

Emmy Noether

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

Fiziği Derinden Etkileyen Matematikçi

Yirminci yüzyılın en büyük matematikçilerinden biri olan Emmy Noether, kadınların akademik hayatta kendine bir yer edinmesinin hatta eğitim almasının bile çok zor olduğu bir dönemde yaşamıştı. Ancak kısa ömründe sadece matematiğe önemli katkılar yapmakla kalmadı, fiziğin gelişimine de yön verdi.



Hayatı ve Yaşadığı Dönem

Amalie Emmy Noether, 1882 yılında Almanya'nın Erlangen şehrinde doğdu. Ailesindeki pek çok kişi matematikte üstün yetenekliydi. Babası Max, Erlangen Üniversitesinde profesörlük yapan, cebirsel geometrinin gelişimine önemli katkılar yapmış başarılı bir matematikçiydi. Küçük kardeşi Fritz de ilerleyen yıllarda uygulamalı matematikte kariyer yapacaktı.

1800'lü yılların büyük bir kısmında Avrupa ve Amerika'daki üniversiteler kız öğrenci kabul etmiyorlardı. Almanya'da da kız çocuklarının eğitimi 14 yaşında sona eriyordu. Ancak yüzyılın sonlarına doğru durum yavaş yavaş değişmeye başlamıştı.



Emmy Noether (1882-1935)

Erlangen Üniversitesinin akademik senatosu 1898 yılında yaptığı bir açıklamada kız öğrencilerin üniversiteye kabul edilmesinin tüm akademik düzeni yerle bir edeceğini söylemişti. Ancak Emmy 1900 yılında, kayıtlı öğrenci olarak değilse de üniversitede dersleri takip etme iznini koparmıştı. Sadece Erlangen'deki derslerle yetinmedi. 1903 yılında o sıralar tüm dünyanın en önemli matematik merkezlerinden biri olan Göttingen'e gidip Karl Schwarzschild, Felix Klein, Hermann Minkowski ve David Hilbert gibi önemli matematikçilerin derslerine de katıldı. 1904 yılında Erlangen Üniversitesinin akademik senatosunun karar değiştirip kızların da erkeklerle aynı koşullar altında üniversiteye kayıt yaptır-



Karl Schwarzschild (1873-1916)

Birinci Dünya Savaşı sırasında ölmeden birkaç ay önce genel görelilik kuramındaki alan denklemlerinin bir çözümünü buldu.



David Hilbert (1862-1943)

Bilime Katkıları

Noether'in Erlangen Üniversitesinde Paul Gordan danışmanlığında yazdığı doktora tezinin başlığı "Dördüncü Dereceden Üç Terimli Formlar İçin Tüm Değişmez Sistemleri" idi. Dördüncü dereceden üç terimli 331 kovaryant formu hesaplayıp listelemişti. Doktoradan sonra somut hesap işlerini bırakıp soyut çalışmalara yöneldi. Bugün 20. yüzyılın en büyük matematikçilerinden biri olarak anılmasının nedeni, özellikle 1920'lerden sonra, soyut cebir üzerine yaptığı çalışmalarıdır. Hermann Weyl, Noether'in cebirde çığır açıcı bir düşünce tarzı geliştirdiğini söyler. Günümüzde matematikte Noether'in adı ile anılan pek çok kavram vardır.

Modern fiziğin gelişiminde 20. yüzyıl matematiğinin ve özellikle de soyut matematiğin rolü büyüktür. Ancak Noether sadece ispatladığı matematik teoremleriyle dolaylı olarak değil doğrudan da fiziğe katkı yaptı. 1918 yılında yayımladığı, fizikteki korunum yasalarıyla simetriler arasındaki matematiksel bağlantıları gösteren teoremlerin yer aldığı bir makalesi teorik fiziğin gelişiminde son derece önemli rol oynadı.

Noether'in yaptığı bilimsel çalışmaların tamamına bakıldığında simetri ve korunum yasalarıyla ilgili çalışmalarının diğerlerinden çok ayrı bir yerde durduğu görü-

masına izin vermeye başlamasıyla Erlangen'e geri döndü ve doktora başladı. 1907 yılında mezun oldu.

