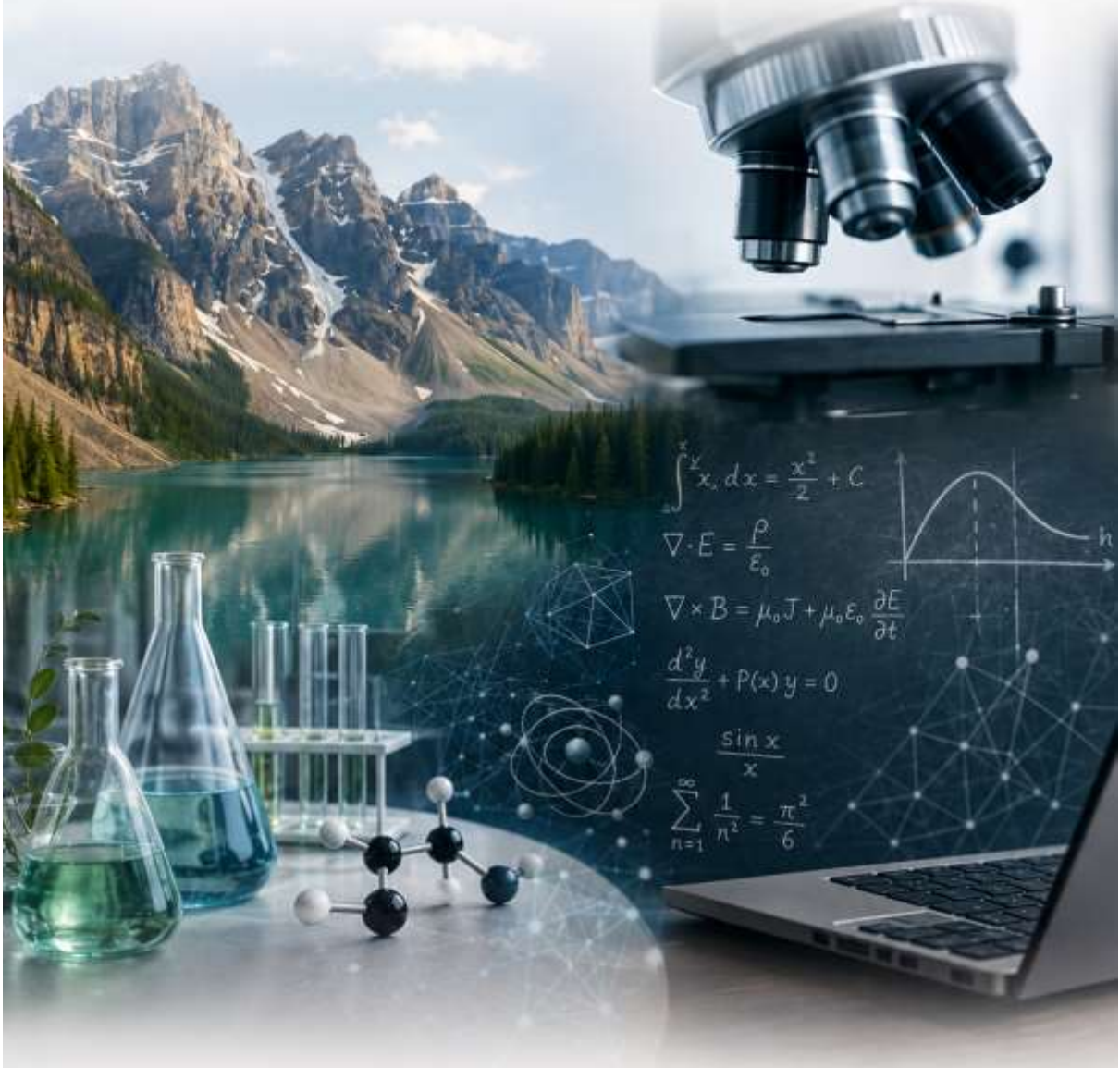
DOĞA BİLİMLERİ VE MATEMATİKTE GÜNCEL EĞİLİMLER VE İLERİ ÇALIŞMALAR



All Sciences Academy

DOĞA BİLİMLERİ VE MATEMATİKTE GÜNCEL EĞİLİMLER VE İLERİ ÇALIŞMALAR

Editör
Prof. Dr. Neslihan İYİT

Doğa Bilimleri ve Matematikte Güncel Eğilimler ve İleri Çalışmalar
Editör: Prof. Dr. Neslihan İYİT

Dizayn: All Sciences Academy Design
Basım Tarihi: Temmuz 2026
Yayıncı Sertifika Numarası: 72273
ISBN: 978-625-8839-35-7

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com
allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm **5**

Düzensizlik Bilimi: Entropi Üzerine Kavramsal Bir Değerlendirme

Musa GÖGEBAKAN

2. Bölüm **19**

3 Boyutlu Öklid Uzayında İnvolüt-Evolüt Eğri Çiftinin Küresel Göstergelerinin Yay Uzunlukları ve Geodezik Eğrilikleri

Mustafa BİLİCİ

3. Bölüm **30**

Fındık Zarı ve Kabuğunun Yağ Asidi Profilinin Gaz Kromatografisi ile Belirlenmesi: Fındık İşleme Yan Ürünlerinin Katma Değerli Kullanım Potansiyeli

Temine ŞABUDAK

Düzensizlik Bilimi: Entropi Üzerine Kavramsal Bir Değerlendirme

Musa GÖGEBAKAN

1- Prof. Dr. Musa GÖGEBAKAN; Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü. gogebakan@ksu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5104-2874

ÖZET

Mevcut çalışmada, temel bir fizik kavramı olan ve doğadaki düzensizliğin nicel bir ölçüsü olarak ifade edilen entropi kavramı ele alınmış ve bu kavramın temel özellikleri analiz edilmiştir. Entropi, bir sistemdeki düzensizlik düzeyini ve olası mikroskobik durumların sayısını ifade eden temel bir termodinamik büyüklüktür. Yaşamımızın her safhasında karşılaştığımız entropiyi, hayatı zamanla daha düzensiz ve karmaşık hâle getiren görünmez bir güç olarak tanımlamak yanlış olmayacaktır. Genel anlamda entropi, sistemlerin zaman içerisinde daha olası ve daha düzensiz durumlara yönelme eğilimini açıklayan bir ölçüt olarak değerlendirilebilir. Doğada gözlenen sistemlerin büyük bir bölümü sürekli değişim hâlindedir ve zamanla enerjilerini azaltarak denge durumuna ulaşma eğilimindedir. Bir sistem termodinamik dengeye ulaştığında, enerjisi en düşük seviyeye iner, makroskobik ölçekte gözlemlenebilen değişimler ortadan kalkar ve sistem kararlı bir duruma ulaşır. Bu koşullar altında sistem, mevcut şartlar çerçevesinde olası en yüksek entropi değerine sahip olur ve sistem makroskobik değişim eğilimi göstermez. Termodinamiğin ikinci yasası, dış çevresiyle madde, ısı ve enerji alışverişi yapmayan yalıtılmış sistemlerde entropinin kendiliğinden azalmayacağını, aksine artma yönünde değişeceğini ifade etmektedir. Bu, evrendeki en temel yasalardan biridir. Doğal süreçler, zaman içerisinde belirli bir yön doğrultusunda ilerleme eğilimi gösterir. Örneğin, sıcaklığı çevresinden daha yüksek olan bir cisim, zamanla çevresiyle ısı alışverişinde bulunarak sıcaklık farkını azaltır ve termal dengeye yaklaşır. Kendiliğinden gerçekleşen bu süreç, tersinir olmayan olayların tipik bir örneğidir ve sistem ile çevrenin toplam entropisindeki artışla açıklanır. Entropi kavramı yalnızca termodinamik sistemlerin incelenmesinde değil; aynı zamanda kimya, biyoloji, matematik, bilgi teorisi ve kozmoloji gibi birçok disiplinin teorik altyapısında da önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada, entropi kavramı farklı bilimsel bakış açıları çerçevesinde ele alınmış ve temel özellikleri açısından değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Entropi, düzensizlik, termodinamik, denge

1. GİRİŞ

Entropi, bir sistemdeki düzensizlik, rastgelelik veya enerji dağılımının nicel bir ölçüsüdür. Temel bir fizik kavramı olan entropi, yalnızca termodinamik sistemlerin incelenmesinde değil; aynı zamanda kimya, biyoloji, matematik, bilgi teorisi ve kozmoloji gibi birçok disiplinin teorik altyapısında da önemli bir yer tutmaktadır. Termodinamikte entropi, bir sistemde kullanılabilir enerjinin azalmasını ve doğal süreçlerin kendiliğinden daha düzensiz durumlara yönelme eğilimini ifade eder. Bu yönelim

sonucunda sistemin kullanılabilir enerjisi azalırken entropisi artar. Dolaysıyla, entropiyi kısaca, bir sistemdeki düzensizliğin veya enerji dağınıklığının ölçüsü olanak tanımlayabiliriz. Termodinamiğin temel kavramlarından biri olan entropi, ilk kez Rudolf Clausius tarafından tanımlanmıştır [1]. Entropi kavramı karmaşık gibi görünmesine rağmen, özünde bir sistemdeki düzensizlik derecesini ifade eden temel ve oldukça basit bir fiziksel büyüklüktür. Daha genel bir bakış açısıyla entropi, doğadaki enerji ve madde dağılımının ne ölçüde düzensiz olduğunu nicel olarak belirleyen bir ölçüttür [2]. Günlük yaşamda karşılaşılan tüm makroskobik sistemler belirli bir entropi değerine sahiptir ve bu değer sistemin düzen düzeyi hakkında bilgi verir. Örneğin bir çalışma odası veya ofis düşünüldüğünde, eşyaların belirli bir düzen içerisinde bulunması düşük entropili bir durumu temsil ederken, nesnelerin rastgele dağılmış olması daha yüksek entropili bir duruma karşılık gelir. Benzer şekilde, sıcak bir fincan kahvenin çevresiyle ısı alışverişi yaparak zamanla soğuması da entropi değişiminin gözlenebildiği doğal bir süreçtir. Bu değişim, sistemin entropisindeki artışın basit bir örneği olarak değerlendirilebilir. Düzenin korunması, dışarıdan enerji harcanmasını ve bilinçli müdahaleyi gerektirir. Buna karşın düzensizliğin ortaya çıkması çoğu zaman kendiliğinden gerçekleşir ve ek bir enerji girdisine ihtiyaç duymaz. Bu temel ilke, yalnızca makroskobik sistemlerde değil, atom ve moleküllerden oluşan mikroskobik sistemlerde de geçerlidir; bu nedenle entropi artışı doğadaki tüm fiziksel süreçlerin ortak bir özelliği olarak kabul edilir [3]. Doğadaki fiziksel olayların büyük çoğunluğu, enerjinin daha dengeli dağıldığı ve düzensizliğin arttığı yönünde ilerleme eğilimindedir. Bu eğilim, termodinamiğin ikinci yasasının bir sonucu olup, entropinin doğal süreçlerin yönünü belirleyen temel kavramlardan biri olduğunu göstermektedir. Düzensizlik evrendeki bir hatanın neticesi değildir; bir fizik kanunudur veya termodinamik olarak varsayılan durumdur. Düzen ise her zaman yapay ve geçicidir. Düzensizlik doğal olarak gerçekleşirken, düzen enerji ve çaba gerektirir. Diğer taraftan, entropi, zamanın varlığına dair kanıt sağlayan birkaç fiziksel kavramdan biridir. "Zaman Oku", zamanın asimetrik olduğu ve yalnızca bir yönde, ileri doğru aktığı fikrine verilen bir isimdir. Entropinin arışı geri döndürülemez doğal bir süreçtir.

