczny, ansambl). Podejście to pozwoliło wprowadzić do opisu sieci nieunikniony przecież w naturze element przypadkowości i jednocześnie przenieść analizę na wyższy poziom abstrakcji. Najważniejszym osiągnięciem probabilistycznej teorii Erdősa i Rényiego było odkrycie w sieciach perkolacyjnego przejścia fazowego.

Aby zrozumieć, czym owo przejście jest, wyobraźmy sobie grupę nieznaną sobie osób, na przykład nowo przyjętych uczniów pierwszej klasy szkoły podstawowej. Z czasem w klasie zawiązują się nowe znajomości, powodując powstanie małych sieci przyjaźni. Dowcip, opowiedziany przez członka jednej z takich sieci, nie upowszechni się w całej klasie z powodu braku kontaktów między różnymi podgrupami. Pozna go jedynie dwójka czy trójka przyjaciół. Okazuje się, że w pewnym momencie nawiązanie jeszcze zaledwie kilku przyjaźni spowoduje rozprzestrzenienie się dowcipu na całą klasę. Mówiąc językiem bardziej formalnym, istnieje pewna krytyczna gęstość powiązań w klasie, taka że nawet drobna jej zmiana umożliwi w sieci niemożliwy dotychczas nieograniczony transfer informacji.

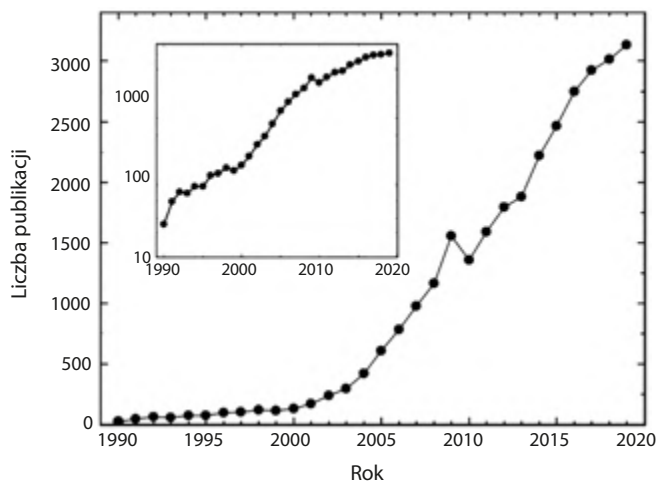
Probabilistyczna metoda analizy zaproponowana przez Erdősa i Rényiego utrwalała drogę do badań nad propagacją informacji w sieci. Pozwoliła między innymi zrozumieć mechanizmy rozprzestrzeniania się infekcji lub plotki oraz wybuchu epidemii czy paniki.

Niewątpliwie piękna matematycznie teoria dwóch wybitnych Węgrów królowała w dziedzinie sieci złożonych przez ponad trzy dekady. Ironią losu do jej detronizacji przyczyniła się inna sieć – Internet. Pod koniec ubiegłego wieku gwałtowny wzrost

mocy obliczeniowej komputerów umożliwił gromadzenie, wymianę i analizowanie na niespotykaną dotąd skalę danych na temat różnych sieci rzeczywistych. Należy przy tym wspomnieć, że sieć Erdősa i Rényiego wyróżniała się tym, że każdy jej element miał podobną liczbę połączeń z innymi elementami. Było parę elementów o mniejszej, a parę o większej liczbie połączeń, ale średnia była dobrze określona.

Pierwszy zwrócił uwagę na nienaturalność tej cechy w sieciach rzeczywistych, zarówno stworzonych przez naturę, jak i zbudowanych przez człowieka, inny węgierski fizyk Albert-László Barabási. Dostrzegł on mianowicie, że chociaż w otaczających nas sieciach ogromna większość elementów ma niewiele połączeń, to istnieją w nich również niezwykle usieciowione węzły, tzw. huby. Przeciętny mieszkaniec Polski w ciągu miesiąca spotyka się na przyjęciach zaledwie z kilkoma innymi osobami. Bywają jednak tak zwani salonowi bywalcy, dla których dzień bez balu, imprezy czy uroczystości to dzień stracony. Ich miesięczne salonowe kontakty można liczyć w setkach, a nawet w tysiącach. Choć jest ich jedynie garstka, to pełnią oni istotną funkcję w społeczeństwie, wyznaczając trendy, rozpowszechniając plotki czy choćby zapoznając ze sobą dwoje obcych ludzi. Mówienie o średniej liczbie połączeń elementu w takiej sieci społecznej nie dostarczy nam informacji o jej strukturze.

Podobną cechę mają również sieci komputerowe, genetyczne, neuronowe i wiele, wiele innych, o których będziemy mówić w dalszych rozdziałach. Obserwacja dokonana przez Barabásiego, niczym małe ziarenko rozpoczynające lawinę, spowodowała gwałtowną eksplozję prac naukowych poświęconych sieciom. Jeszcze pod koniec ubiegłego wieku każdego roku powstawało kilkadziesiąt prac poświęconych sieciom złożonym. Obecnie ta liczba przekracza trzy tysiące i wciąż rośnie (patrz rysunek 1.2).



**Rysunek 1.2.** Liczba publikacji zawierających w tytule lub w streszczeniu frazę *complex network* (sieć złożona) w danym roku (na podstawie bazy Science Citation Index). Pod koniec ubiegłego wieku nastąpił wyraźny wzrost publikacji poświęconych sieciom złożonym. Mniejszy wykres przedstawia tę samą zależność w skali logarytmicznej