Emmy Noether, doktorasını bitirdikten sonra da Erlangen Üniversitesinde çalışmaya devam etti. Kendi başına araştırma yapıyor, doktora öğrencilerine danışmanlık ediyor, bazen babasının yerine ders veriyor ancak tüm bu çalışmaları için bir ücret almıyordu. 1915 yılında Hilbert'in daveti üzerine Erlangen'den ayrılıp Göttingen'e geçtiyse de durum değişmedi. Üniversite sadece erkeklerin ders vermesine izin veriyordu. Bir süre resmiyette Hilbert tarafından açılan dersleri anlattı. Kendi adıyla ders vermeye başlaması ancak 1919'dan

sonra mümkün oldu. Çalışmaları için az da olsa bir ücret almaya başlaması içinse 1923'e kadar bekleyecekti.

1933 yılında Almanya'da Nazilerin iktidara gelmesiyle Yahudiler akademik görevlerden uzaklaştırılmaya başlandı. Noether de işini kaybedenler arasındaydı ve Almanya'dan ayrılmaya karar verdi. Biri ABD'deki Bryn Mawr Koleji, diğeri İngiltere'deki Somerville Kolejinden olmak üzere iki iş teklifi aldı. Tercihini ABD'den yana yaptı. Bir süre sonra Princeton Üniversitesine bağlı İleri Araştırmalar Enstitüsünde de dersler vermeye başladı. 1935 yılında geçirdiği bir ameliyattan sonra ortaya çıkan komplikasyonlar sonucunda öldüğünde henüz 53 yaşındaydı.

lür. Noether, bu çalışmanın ne öncesinde ne de sonrasında kuramsal fizikle doğrudan ilgili bir konuya yoğunlaşmamıştı. Tarihsel süreç incelendiğinde Noether'in fizikteki korunum yasaları üzerine çalışmaya Hilbert'in isteği üzerine başladığı görülür.

Albert Einstein 1905 yılında özel görelilik kuramını yayımlamış ve daha sonra kütle çekimini de içine alacak biçimde kuramı genelleştirmek için çalışmaya başlamıştı. Genel kuramı geliştirmek için Einstein ile yarışanlardan biri de Hilbert'ti. Einstein, 1915 yılının haziran ve temmuz aylarında, Noether'in gelişinden kısa bir süre sonra, Göttingen'de bir dizi seminer verdi. Henüz genel görelilik

kuramını tamamlamamıştı ancak sona yaklaştığını düşünüyordu. Seminerlerin sonunda Hilbert ve Klein gibi usta matematikçileri doğru yolda olduğuna ikna etmeyi başarmıştı. Aynı yılın kasım ayında önce Einstein sonra Hilbert bugün genel görelilik kuramı olarak adlandırılan kütleçekim kuramının alan denklemlerini içeren birer makaleyi tamamlayıp yayıma gönderdiler. Einstein ve Hilbert aynı alan denklemlerini birbirlerinden bağımsız olarak farklı yollardan türetmişlerdi.

Genel görelilik kuramına son hâli verilmiş olsa da kuramla ilgili henüz tam olarak anlaşılma-yan pek çok şey vardı. En önemlilerinden biri de enerjinin korunumuyla ilgiliydi.

Genel görelilik kuramında enerjinin korunumunu ifade etmek için bir eşitlik türetme çabaları $0=0$ gibi tolojik bir ifadeyle sonuçlanıyordu. Daha önceleri geliştirilmiş hiçbir kuramda böyle bir durumla karşılaşıl-mamıştı. Hilbert ve Klein için içinden çıkamamış ve sorunun üstesinden gelmek için Noether'in yardımını istemişlerdi.

Noether 1915'in sonlarında Ernst Fischer'e yazdığı bir mektupta Hilbert'in gelecek hafta Einstein'ın çalışmaları hakkındaki fikirleriyle ilgili seminer vermeyi planlandığını, hazırlık yapmalarının iyi olacağını belirtmişti. Dolayısıyla daha o zamanlardan fiziksel kuramlarla ilgilenmeye başladığı söylenebilir.

Genel görelilik bir kütleçekim kuramıdır. Noether, fizikteki korunum yasaları üzerine çalışmaya genel görelilik kuramında enerjinin korunumu ile ilgili bir soruyu çözmek için başlamıştı.