2. TERMODİNAMİK VE ENROPİ

2.1. Entropinin Fiziksel Önemi

Doğadaki düzensizliğin bir ölçüsü olan entropi, aynı zamanda doğal süreçlerin yönünü belirleyen temel bir termodinamik parametrelerden biridir. Evren genelinde enerji zaman içinde daha homojen bir dağılıma yönelirken entropi artmaktadır. Bu nedenle entropi, zamanın yönünü tanımlayan fiziksel büyüklüklerden biri olarak kabul edilir. Aynı zamanda, malzeme bilimi, kimya, biyoloji ve mühendislik uygulamalarında faz dönüşümleri, difüzyon,

kimyasal reaksiyonlar ve enerji dönüşümleri gibi birçok olay entropi kavramı kullanılarak açıklanabilmektedir. Bu nedenle entropi, termodinamiğin yalnızca teorik değil aynı zamanda uygulamalı alanlarda da merkezi kavramlarından biridir. Diğer taraftan, termodinamik, enerji, iş, sıcaklık ve ısı arasındaki ilişkileri inceleyen fizik dalıdır. Doğadaki enerji dönüşümlerini açıklayan termodinamik, mühendislikten malzeme bilimine, kimyadan biyolojiye kadar birçok bilim alanının temelini oluşturmaktadır. Termodinamiğin temel amacı, enerjinin sistemler arasında nasıl aktarıldığını ve bu süreçlerin hangi kurallara göre gerçekleştiğini açıklamaktır. Termodinamik yasaları ile entropi arasındaki ilişki, özellikle ikinci yasa kapsamında açık bir şekilde ortaya konulmaktadır. Aşağıda termodinamiğin temel yasaları ile bu yasaların entropi kavramı üzerindeki etkileri ve entropi ile olan ilişkileri açıklanmaktadır.

2.2. Termodinamiğin Sıfırıncı Yasası

Termodinamiğin sıfırıncı yasası, sıcaklık kavramının temelini oluşturur. Bu yasa, iki ayrı sistem üçüncü bir sistem ile termal dengede ise, bu iki sistemin de birbirleriyle termal dengede olacağını ifade eder. Yanı; A sistemi B sistemi ile ısıl denede ise, B sistemi de C sistemi ile ısıl dengede ise, A sistemi ile C sistemi ısıl dengededir. Böylece sıcaklık ölçümü ve sıcaklık ölçekleri tanımlanabilmektedir.

2.3. Termodinamiğin Birinci Yasası

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu ilkesine dayanır [4-5]. Bu yasaya göre enerji yoktan var edilemez ve var olan enerji yok edilemez; yalnızca bir formdan başka bir forma dönüşebilir. Yani; toplam enerji sabittir ve evrendeki toplam enerji miktarı hiçbir zaman değişmez. Enerji biçim değiştirebilir. Isı enerjisi; hareket (iş) enerjisine veya kimyasal enerjiye dönüşebilir. Bu dönüşümde toplam enerji sabit kalır. Bunu matematikse formül ile

$\mathbf{\Delta U = Q - W}$ şeklinde ifade ederiz. (1)

Bir sistemin iç enerjisindeki değişim, sisteme verilen ısı ile sistemin yaptığı iş arasındaki farka eşittir: Burada; ΔU sistemin iç enerjisindeki değişim, Q sisteme aktarılan net ısı miktarı ve W sistemin çevresine yaptığı net işi ifade etmektedir. Termodinamiğin birinci yasasına göre, mühendislik uygulamalarında %100 verimle çalışan bir sistem veya cihaz tasarlamak mümkün değildir [6]. Sisteme verilen enerjinin yalnızca bir bölümü faydalı işe dönüştürülebilirken, geri kalan kısmı çeşitli kayıplar nedeniyle ısı enerjisi

olarak çevreye yayılmaktadır. Yani, enerji dönüşümleri sırasında bir miktar enerji daima işe yaramaz hâle gelir.

2.4. Termodinamiğin İkinci Yasası ve Entropi

Entropi kavramını ilk kez tanımlayan Rudolf Clausius, ısının işe dönüşümünü incelemiştir. Yaptığı çalışmalar sırasında, yüksek sıcaklıktaki bir sistemden düşük sıcaklıktaki bir sisteme doğru kendiliğinden bir ısı akışı gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Bu gözlem, Clausius'un termodinamiğin ikinci yasasına ilişkin şu ifadesinin temelini oluşturmuştur:

"Isı, başka hiçbir değişiklik meydana gelmeksizin, kendiliğinden düşük sıcaklıktaki bir cisimden yüksek sıcaklıktaki bir cisme geçemez."

Clausius ayrıca, bir sistemden alınan ısı enerjisinin tamamının işe dönüştürülemediğini, yalnızca belirli bir kısmının yararlı işe çevrilebildiğini fark etmiştir. Geriye kalan enerji ise düşük sıcaklıktaki ortama atık ısı olarak aktarılmaktadır. Bu durum, enerji dönüşümlerinin kaçınılmaz olarak bir verim sınırına sahip olduğunu ve entropinin artışıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

Termodinamiğin ikinci yasası, entropi kavramıyla yakından ilişkili olup doğal süreçlerin gerçekleşme yönünü belirleyen temel bir yasadır. Bu yasaya göre çevresiyle etkileşmeyen izole bir sistemin toplam entropisi zamanla azalmaz; ya sabit kalır ya da artar. Entropi değişimi;

$$\mathbf{dS} = \frac{dQ}{T} \qquad (2)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Burada; S entropiyi, dQ ısı alışverişini ve T mutlak sıcaklığı göstermektedir. Termodinamiğin bu yasası, sıcak bir cismin zamanla neden kendiliğinden soğuduğunu, gazların neden bulundukları hacmi dolduracak şekilde yayıldığını ve düzenli yapıların neden zamanla daha düzensiz hâle gelme eğiliminde olduğunu açıklayana bir yasadır. İkinci Yasa der ki: Yalıtılmış bir sistemde entropi zamanla artar ve denge durumunda maksimum olur. Bu yasa, doğal süreçlerin belirli bir yönde gerçekleştiğini ortaya koyar. This law states that natural processes occur in a particular direction. Günlük yaşamda da termodinamiğin ikinci yasasının etkilerini gösteren birçok olayla karşılaşılmaktadır. Örneğin sıcak bir fincan kahve zamanla çevresiyle ısı alışverişi yaparak soğur. Günlük yaşamda kullandığımız bir ofis, herhangi bir düzenleme yapılmadığı takdirde zamanla daha dağınık bir hâle gelme eğilimindedir. Bu durum, sistemlerin doğal olarak daha olası ve düzensiz durumlara yönelmesinin bir sonucudur. Ofisin yeniden düzenli hâle gelmesi ise dışarıdan bilinçli bir enerji ve emek

harcanmasını gerektirir; dolayısıyla bu süreç kendiliğinden gerçekleşmez. Bu olay sırasında evrenin toplam entropisi artar ve süreç termodinamiğin ikinci yasası ile uyumlu olarak ilerler. Diğer taraftan; mikroskobik açıdan bakıldığında entropi, bir sistemin sahip olduğu olası mikrodurum sayısıyla ilişkilidir. Sistemin sahip olabileceği durum sayısı arttıkça entropisi de artmaktadır. Bu ilişki Boltzmann tarafından [7];

$$\mathbf{S = k \ln W} \qquad (3)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada k Boltzmann sabiti, W ise sistemin sahip olduğu mikrodurum sayısıdır.

Ludwig Boltzmann tarafından geliştirilen bu bağıntı, makroskopik bir sistemin entropisini sistemi oluşturan mikro durumların sayısı ile ilişkilendirerek entropinin istatistiksel temelini ortaya koyar. Termodinamik dengedeki bir sistem, girilebilir mikro durumların sayısının en fazla olduğu makroduruma karşılık gelir. Bu nedenle dengedeki bir sistemin entropisi maksimumdur [8-9]. Denge dışında bulunan sistemler ise daha az sayıda mikro duruma karşılık gelen makrodurumlarda bulunur ve zamanla daha olası, yani daha fazla mikro duruma sahip denge durumuna doğru evrilirler. Ayrıca İstatistik mekaniğe göre dengedeki bir sistem girilebilir durumlarının her birinde eşit olasılıkla bulunur. Basit bir örnek olarak bir zar atışı ele alınabilir. Altı yüzlü bir zarın her bir yüzünün üste gelmesine neden olacak özel bir fiziksel etki bulunmadığında, sistem simetrik kabul edilir (denge) ve her bir yüzün üste gelme olasılığı eşittir. Bu durumda zarın makroskopik olarak girilebilir durumları arasında bir ayrıcalık yoktur ve tüm olası sonuçlar eşit olasılıklıdır. Bu tür bir durum, istatistiksel açıdan en olası dağılıma karşılık gelir ve Ludwig Boltzmann tarafından geliştirilen istatistiksel yaklaşımın temel mantığını basit bir örnekle göstermektedir.