Noether'in genel görelilik kuramındaki enerji korunumu üzerine yaptığı çalışmalar, karşılaşılan durumun, genel görelilik gibi keyfi diferansiyel koordinat dönüşümlerinin fiziksel yasaları ifade eden denklemleri değiştirmedeği tüm kuramların karakteristik bir özelliği olduğunu gösterdi. Bugün bu sonuç Noether'in ikinci teoremi olarak anılıyor. Noether, ikinci teoremin ispatına giden yolda simetri ile korunum yasalarını ilişkilendiren bir teorem daha ispatlamıştı. Bu teorem ilerleyen yıllarda kuramsal fiziğin gelişiminde önemli rol oynayacaktı.

Simetri ve Korunum Yasaları

Enerji ve momentumun korunumu gibi korunum yasaları kuramsal fiziğin önemli bir parçasıdır. Bir sistemin zaman içindeki davranışlarını tahmin etmek için sıklıkla korunum yasalarından yararlanır. Önce toplam korunum yasalarını ifade eden çeşitli denklemler yazılır daha sonra da zaman içinde meydana gelecek değişimleri tahmin etmek için bu denklemlerden yararlanır.

Noether'in teoremi enerjinin, momentumun ve elektrik yükünün korunumu gibi korunum yasalarını simetriyle ilişkilendirir. Her si-



metriye karşılık gelen bir korunum yasası ve her korunum yasasına karşılık gelen bir simetri olduğunu söyler. Kısacası bir sistemde hangi niceliklerin zaman içinde değişmediğini merak ediyorsanız sistemin hangi simetrilere sahip olduğuna bakmanız gerekir.

Noether'in teoremi günlük hayatta aşına olduğumuz "süresiz" simetriyle ilgili değil, "sürekli" simetriyle ilgilidir. Örneğin bir eşkenar üçgenin simetrisi süresizdir. Üçgeni kütleden merkezinden geçen, bulunduğu düzleme dik bir eksen etrafında 120, 240 ya da 360 derece döndürürseniz görünümünde bir değişiklik olmaz. Ancak dönme açısı 120'nin tam katı olmadığında görünümü değişir. Simetri dönüşümüyle ilgili parametre, bu durumda dönme açısı, ancak belirli değerler olabilir. Noether'in teoremi bu ve benzeri süresiz simetriyle ilgili değildir. Noether'in teoremlerindeki simetri parametreleri

herhangi bir değeri alabilirler, simetri dönüşümü süresiz değil sürekli-dir.

Noether'in teoreminin ilgili olduğu simetrisi ve korunum yasalarını birkaç örnekle açıklayalım.

Çok sayıda parçacıktan oluşan bir sistem olduğunu düşünelim. Parçacıkların zaman içindeki davranışlarını tahmin etmek istiyorsanız, yapacağınız ilk şey bir koordinat sistemi tanımlamak ve parçacıkların belirli bir zamanda hangi koordinatlarda bulunduğunu tespit etmek olacaktır. Ancak koordinat sisteminin nerede konumlandırılacağı tamamen keyfidir. Tanımladığınız koordinat sisteminin, belirli bir yönde ϵ birim ötelmeniz (isterseniz koordinat sisteminin sabit durup, tüm parçacıkların ters yönde ϵ birim ötelendiğini de düşünebilirsiniz) yapacağınız tahminlerde herhangi bir fiziksel değişikliğe sebep olmaz. Örneğin ilk koordinat sistemindeki hesaplarda bir

parçacık giderek hızlanıyorsa ikinci koordinat sistemindeki hesaplarda da aynı biçimde hızlanacaktır ya da ilk koordinat sistemindeki hesaplar da iki parçacığın bir süre sonra çarpışacağı tahmin ediliyorsa ikinci koordinat sistemindeki hesaplarda da parçacıklar aynı süre sonunda çarpışacaklardır. Değişen sadece koordinatlarıdır, fiziksel süreçler değil. Uygulanan ötelenme işlemi herhangi bir fiziksel değişime sebep olmadığı için sistemde ötelenme simetrisi olduğu söylenir. Üstelik simetri ile ilgili parametre, ϵ , herhangi bir değeri alabilir. Noether'in teoremi, bu sürekli simetriye karşılık gelen bir korunum yasası olduğunu söyler. Hesaplar yapıldığında zaman içinde değişmeyen niceliğin parçacıkların toplam doğrusal momentumu olduğu görülür. Doğrusal momentumun korunumu ile ötelenme simetrisi arasında bire bir ilişki vardır.