2.5. Termodinamiğin Üçüncü Yasası

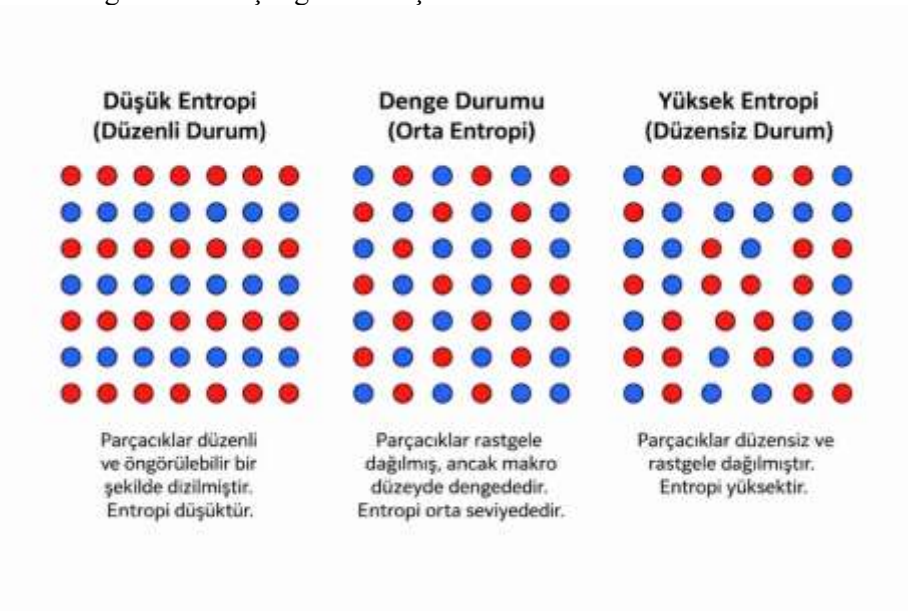
Termodinamiğin üçüncü yasası, bir kristalin sıcaklığı mutlak sıfıra (0 K) yaklaştığında entropisinin minimum bir değere ulaşacağını ifade eder. İdeal ve kusursuz bir kristal yapı için mutlak sıfırdaki entropi sıfır kabul edilir. Bu yasa, düşük sıcaklık fiziği ve kriyojenik uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır [10]. Ancak mutlak sıfır sıcaklığına ulaşmak pratikte mümkün değildir. Bu yasa matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\mathbf{S\,(0\ K) = 0} \qquad (4)$$

Burada; S entropi ve 0 K: Mutlak sıfır sıcaklığıdır.

3. TERMAL DENGE VE ENROPİ

Doğal sistemlerin zaman içerisinde denge durumuna ulaşma eğiliminde olmaları, termodinamiğin temel ilkeleriyle açıklanan evrensel bir doğa kanunudur. Bir sistem denge durumuna ulaştığında, kullanılabilir enerjisi minimum seviyeye inerken entropisi maksimum değerine ulaşır. Dışardan herhangi bir enerji girdisi veya bilinçli ve düzenleyici bir etki olmaksızın, bir sistem zamanla daha düzenli bir durumdan daha düzensiz bir duruma doğru evrilme eğilimi gösterir. Bu duruma ilişkin açıklayıcı bir örnek, Şekil 1' de ideal bir gaz sistemi için gösterilmiştir.



Şekil 1. Düzensizliğe doğru bir eğilimin şematik gösterimi.

Şekil 1'de, bir sistemin zamanla daha düzenli bir durumdan daha düzensiz bir duruma doğru evrilmesi şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 1' deki ilk durum, düşük entropi ve oldukça düzenli bir yapıyı temsil etmektedir. Bir sistemin böyle bir duruma ulaşması ve bu düzeni koruyabilmesi, genellikle kasıtlı bir müdahale ve belirli bir enerji harcanması ile mümkündür. Normal şartlar altında bir sistemin kendiliğinden bu kadar düzenli bir duruma gelmesi ve bu düzeni uzun süre koruyabilmesi olanaksızdır. Zamanla, sistemi oluşturan parçacıklar arasındaki karşılıklı etkileşmeler neticesinde sistem daha düzensiz ve daha olası bir duruma doğru evrilir. Bu süreç, sistemin entropisinin artmasıyla karakterize edilir ve termodinamiğin ikinci yasasının doğal bir sonucudur. Sistem Şekil 1'deki son duruma ulaştığında, enerji içeriği minimum seviyeye inerken, entropisi maksimum değere ulaşır. Bu durumda, sistemi termodinamik dengeye eriştiğini ve makroskopik ölçekte düzensiz bir yapı sergilediğini gösterir.

Denge durumunda sistemi oluşturan parçacıklar işgal ettikleri hacim boyunca rastgele dağılmış olup, herhangi bir bölgede belirgin bir düzen veya yoğunlaşma gözlenmez. Böylece sistem, en olası mikroskobik duruma ulaşarak kararlı bir denge hâline gelir. Maksimum entropi durumuna ulaşan sistem, kararlı bir denge hâlinde olduğundan zamanla makroskopik özelliklerinde gözle görülür bir değişim meydana gelmez. Buna karşılık, sistemin yüksek entropili denge durumundan düşük entropili düzenli bir duruma kendiliğinden dönüşmesi termodinamik açıdan olası değildir. Kısacası, yalıtılmış bir sistem termodinamik dengeye ulaştığında entropisi maksimum değere ulaşır. Dengeye ulaşmamış sistemlerde ise entropi bu maksimum değerden daha düşük olup, sistem zamanla daha yüksek entropili denge durumuna doğru değişme eğilimindedir. Buna benze durumlar ve değişimler günlük yaşamda sıkça gözlemlenmektedir. Örneğin, düzenli bir odanın veya kullandığımız ofisin zamanla daha dağınık hale gelmesi, sıcak bir kahvenin bulunduğu ortamla ısıl dengeye ulaşarak soğuması veya bir parfümün kokusunun oda içerisinde kendiliğinden yayılması, sistemlerin daha yüksek entropili durumlara yönelme eğiliminin günlük hayattaki örnekleridir. Benzer şekilde, bu olayların ters yönde kendiliğinden gerçekleştiği hiçbir zaman gözlemlenmez. Dolaysıyla, dengede olmayan bir sistem zaman içinde mevcut durumunu sürdüremez ve dengeye ulaşma yönünde evrilir.

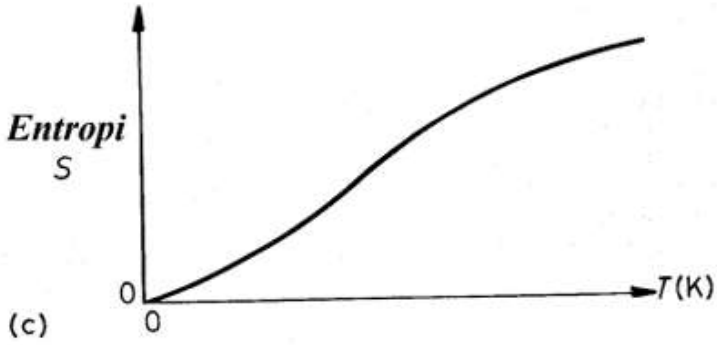
3. FAZLAR VE ENROPİ

Maddelerin sıcaklık ve basınç gibi dış etkenler nedeniyle faz değiştirmesi sırasında entropi önemli ölçüde değişir. Genel olarak, sistemi oluşturan moleküllerin hareket serbestliği arttıkça entropi de artar. Çünkü entropi, bir sistemdeki düzensizliğin ve erişilebilir mikroskobik durumların sayısının bir ölçüsüdür. Aynı maddenin katı, sıvı ve gaz fazlarının entropileri karşılaştırıldığında genel eğilim aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\mathbf{S\ (gaz) > S\ (sıvı) > S\ (katı)} \qquad (5)$$

Bu ilişki (3) nolu denklemde verilen entropinin istatistiksel yorumuyla açıklanır. Boltzmann tarafından geliştirilen yaklaşıma göre entropi, bir sistemin belirli bir makroskopik durumunu gerçekleştirebilen mikroskobik düzenlemelerin sayısına bağlıdır. Başka bir ifadeyle, erişilebilir mikro durumların sayısı arttıkça sistemin entropisi de artmaktadır. Gaz fazında sistemin tanecikleri geniş bir hacme yayılmış durumda olup hareket serbestlikleri oldukça yüksektir. Bu nedenle sistemin alabileceği olası mikro durum sayısı maksimum düzeye ulaşır ve gazlar en yüksek entropiye sahip faz olarak değerlendirilir. Sıvı fazda ise tanecikler birbirlerine katılara göre daha gevşek bağlıdır ve belirli ölçüde hareket edebilirler. Bu yapı, sıvıların gazlara kıyasla daha düzenli, katılara kıyasla ise daha düzensiz olmasına

neden olur. Dolayısıyla sıvı fazın erişilebilir mikro durum sayısı ve entropisi, gaz ve katı fazların değerleri arasında yer alır. Katı fazda tanecikler belirli konumlar etrafında yalnızca titreşim hareketi yapabildiğinden hareket serbestlikleri oldukça sınırlıdır. Bu durum, sistemin sahip olabileceği mikro durum sayısını önemli ölçüde azaltır. Sonuç olarak katılar, gaz ve sıvı fazlara kıyasla daha düzenli bir yapıya sahip olduklarından en düşük entropi değerini gösterirler. Bir sistemin bir dış etki nedeniyle faz değiştirmesi durumunda entropisi de değişir. Örnek olarak bir maddenin katı halde sıvı hale dönüşmesi yani erimesi durumunda entropi artar. Buharlaşma (sıvı → gaz): Entropi daha da artar. Şekil 2'de entropinin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmektedir.