Şimdi de koordinat sistemini ötelemediğimizi ancak bir eksen etrafında keyfi bir derece döndürdüğümüzü düşünelim. Önceki durumda olduğu gibi koordinatlar değişse de meydana gelen fiziksel süreçlerde bir değişiklik olmayacaktır. Noether'in teoremi bu dönme simetrisine karşılık gelen bir korunum yasası olduğunu söyler. Hesaplar yapıldığında zaman içinde değişmeyen niceliğin sistemin toplam açısal momentumu ol-

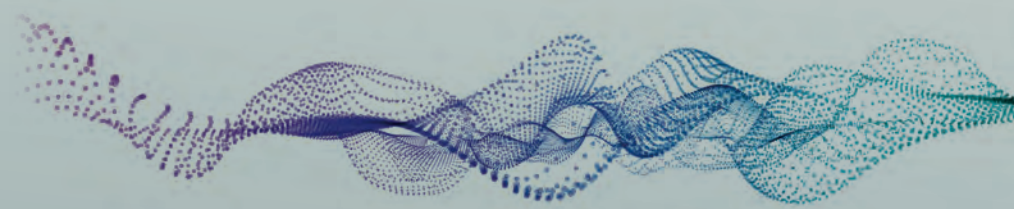
duğu görülür. Dönme simetrisi ile açısal momentumun korunumu arasında bire bir ilişki vardır.

Doğrusal momentumun korunumunun uzaydaki ötelenme simetrisinden kaynaklanmasına benzer biçimde enerjinin korunumu da zamandaki ötelenme simetrisinden kaynaklanır. Elektrik yükünün korunumu ise kuantum elektrodinamiğindeki bir simetrinin ($U(1)$ olarak adlandırılan bir tür ayar simetrisinin) sonucudur.

Noether'in Teoreminin Bugünü

Bugün simetri ve korunum yasaları arasındaki ilişkinin tartışılmadığı herhangi bir kuantum alan teorisi kitabı bulamazsınız. Yakın zamanlarda yayımlanmış kuramsal fizik makaleleri arasında bir tarama yaptığınızda sadece başlığında bile Noether'in adı geçen sayısız makale karşınıza çıkar.

Noether'in simetri ve korunum yasaları ile ilgili teoreminden iki şekilde yararlanabilirsiniz. Birincisi, elinizde bir kuram vardır, kuramdaki matematiksel ifadeleri inceleyerek hangi simetrilere sahip olduklarını tespit eder ve hangi niceliklerin korunduğuyla ilgili hesaplar yaparsınız. İkincisi, elinizde henüz bir kuram yoktur ancak geliştirmek istediğiniz kuramın belirli simetrilere (ya da korunum yasalarına) sahip olması gerektiğini düşünmektesinizdir. Önce bu simetrilere sahip matematiksel ifadeleri türetir, daha sonra da bulduğunuz ifadelerin doğal süreçleri tahmin etme konusunda ne kadar başarılı olduğuna bakarsınız. Eğer geliştirdiğiniz kuram doğayı büyük bir doğrulukla betimliyorsa doğru yolda olduğunuzu düşünür, doğada gerçekten de böyle bir simetri olduğu çıkarımını yaparsınız. Modern fizikçiler de Noether'in teoreminden sıklıkla bu şekilde yararlanıyorlar. Yeni kuramlar geliştirme çabalarındaki en önemli yol göstericilerden biri Noether'in teoremi olmaya devam ediyor. ■



Kaynaklar:

- Byers, Nina, "The Life and Times of Emmy Noether. Contributions of Emmy Noether to Particle Physics", <https://arxiv.org/abs/hep-th/9411110>, 1994.
- Byers, Nina, "E. Noether's Discovery of the Deep Connection Between Symmetries and Conservation Laws", <https://arxiv.org/abs/physics/9807044>, 1998.
- Conover, Emily, "In her short life, mathematician Emmy Noether changed the face of physics", *Science News*, <https://www.sciencenews.org/article/emmy-noether-theorem-legacy-physics-math>, 2020.