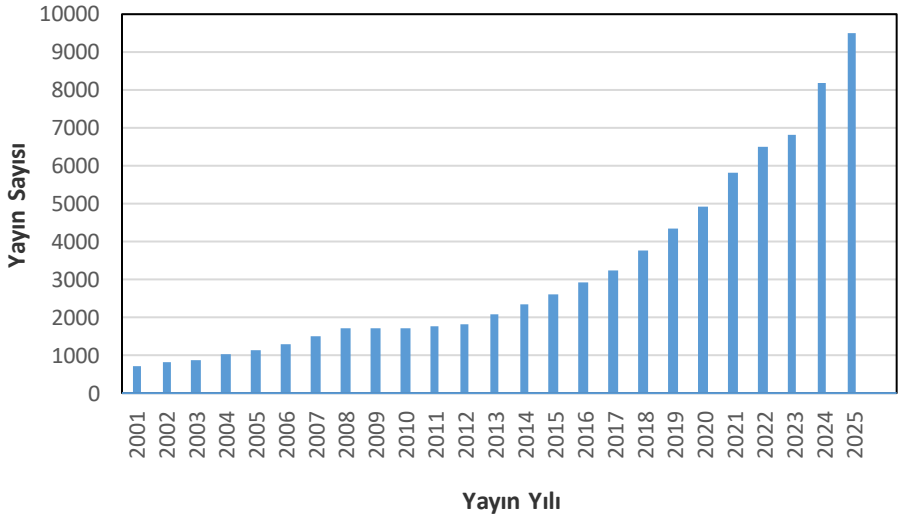
Şekil 2. Entropinin Sıcaklıkla Değişimi.

Sıcaklık arttıkça sistemin tanecikleri daha yüksek enerji seviyelerine erişebilmekte ve erişilebilir mikro durum sayısı artmaktadır. Bu nedenle entropi sıcaklığın artmasıyla lineer olarak yükselmektedir. Mutlak sıfır sıcaklığında entropi minimum değerini alırken, sıcaklığın yükselmesiyle birlikte düzensizlik ve moleküler hareketlilik artmakta, buna bağlı olarak entropi de büyümektedir. Eğrinin yüksek sıcaklıklarda giderek yataylaşması, sıcaklıktaki ilave artışların entropi üzerindeki etkisinin göreceli olarak azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu davranış termodinamiğin üçüncü yasası ve entropinin istatistiksel yorumu ile uyumludur.

4. ENTROPNİN ÖNEMİ

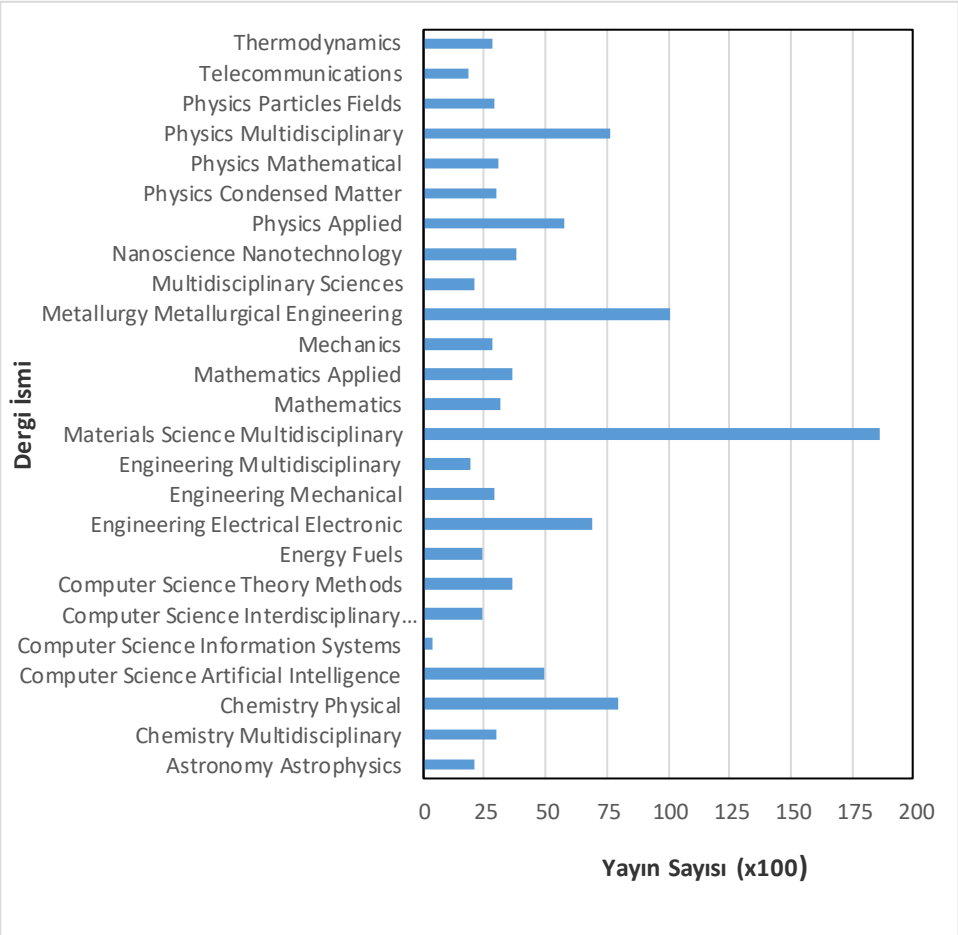
Entropi, günümüzde fizik, kimya, malzeme bilimi, bilgi teorisi, biyoloji ve çevre bilimleri gibi birçok farklı disiplinde yoğun olarak araştırılan ve önemini koruyan temel kavramlardan biridir. Bu durum, entropi konusuna yönelik bilimsel ilginin yıllar içerisinde sürekli arttığını göstermektedir. Şekil 3'te, 2000–2025 yılları arasında entropi konusunda yayımlanan bilimsel çalışmaların yıllara göre dağılımı verilmiştir [11]. Grafik

incelendiğinde, yayın sayısının yıllar içinde düzenli olarak arttığı, özellikle 2018 yılından sonra ise bu artışın belirgin biçimde hızlandığı görülmektedir. Bu eğilim, entropi kavramının farklı bilim dallarında giderek daha geniş uygulama alanı bulduğunu ve güncelliğini koruyan önemli bir araştırma konusu olduğunu ortaya koymaktadır. Gelecekte de bu önemli konunun güncelliğini koruyacağı ve bu konuda yapılacak bilimsel araştırmaların artarak devam edeceği öngörülmektedir. Bu konuda araştırma yapan bilim insanları entropinin tüm alanlara uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Entropi için bilimsel ve felsefi tanımlamalar kullanılmaktadır. Örneğin "Entropi, evrenin zamana uyguladığı vergidir. Entropiye karşı sürekli mücadele, yaptığımız şeylerin çoğunun arkasındaki itici güçtür. Düzen ve düzensizlik arasındaki sürekli mücadele, değişimin ve ilerlemenin kaynağıdır" gibi tanımlamalar kullanılmıştır.



Şekil 3 Entropi ile ilgili yapılan yayın sayısı 2000-2025 yılları arası

Diğer taraftan bir fizik kavramı olan entropi birçok ananın araştırma konusu olmuştur. **Şekil 4**'de 2000–2025 yılları arasında entropi konusunda yayımlanan makalelerin bilim alanlarına göre dağılımı verilmiştir [11]. Grafik incelendiğinde, entropi ile ilgili çalışmaların çok disiplinli bir yapıya sahip olduğu ve farklı bilim dallarında yoğun olarak araştırıldığı görülmektedir. En fazla yayının Materials Science Multidisciplinary (Malzeme Bilimi) alanında gerçekleştirildiği dikkat çekmektedir. Ayrıca 13 farkı dergi bu konuda yapılan bilimsel makaleyi yayımlamıştır. Bu durum, entropi kavramının özellikle yüksek entropili alaşımlar, nanomalzemeler, fonksiyonel malzemeler ve ileri malzeme tasarımı gibi güncel araştırma konularında yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir.



Şekil 4. 2000-2025 yılları arasında Entropi ile ilgili makalelerin yayınlandığı dergiler

Bu dağılım, entropi kavramının yalnızca klasik termodinamik ile sınırlı kalmayıp; malzeme tasarımı, faz dönüşümleri, enerji sistemleri, elektronik malzemeler ve fiziksel süreçlerin modellenmesi gibi çok farklı araştırma alanlarında etkin olarak kullanıldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca Bilgisayar Bilimleri, Yapay Zekâ, Matematik, Mekanik, Nanobilim ve Nanoteknoloji, Enerji, Astronomi ve Astrofizik gibi alanlarda da önemli sayıda yayının bulunması, entropinin disiplinler arası bir kavram hâline geldiğini göstermektedir. Özellikle bilgi teorisi, veri analizi, makine öğrenmesi ve karmaşık sistemlerin modellenmesinde kullanılan bilgi entropisi yaklaşımları, son yıllarda bilgisayar bilimleri ve yapay zekâ alanındaki yayın sayısının artmasına katkı sağlamıştır. Günümüzde

teknolojik gelişmelerin hızı ve ivmesi önemli ölçüde artış göstermiştir. Özellikle yapay zekânın hayatımız girmesi ve her alanda kullanılıyor olması entropi konusunun da daha fazla önem arz edeceği öngörülmektedir.

Entropi güncel olarak birçok farklı alanda ve sistemde kullanılmaktadır. Bunların en önemlileri aşağıda verilmiştir.

Matematik ve Fizik
Enerji sistemleri
Nano ve kuantum sistemler
Biyolojik sistemlerde entropi
Entropi–yaşam paradoksu

6. SONUÇ

Entropi kavramı ilk defa Alman fizikçi ve matematikçi Rudolf Clausius tarafından 1865 yılında tanımlanmış ve böylece bilim literatürüne önemli bir kavram kazandırılmıştır. Mikroskobik açıdan entropi, bir sistemdeki düzensizliğin veya rastgeleliğin nicel bir ölçüsü olarak tanımlanır. Clausius, sistemin durumunu tanımlayan yeni bir termodinamik büyüklük için, Yunanca "dönüşüm" veya "değişim" anlamına gelen *trope* sözcüğünden türettiği "entropi" adını kullanmıştır. İstatistiksel termodinamik açısından ise entropi, bir makroduruma karşılık gelen erişilebilir mikrodurumların sayısıyla ilişkilidir. Entropi = Dönüşüm=Değişim olarak kısaca tanımlanabilir. Daha anlaşılır bir ifadeyle entropi ″bir sistemin zamanla değişmesi neticesinde makrodurumuna karşılık gelen olası mikrodurum sayısının (çeşitliliğinin) bir ölçüsüdür″. Entropi, bir sistemde gerçekleşen enerji dönüşümlerinin yönünü belirleyen ve doğal süreçlerin kendiliğinden hangi yönde ilerlediğini açıklayan temel bir termodinamik büyüklüktür. Bu nedenle entropi, yalnızca düzensizliği değil, aynı zamanda sistemin olasılık ve belirsizlik düzeyini de ifade eden bir büyüklük olarak değerlendirilmektedir. Bu açıklamalar doğrultusunda entropi ile ilgili temel sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Doğadaki tüm sistemler zamanla termodinamik dengeye gelecek şekilde hareket ederler.
- Yalıtılmış bir sistemde entropi zamanla artar ve denge durumunda maksimum değerini alır.
- Doğal süreçler bir dış etki olmaksızın kendiliğinden tek yönde ilerler.
- Doğadaki gerçek süreçlerin geneli tersinmez niteliktedir.
- Kendiliğinden gerçekleşen süreçler daha yüksek entropili durumlara doğru değişim gösterir.
- Bir sistemin gerçekleştirebileceği olası mikrodurumların sayısı arttıkça entropisi de artmaktadır

- Doğal süreçler daha yüksek entropiye yönelir.
- Isı, dışarıdan iş yapılmadığı sürece kendiliğinden sıcak cisimden soğuk cisme akar
- Termodinamiğin ikinci yasası gereği %100 verimle çalışan bir ısı makinesi yapmak mümkün değildir.

REFERANSLAR

[1] Clausius, R. (1865). *Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie*. Annalen der Physik, 201(7), 353–400.

[2] Boltzmann, L. (1896–1898). *Vorlesungen über Gastheorie (Gaz Teorisi)* . Leipzig: Johann Ambrosius Barth

[3] Reif, F. (1965). *Fundamentals of Statistical and Thermal Physics*. New York: McGraw-Hill.

[4] Wehrl, Alfred (1978). "General properties of entropy". *Reviews of Modern Physics*. 50 (2): 221–260.

[5] Cooper, Leon N. (1968). An Introduction to the Meaning and Structure of Physics. Harper. p. 331

[6] Lower, Stephen. (2016). "What is entropy?" *chem1.com*. Retrieved 21 May.

[7] Atkins, Peter; Julio De Paula (2006). *Physical Chemistry, 8th ed*. Oxford University Press. p. 79.

[8] Frigg, R. and Werndl, C. (2011) "Entropy – A Guide for the Perplexed" at the Wayback Machine. In *Probabilities in Physics*;

[9] Schroeder, Daniel V. (2000). *An introduction to thermal physics*. San Francisco, CA: Addison Wesley. p. 57. ISBN 978-0-201-38027-9.

[10] Gao, Xiang (2022). "The Mathematics of the Ensemble Theory". *Results in Physics*. 34 105230. arXiv:2006.00485. Bibcode:2022ResPh..3405230G. doi:10.1016/j.rinp.2022.105230. S2CID 221978379

[11] Web of Science, Core Collection verileri kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır (erişim tarihi: 22 Haziran 2026).

3 Boyutlu Öklid Uzayında İnvolüt-Evolüt Eğri Çiftinin Küresel Göstergelerinin Yay Uzunlukları ve Geodezik Eğrilikleri

Mustafa BİLİCİ[1]

1- Prof. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, mbilici@omu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3502-5027

ÖZET

Bu kitap bölümünde, 3-boyutlu Öklid uzayı$\mathbb{E}^3$ 'te verilen bir M_1 evolüt eğrisi ile bu eğrinin M_2 involüt eğrisinden meydana gelen (M_2, M_1) involüt-evolüt eğri çiftinin küresel göstergeleri incelenmiştir. Bu doğrultuda öncelikli olarak involüt eğrisinin yardımıyla tanımlanan küresel göstergelerin (teğet (T^*), asli normal (N^*) ve binormal (B^*) göstergeleri) yay uzunlukları, hem $\mathbb{E}^3$ Öklid uzayı hem de S^2 birim küresi üzerindeki Gauss tasviri altında ortaya çıkan jeodezik eğrilikleri hesaplanacaktır. Ardından, elde edilen bu diferansiyel-geometrik büyüklükler ile evolüt eğrinin eğrilik, burulma ve Darboux bileşenleri arasındaki temel bağıntılar ve küresel göstergelerin yay uzunluklarına ilişkin karakteristik sonuçlar sistematik bir bütünlükle sunulacaktır. Elde edilen temel bulgulardan biri olarak, evolüt eğrisinin genel helis olması durumunda küresel göstergelerin yay uzunlukları ve jeodezik eğrilikleri için sabit invariant değerler sunulmuştur. Çalışmanın sonunda, involüt eğrinin küresel göstergelerinin $\mathbb{E}^3$ uzayındaki ve S^2 birim küresi üzerindeki jeodezik eğrilikleri arasında Pisagor tipi genel bir bağıntının varlığı gösterilmiştir

Anahtar Kelimeler – İnvolüt-evolüt eğri çifti; Küresel gösterge eğrisi; Jeodezik eğrilik; Yay uzunluğu; Darboux vektörü

GİRİŞ

Diferansiyel geometride eğriler teorisinin en dinamik alanlarından birini oluşturan involüt-evolüt eğri çiftleri, birbirlerinin teğet doğrultuları arasındaki diklik ilişkisi esasına dayanarak tanımlanır. Aşağıda, involüt-evolüt eğri çiftlerinin Frenet çatısı yardımıyla yapılan tanımı verilmektedir.

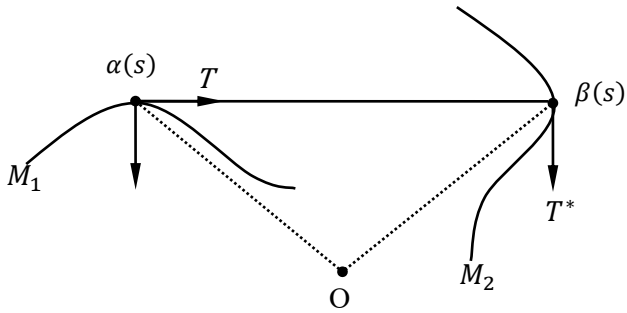
$M_1, M_2 \subset \mathbb{E}^3$ eğrileri, sırası ile, (I, α) ve (I, β) koordinat komşulukları ile verilsin. $\alpha(s)$ ve $\beta(s)$ noktalarında M_1 ve M_2 nin Frenet 3-ayaklıları , sırası ile ,

$$\{T, N, B\} \text{ ve } \{T^*, N^*, B^*\}$$

olmak üzere

$$\langle T, T^* \rangle = 0$$

ise M_2 ye M_1 in involütü, M_1 e de M_2 nin evolütü denir (Şekil 1).



Şekil 1: İnvolüt-evolüt eğri çifti

Bu kitap bölümünde, $\mathbb{E}^3$ Öklid uzayında M_1 evolüt eğrisi ile onun bir M_2 involüt eğrisinden meydana gelen(M_2, M_1) involüt-evolüt eğri çifti ele alınacaktır. Bu doğrultuda öncelikli olarak involüt eğrinin yardımıyla tanımlanan küresel göstergelerin (teğet (T^*), asli normal (N^*) ve binormal (B^*) göstergeleri) yay uzunlukları, hem $\mathbb{E}^3$ Öklid uzayı hem de S^2 birim küresi üzerindeki Gauss tasviri altında ortaya çıkan jeodezik eğrilikleri hesaplanacaktır. Ardından, elde edilen bu diferansiyel-geometrik büyüklükler ile evolüt eğrinin eğrilik, burulma ve Darboux bileşenleri arasındaki temel bağıntılar ve küresel göstergelerin yay uzunluklarına ilişkin karakteristik sonuçlar sistematik bir bütünlükle sunulacaktır.

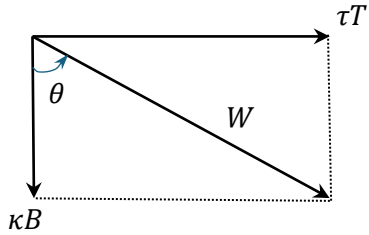
Üç boyutlu Öklid uzayı $\mathbb{E}^3$ içinde hareket eden regüler bir M eğrisinin geometrik davranışı, onun lokal Frenet çatısı $\{T, N, B\}$ (sırasıyla teğet, asli normal ve binormal vektör alanları) ile bu çatı bileşenlerinin türevsel değişimlerini belirleyen κ (eğrilik) ve τ (burulma) fonksiyonları vasıtasıyla eksiksiz bir şekilde tasvir edilebilir. Eğrinin Frenet 3-ayaklısının her s anında, bir eksen etrafında, bir ani helis hareketi yaptığı kabul edilir. Bu eksene eğrinin bu s parametresine karşılık gelen $\alpha(s)$ noktasındaki *Darboux ekseni* denir. Bu eksenin yön ve doğrultusunu veren vektöre eğrinin $\alpha(s)$ noktasındaki *Darboux vektörü* adı verilir ve

$$W = \tau T + \kappa B = N \wedge N'$$

şeklinde tanımlanır ve W ile binormal vektör alanı B arasındaki θ açısı olmak üzere

$$\begin{cases} \kappa = \|W\| cos\theta \\ \tau = \|W\| sin\theta \end{cases} \tag{1}$$

yazılabileceği çok açıktır (Şekil 2).



Şekil 2: Darboux vektörü

Bu açı eğrilerin helis (eğilim çizgisi) olma karakterizasyonlarında belirleyici bir rol üstlenir. W Darboux vektörü yönündeki birim vektörü C ile gösterirsek,

$$\|W\| = \sqrt{\kappa^2 + \tau^2}$$

olmak üzere

$$C = \frac{\tau}{\|W\|}T + \frac{\kappa}{\|W\|}B$$

olur. Bu son denklem (1) denklemi ile birlikte kullanılırsa

$$C = sin\theta T + cos\theta B \tag{2}$$

şeklinde ifade edilir.

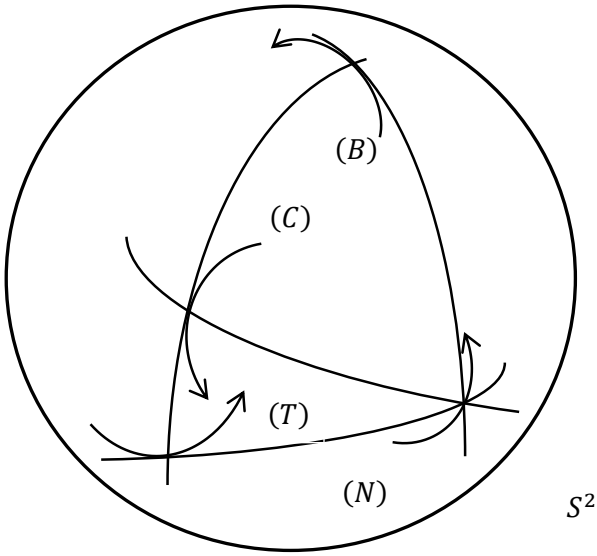
Eğrinin her noktasındaki C birim vektörü S^2 birim küresinin merkezine taşındığında, küre yüzeyi üzerinde elde edilen eğriye Darboux küresel gösterge eğrisi (bazı kaynaklarda sabit pol eğrisi) adı verilir ve (C) ile gösterilir. Benzer şekilde, eğrinin birim teğet, asli normal ve binormal vektörlerinin S^2 birim küresi üzerine taşınmasıyla sırasıyla teğet göstergesi (T), asli normal göstergesi (N) ve binormal göstergesi (B) elde edilir. $\mathbb{E}^3$ Öklid uzayında bir M eğrisinin (T) teğetler göstergesini, (N) asli normaller göstergesini, (B) binormaller göstergesini ve (C) sabit pol eğrisini bir küre yüzeyi üzerinde gösterebiliriz (Şekil 3). İnvolüt tanımı dikkate alındığında,

$$\langle \frac{dC}{ds}, \frac{dT}{ds} \rangle = 0$$

ve

$$\langle \frac{dC}{ds}, \frac{dB}{ds} \rangle = 0$$

eşitliklerinden, (C) sabit pol eğrisinin teğet doğrultusunun sırasıyla (T) ve (B) küresel gösterge eğrilerinin teğet doğrultularına dik olduğu görülür. Dolayısıyla, Öklid uzayında bir M eğrisinin (T) teğetler göstergesi ve (B) binormaller göstergesi, (C) sabit pol eğrisinin iki farklı küresel involütü olduğu sonucuna ulaşılır.



Şekil 3: Bir eğrinin S^2 deki Küresel Gösterge Eğrilerinin Temsili

Sabit pol eğrisi (C) nin yay uzunluğu

$$s_C = \int_0^s \dot{\theta} ds = \theta(s) - \theta(0)$$

şeklindedir.

Benzer şekilde, teğet (T), asli normal (N) ve binormal (B) küresel gösterge eğrilerinin yay uzunlukları ile bu eğrilerin $\mathbb{E}^3$ ve S^2 'deki jeodezik eğriliklerine ilişkin temel bağıntılar (Fenchell, 1951:47) tarafından elde edilmiştir. İleride yararlanılacak bu bağıntılar aşağıda verilmiştir.

Yay uzunlukları

$$s_T = \int_0^s \kappa ds\,, \qquad s_N = \int_0^s \|W\| ds, \qquad s_B = \int_0^s \tau ds.$$

$\mathbb{E}^3$ deki geodezik eğrilikleri

$$k_T = \frac{1}{cos\theta}, \qquad k_N = \sqrt{1 + \left(\frac{\theta'}{\|W\|}\right)^2}, \qquad k_B = \frac{1}{sin\theta}.$$

S^2 deki geodezik eğrilikleri

$$\gamma_T = tan\theta, \qquad \gamma_N = \frac{\theta'}{\|W\|}, \qquad \gamma_B = cot\theta.$$

İNVOLÜT EĞRİNİN KÜRESEL GÖSTERGELERİNİN YAY UZUNLUKLARI

Bir M_1 birim hızlı evolüt eğrisinin Frenet elemanları ile bu eğrinin involütü olan M_2 eğrisinin Frenet çatısı $\{T^*, N^*, B^*\}$ arasındaki açısal ilişkisi, $\theta = \angle(B, W)$ olmak üzere matrisel formda aşağıdaki şekilde verilir:

$$\begin{bmatrix} T^* \\ N^* \\ B^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -cos\theta & 0 & sin\theta \\ sin\theta & 0 & cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ N \\ B \end{bmatrix} \tag{3}$$

İnvolüt eğrisinin teğet, asli normal ve binormal vektörlerinin birim küre S^2 yüzeyinde çizdiği küresel gösterge eğrilerinin yay uzunlukları sırasıyla s_{T^*}, s_{N^*} ve s_{B^*} ile gösterilmektedir. İnvolüt eğrisinin s^* yay parametresine göre bu göstergelerin türevsel büyüklüklerine integrasyon uygulandığında, yay uzunlukları için şu integral ifadelerine ulaşılır:

$$s_{T^*} = \int_0^s \left\| \frac{dT^*}{ds^*} \right\| ds^* = \int_0^s \|N'\| ds = \int_0^s \sqrt{\kappa^2 + \tau^2} ds = \int_0^s \|W\| \, ds.$$

$$s_{N^*} = \int_0^s \left\| \frac{dN^*}{ds^*} \right\| ds^* = \int_0^s \|(-cos\theta T + sin\theta B)'\| ds,$$

$$s_{N^*} = \int_0^s \sqrt{\dot{\theta}^2 + \|W\|^2} \, ds.$$

$$s_{B^*} = \int_0^s \left\| \frac{dB^*}{ds^*} \right\| ds^* = \int_0^s \|(sin\theta T + cos\theta B)'\| ds,$$

$$s_{B^*} = \int_0^s \dot{\theta} ds = \theta(s) - \theta(0).$$

Bu integral hesaplamalarının bir sonucu olarak involüt-evolüt eğri çiftlerinin küresel göstergeleri arasında aşağıdaki temel sonuçlar çıkarılabilir:

Sonuç 1: İnvolüt eğrinin s_{T^*} teğet küresel göstergesinin yay uzunluğu, evolüt eğrinin s_N asli normal küresel göstergesinin yay uzunluğuna eşittir ($s_{T^*} = s_N$)

Sonuç 2: Eğer evolüt eğrisi bir helis ise, $\theta = sabit$ ve $\theta' = 0$ olacağından involüt eğrinin (N^*) asli normaller göstergesinin yay uzunluğu, evolüt eğrisinin (N) asli normaller göstergesinin yay uzunluğu ile çakışır ($s_{N^*} = s_N$).

Sonuç 3: İnvolüt eğrinin (B^*) binormal göstergesinin yay uzunluğu, Darboux vektörü doğrultusundaki $C = sin\theta T + cos\theta B$ birim vektörünün yay uzunluğu s_C değerine denktir ($s_{B^*} = s_C$).

KÜRESEL GÖSTERGELERİN $\mathbb{E}^3$ VE S^2 UZAYLARINA GÖRE JEODEZİK EĞRİLİKLERİ

Bu kısımda, involüt eğrinin küresel gösterge eğrilerinin $\mathbb{E}^3$ Öklid uzayına göre ve S^2 birim küresi üzerindeki Gauss anlamındaki jeodezik eğrilikleri sırasıyla hesaplanmıştır. Bu bölüm boyunca D, $\mathbb{E}^3$ teki kovaryant türevi; $\overline{D}$ ise S^2 üzerindeki kovaryant türevi ifade etmektedir.

(T^*) Teğetler Göstergesinin Jeodezik Eğrilikleri

İnvolüt eğrinin (T^*) teğet küresel göstergesinin birim teğet vektörü $T_{(T^*)}$ olmak üzere $\mathbb{E}^3$ uzayındaki jeodezik eğriliği:

$$k_{T^*} = \left\| D_{T_{(T^*)}} T_{(T^*)} \right\| = \sqrt{1 + \left(\frac{\theta'}{\|W\|} \right)^2}.$$

Burada evolüt eğrinin teğet gösterge eğriliği olan $k_T = \frac{1}{cos\theta}$ ifadesinden $\theta' = \frac{k_T{}'}{k_T\sqrt{k_T{}^2 - 1}}$ çekilip yerine yazılırsa, evolütün uzay eğriliği cinsinden bağıntı:

$$k_{T^*} = \sqrt{\frac{k_T{}'^2}{(k_T{}^2 - 1) k_T{}^2 \|W\|^2} + 1}.$$

olarak elde edilir. Küre yüzeyi S^2 üzerindeki jeodezik eğrilik ise:

$$\gamma_{T^*} = \left\| \overline{D}_{T_{(T^*)}} T_{(T^*)} \right\| = \frac{\theta'}{\|W\|}$$

biçimindedir. Evolütün $\gamma_T = tan\theta$ jeodezik eğriliği kullanılarak bu ifade aşağıdaki şekildeki ifade edebileceğimiz bir diferansiyel forma dönüştürülebilir:

$$\gamma_{T^*} = \frac{1}{\|W\|} \left(\frac{\gamma_T{}'}{1 + \gamma_T{}^2} \right).$$

(N^*) Asli Normaller Göstergesinin Jeodezik Eğrilikleri

(N^*) asli normaller göstergesinin $\mathbb{E}^3$ uzayına göre jeodezik eğriliği, $\sigma = \frac{\gamma_N}{k_N}$ kısaltması altında aşağıdaki gibi karmaşık bir yapı sunar:

$$k_{N^*} = \left\| D_{T_{(N^*)}} T_{(N^*)} \right\| = \frac{1}{\|W\| k_N} \sqrt{\sigma'^2 + \left(\theta'\sigma + \frac{\|W\|}{k_N} \right)^2 + \frac{k_N{}'^2}{k_N{}^4}}.$$

Sonuç 4: Eğer taban eğrisi α bir genel helis ise ($\theta = sabit$), bu durumda involüt eğrinin asli normaller göstergesinin $\mathbb{E}^3$'deki jeodezik eğriliği doğrudan sabit bir değer alır:

$$k_N = 1.$$

(N^*) göstergesinin birim küre S^2 yüzeyindeki jeodezik eğriliği ise

$$\gamma_{N^*} = \left\| \overline{D}_{T_{(N^*)}} T_{(N^*)} \right\| = \frac{1}{\|W\| k_N} \sqrt{\left[\frac{\|W\|}{k_N} - (\|W\| k_N - \theta' \sigma)\right]^2 + \sigma'^2 + \frac{{k_N}'^2}{{k_N}^4}}$$

eşitliği ile verilir. Evolütün geodezik eğriliğinin $\gamma_N = \frac{\theta'}{\|W\|}$ olduğu dikkate alındığında, yukarıdaki ifade

$$\gamma_{N^*} = \frac{1}{\|W\| k_N} \sqrt{\left[\frac{\|W\|}{k_N}\left(1 - {k_N}^2 + {\gamma_N}^2\right)\right]^2 + \sigma'^2 + \frac{{k_N}'^2}{{k_N}^4}}$$

şeklinde yazılabilir.

(B^*) Binormaller Göstergesinin Jeodezik Eğrilikleri

(B^*) binormaller göstergesinin $\mathbb{E}^3$ Öklid uzayına göre jeodezik eğrilik fonksiyonu:

$$k_{B^*} = \sqrt{1 + \left(\frac{\|W\|}{\theta'}\right)^2}.$$

formülüyle belirlenir. Taban eğrisinin binormal gösterge eğriliği olan $k_B = \frac{1}{sin\theta}$ bağıntısından hareketle, yukarıdaki eşitlik:

$$k_{B^*} = \frac{1}{{k_B}'} \sqrt{{k_B}'^2 + \|W\|^2 {k_B}^2 \left({k_B}^2 - 1\right)}$$

haline getirilir. Son olarak bu göstergenin S^2 birim küresi üzerindeki jeodezik eğriliği:

$$\gamma_{B^*} = \frac{\|W\|}{\theta'}$$

olup, evolütün küresel jeodezik eğriliği $\gamma_B = cot\theta$ cinsinden türetildiğinde:

$$\gamma_{B^*} = -\frac{\|W\|(1 + {\gamma_B}^2)}{{\gamma_B}'}$$

bağıntısı elde edilir.

Sonuç 5: İnvolüt eğrinin küresel göstergelerinin $\mathbb{E}^3$ ve S^2 uzaylarındaki jeodezik eğrilikleri arasında Pisagor teoremine benzer şekilde sabit bir bağıntı vardır:

$$k_{T^*} = \sqrt{{\gamma_{T^*}}^2 + 1}, \qquad k_{N^*} = \sqrt{{\gamma_{N^*}}^2 + 1}, \qquad k_{B^*} = \sqrt{{\gamma_{B^*}}^2 + 1}$$

SONUÇ

Bu çalışmada, 3-boyutlu Öklid uzayında $\mathbb{E}^3$'te tanımlı bir (M_2, M_1) involüt-evolüt eğri çifti ele alınarak, M_2 involüt eğrisinin Frenet elemanları vasıtasıyla oluşturulan teğetler (T^*), asli normaller (N^*) ve binormaller (B^*) küresel göstergelerinin diferansiyel-geometrik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen temel sonuçlar ve geometriye sağladığı katkılar şu şekilde özetlenebilir:

- **Yay Uzunlukları Arasındaki İlişkiler:** İnvolüt eğrisinin teğetler göstergesinin yay uzunluğunun, evolüt eğrisinin asli normaller göstergesinin yay uzunluğuna eşit olduğu $(s_{T^*} = s_N)$ gösterilmiştir. Ayrıca binormal göstergenin yay uzunluğunun ise Darboux vektörü yönüdeki birim vektörünün küresel göstergesinin yay uzunluğuna denk olduğu $(s_{B^*} = s_C)$ tespit edilmiştir.
- **Helis Eğrileri İçin Karakterizasyon:** Taban (evolüt) eğrisinin bir genel helis olması halinde ($\theta = sabit$ ve $\theta' = 0$), involüt eğrisinin asli normaller göstergesinin yay uzunluğunun evolütün asli normal gösterge yay uzunluğu ile doğrudan çakıştığı $(s_{N^*} = s_N)$ ve bu göstergenin $\mathbb{E}^3$ Öklid uzayındaki jeodezik eğriliğinin sabit olarak $k_N = 1$ değerini aldığı kanıtlanmıştır.
- **Jeodezik Eğrilik Dönüşümleri:** İnvolüt eğrinin küresel göstergelerinin hem $\mathbb{E}^3$ Öklid uzayındaki hem de S^2 birim küresi üzerindeki jeodezik eğrilikleri; taban eğrinin uzay eğriliği (κ), burulması (τ) ve Darboux büyüklüğü $(\|W\|)$ cinsinden kapalı formda türetilmiştir.
- **Pisagor Tipi İlişki:** Elde edilen en kuşatıcı ve temel netice olarak; involüt eğrinin teğetler, asli normaller ve binormaller göstergelerinin $\mathbb{E}^3$ Öklid uzayındaki jeodezik eğrilikleri ile S^2 birim küre yüzeyi üzerindeki jeodezik eğrilikleri arasında,

$$k_{T^*} = \sqrt{{\gamma_{T^*}}^2 + 1}, \qquad k_{N^*} = \sqrt{{\gamma_{N^*}}^2 + 1}, \qquad k_{B^*} = \sqrt{{\gamma_{B^*}}^2 + 1}$$

biçiminde Pisagor teoremine benzer şekilde sabit ve invariant bir bağıntının varlığı ortaya konmuştur. Elde edilen bu sonuçlar, involüt-evolüt eğri çiftlerinin küresel göstergeler üzerinden lokal ve iç geometrilerinin analiz edilmesinde ve diferansiyel geometrideki benzer eğri çifti problemlerinin incelenmesinde temel bir referans oluşturmaktadır.

REFERANSLAR

Hacısalihoğlu, H. H. (1983). *Diferensiyel geometri*. Ankara: İnönü Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Yayınları.

Bilici, M. and Çalışkan, M. (2001). On the Geodesic Curvatures of the Spherical Indicatrices of the Pair of Involute-Evolute Curves. Bulletin of Pure and Applied Sciences, Vol. 20 E (No. 2), 367-371.

Bilici, M., (2025) Diferansiyel Geometrik Yapılarda Eğrilik, Solitonlar ve Yapısal Özellikler. Editör Ş. Konca, E^3 *Öklid Uzayında İnvolüt-Evolüt Eğri Çiftlerinin Temel Özellikleri* (pp. 80-96). Ankara: BİDGE Yayınları.

Fenchel, W. (1951). On the differential geometry of closed space curves. Bulletin of the American Mathematical Society, 57(1.P1), 44-54.

Thorpe, J. A. (1979). Elementary topics in differential geometry. New York: Springer.

Fındık Zarı ve Kabuğunun Yağ Asidi Profilinin Gaz Kromatografisi ile Belirlenmesi: Fındık İşleme Yan Ürünlerinin Katma Değerli Kullanım Potansiyeli

Temine ŞABUDAK[1]

1- Prof. Dr.; Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü. tsabudak@nku.ed.tr ORCID No: 0000-0003-4384-4265

ÖZET

Fındık (*Corylus avellana* L.), besin değeri ve ekonomik önemi yüksek olan önemli sert kabuklu meyvelerden biridir. Fındığın işlenmesi sırasında ortaya çıkan fındık zarı ve sert kabuk, yüksek miktarlarda oluşmaları nedeniyle önemli agro-endüstriyel yan ürünler arasında yer almaktadır. Bu materyallerin düşük katma değerli uygulamalar yerine kimyasal bileşimleri temelinde değerlendirilmesi, sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı, fındık işleme yan ürünleri olan fındık zarı ve fındık kabuğunun yağ asidi profillerini gaz kromatografisi (GC) yöntemiyle belirlemek ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda katma değerli kullanım potansiyellerini değerlendirmektir. Fındık zarı ve fındık kabuğundan yağ fraksiyonları Soxhlet ekstraksiyonu ile hekzan kullanılarak elde edilmiş ve yağ asitleri GC yöntemiyle analiz edilmiştir. Fındık zarı yağında başlıca yağ asitleri oleik asit, linoleik asit ve palmitik asit olarak belirlenirken, fındık kabuğu yağında oleik asit, linoleik asit, palmitik asit ve stearik asit temel bileşenler olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, fındık zarı ve kabuğunun yağ asidi bileşimleri açısından karakterize edilebilir potansiyel biyokütle kaynakları olduğunu göstermektedir. Bu sonuçların, söz konusu yan ürünlerin sürdürülebilir biçimde yeniden değerlendirilmesine ve katma değerli ürünlerin geliştirilmesine yönelik ileri çalışmalar için temel oluşturabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fındık yan ürünleri, fındık zarı yağı, fındık kabuk yağı, gaz kromatografisi, yağ asidi.

GİRİŞ

Son otuz yılda gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar, bireylerin beslenme alışkanlıkları ile hastalıkların ortaya çıkışı ve sağlıklı yaşam arasındaki yakın ilişkiyi açıkça ortaya koymuştur. Çeşitli hastalıklar ile beslenme arasındaki bağlantıların incelendiği araştırmalarda, üzerinde en fazla durulan gıda bileşenlerinden biri yağlar olmuştur. Özellikle son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda, ceviz gibi sert kabuklu meyvelerde bulunan yağ asitlerinin doymuş veya doymamış özellik göstermesi, kolesterol düzeyleri ve esansiyel yağ asidi içeriği gibi unsurlar ayrıntılı biçimde araştırılmaktadır (Kayahan, 2009). İnsan beslenmesi ve sağlığı açısından önemli bir yere sahip olan fındık (*Corylus avellana* L.), dünya genelinde tüketilen başlıca sert kabuklu meyvelerden biridir (Granata ve ark., 2017). Güncel araştırmalar, fındığın günlük beslenme içerisinde insan vücuduna önemli miktarda enerji, tekli ve çoklu doymamış yağ asitleri, vitaminler ve nutrasötik bileşenler sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, sahip olduğu zengin besin profili sayesinde

fındık tüketiminin kardiyovasküler hastalıklar ve koroner kalp hastalığı riskinin azaltılmasına, tip II diyabetin yönetimine, bazı kanser türlerinin oluşumunun önlenmesine ve yaşlanmaya bağlı semptomların hafifletilmesine katkıda bulunabileceği ve dolayısıyla insan sağlığı üzerinde önemli olumlu etkiler oluşturabileceği bildirilmektedir (Phuc ve ark., 2017:247; Cittadini ve ark., 2020:833).

Dünya genelinde ağaçta yetişen sert kabuklu meyveler arasında bademden sonra en yüksek üretim miktarına sahip olan fındık (*Corylus avellana* L.), huşgiller (Betulaceae) familyasında yer alan bir bitki türüdür. Avrupa ve Küçük Asya kökenli olduğu kabul edilen fındığın başlıca üreticileri arasında Türkiye, İtalya, Amerika Birleşik Devletleri ve Azerbaycan bulunmaktadır. Türkiye'nin yıllık yaklaşık 550.000 tonluk üretim miktarıyla dünya fındık üretiminde önde gelen ülkelerden biri olduğu bildirilmektedir. Fındık meyvesi, kabuğundan ayrıldıktan sonra doğrudan çiğ olarak tüketilebildiği gibi; çikolata ve unlu mamuller endüstrisi başta olmak üzere atıştırmalık, şekerleme, dondurma ve yağ sektörlerinde de yaygın biçimde değerlendirilmektedir (Ozdemir ve Akıncı, 2004:341; Mexis ve Kontominas, 2009:407; Şahin ve ark., 2019:27; Scarpari ve ark., 2020:317; Zhao ve ark., 2023:135576; Hojjati ve ark., 2023:111469). Fındık, özellikle insan sağlığı açısından yararlı besin öğelerini içermesi nedeniyle önemli ve değerli bir gıda kaynağı olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, fındık çeşitlerinin besin bileşimini ve dolayısıyla besleyici değerini etkileyebilen çok sayıda faktörün bulunduğu belirtilmektedir. Fındık ve fındıktan elde edilen ürünler, insan beslenmesinde önemli bir yere sahip bitkisel kaynaklı gıdalar arasında bulunmasının yanı sıra (Köksal ve ark., 2006:509; Spataro ve ark., 2024:109743), protein, esansiyel yağ asitleri, vitaminler ve mineraller açısından da zengin bir besin kaynağı olarak değerlendirilmektedir.

Fındık üretiminin artmasına paralel olarak, hasat ve endüstriyel işleme aşamalarında önemli miktarlarda agro-endüstriyel yan ürün ortaya çıkmaktadır. Fındığın işlenmesi sırasında elde edilen başlıca yan ürünler arasında sert kabuk, kahverengi zar ve yeşil dış kabuk bulunmaktadır. Fındık çekirdeğinin toplam meyve ağırlığının %50'sinden daha azını oluşturması nedeniyle, özellikle sert kabuk ve diğer dış kısımlar önemli miktarda biyokütle meydana getirmektedir. Bu yan ürünlerin büyük miktarlarda oluşması, uygun şekilde değerlendirilmedikleri takdirde atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir sorun oluşturabilmektedir (Zhao vd., 2023:135576).

Fındık işleme yan ürünleri, uzun yıllar boyunca çoğunlukla düşük katma değerli uygulamalarda değerlendirilmiş veya doğrudan atık olarak kabul edilmiştir. Özellikle fındık kabuğunun yakıt, malç veya kompost gibi sınırlı kullanım alanlarında değerlendirildiği; fındık zarının ise işleme sürecinde ortaya çıkan ve yeterince değerlendirilemeyen bir yan ürün olduğu bildirilmektedir. Bununla birlikte, son yıllarda yapılan araştırmalar, fındık zarı ve kabuğunun yalnızca atık materyaller olarak değil, çeşitli biyolojik ve

kimyasal bileşenleri içeren potansiyel hammadde kaynakları olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur. Fındık zarı; fenolik bileşikler, diyet lifi, vitamin E ve diğer biyoaktif bileşenler bakımından zengin bir yan ürün olarak öne çıkarken, fındık kabuğu ise lignoselülozik yapısı ve farklı kimyasal bileşenleri nedeniyle biyoyakıt, biyomalzeme, fonksiyonel bileşen ve diğer katma değerli ürünlerin geliştirilmesinde potansiyel bir hammadde olarak değerlendirilmektedir(Zhao vd., 2023:135576).

Bu bağlamda, tarımsal ve gıda endüstrisi yan ürünlerinin yeniden değerlendirilmesi, atık miktarının azaltılmasının yanı sıra doğal kaynakların daha verimli kullanılmasına ve sürdürülebilir üretim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle döngüsel ekonomi yaklaşımı, atık olarak değerlendirilen biyokütlenin yeniden sisteme kazandırılarak yüksek katma değerli ürünlerin üretiminde hammadde olarak kullanılmasını teşvik etmektedir. Fındık zarı ve kabuğunun bu yaklaşım doğrultusunda değerlendirilmesi, mevcut düşük değerli kullanım alanlarının ötesine geçilerek gıda, nutrasötik, farmasötik, kozmetik, biyomalzeme ve diğer endüstriyel uygulamalar için yeni kaynakların geliştirilmesine olanak sağlayabilir. Bu nedenle, fındık işleme yan ürünlerinin kimyasal bileşimlerinin ayrıntılı olarak karakterize edilmesi, potansiyel kullanım alanlarının belirlenmesi ve bu materyallerin katma değerli ürünlere dönüştürülmesi sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi açısından önem taşımaktadır (Alasalvar vd., 2025:142222).

Bu kapsamda, fındık zarı (kahverengi zar) ve sert kabuğunun kimyasal bileşiminin karakterizasyonu, bu yan ürünlerin potansiyel kullanım alanlarının belirlenmesi açısından önemli bir ilk adımdır. Özellikle yağ asidi kompozisyonunun ortaya konulması, bu materyallerin lipit bileşenleri açısından değerlendirilmesine ve olası katma değerli kullanım alanlarının belirlenmesine katkı sağlayabilir. Bu nedenle, mevcut çalışmada fındık işleme endüstrisinin önemli yan ürünleri olan fındık zarı ve fındık kabuğunun yağ asidi profilleri gaz kromatografisi (GC) kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen bulgular doğrultusunda bu yan ürünlerin potansiyel değerlendirme olanakları ele alınmıştır.

MATERYAL VE METOD

Kullanılan Cihazlar

Rotary Evaporatör: Ekstraksiyondan sonra çözücüyü uçurmak için Buchi marka; B-491 su banyosu, R-210 rotavapor, V-700 vakum pompası ve V-855 vakum kontrol paneline sahip cihaz kullanılmıştır

Gaz Kromotografisi cihazı: Bitkisel yağlarda ki yağ asitlerini tayin etmek için Trakya Birlik yağ fabrikasında Agilent 6890 markasına ait GC cihazı kullanılmıştır.

Grundig CM 7460 Değirmen:Fındık zarının ve fındık kabuğunun öğütülerek toz haline getirilmesinde kullanılmıştır.
Sepet Isıtıcı: Wisd marka MSH-20D model ısıtıcı kullanılmıştır.
Elektronik Terazi: Sabunların analizi sırasında Daıhan markasına ait SC3 model elektronik terazi kullanılmıştır.

Kimyasal Maddeler

Hekzan (Atabay): Fındık zarının ve fındık kabuğunun ekstraksiyonu için kullanılmıştır.

Fındık (*Corylus avellana* L.) Zarı ve Fındık Kabuğunun Ekstraksiyonu

Çalışmada kullanılcak olan, fındık meveleri Giresun'dan toplanmış ve kabuğu kırılarak, fındık zarı ve fındık sert kabuğu olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Ayrılan kısımların her biri, değirmende öğütülerek, ince toz haline getirilmiştir.
Fındık zar ve fındık kabuğundaki yağın ekstraksiyonu için, Soxhlet ekstraksiyon metodu kullanılmıştır. Fındık kabuk ve fındık zar kısımlarının her biri, 12 saat süreyle hekzan ile ekstrakte edilmiştir. Ekstraksiyon sonucunda, rotary evoparator kullanılarak, çözeltiden hekzan uzaklaştırılmıştır. Ardından, Fındık kabuk ve fındık zar kısımlarının yüzde yağ verimi hesaplanmıştır (Sabudak ve Ozcan, 2025:166).

Fındık Zarı ve Fındık Kabuğundaki Yağ Asitlerinin Gaz Kromatografisi Yöntemiyle Tayini

Bu işlem için, Tekirdağ'da bulunan Trakya Birlik Entegre Tesislerindeki Gaz Kromotografisi cihazı kullanılarak, Fındık kabuk ve fındık zar kısımlarının yağ aside kompozisyonu belirlenmiştir (Şekil 1, Şekil 2).

Şekil 1. Fındık zarı ve fındık kabuğundaki yağların yağ asidi analizinde kullanılan GC cihazı

Şekil 2. GC cihazının enjeksiyon bölümü

Fındık kabuğunun ve fındık zarının yağı, GC cihazına konmadan önce, yağ asidi metil esterleri türevine dönüştürülmüştür. Bu amaçla, bitkisel yağlardan 2-3 damla alınarak, üzerine 5 ml hekzan konularak, yağın çözünmesi sağlanmıştır. Üzerine 1 ml 2 N metanollü KOH çözeltisi ilave edilerek, bu karışım santrüfüjlenmiş ve metil esterlerinin üst faza geçmesi sağlanmıştır. Üst fazdan yaklaşık 1 ml alınıp GC cihazına konularak analiz gerçekleştirilmiştir (Sabudak ve Ozcan, 2025:166). Yağ asidi kompozisyonunun tayininde, GC cihazında kullanılan deneysel parametreler Tabo1 de gösterilmiştir.

Tablo 1. Fındık zarı ve fındık kabuğundaki yağların, yağ asidi kompozisyonunu belirlemede kullanılacak, GC cihazının deneysel parametreleri

Marka/Model	**Agilent 6890**
Kolon	HP-88, 100m/0,25mm- Kapiler Kolon
Dedektör	FID
Taşıyıcı Gaz	Helyum
Taşıyıcı Gaz Akış Hızı	30 ml/min
Enjeksiyon Sıcaklığı	250 ˚C
Dedektör Sıcaklığı	280 ˚C
Enjeksiyon Hacmi	1 mikrolitre
Giriş Basıncı	54,6 psi
Toplam Analiz Süresi	37,5 dk
Split	50:1
Kolon Dolgu Maddesi	(% 88 siyonopropil) Aril Polisiloksan
Kolon Sıcaklık Programı	120 ˚C de 11 dk
	1dk da 10˚C artarak 175˚C de 10 dk sabit
	1dk da 5 ˚C artarak 210˚C de 5 dk sabit
	1dk da 5˚C artarak 230˚C de 5 dk sabit

SONUÇLAR VE TATIŞMA

Fındık (*Corylus avellana* L.) Zarı ve Fındık Kabuğunun Ekstraksiyon Sonuçları

Fındık kabuğu ve fındık zarı kısımlarının soxhlet ekstraksiyon metoduyla ekstrakte edilmiş ve aşağıdaki yağ verimleri elde edilmişitir (Şekil 3 ve Şekil 4).
Fındık kabuğu yağının ekstraksiyon verimi: % 0.57
Fındık zarı yağının ekstraksiyon verimi: % 26.06
Bu sonuçlara bakıldığında, fındık işleme sektöründe, bir atık olarak ortaya çıkan fındık zarının, katma değerli ürünlerin geliştirilmesine yönelik bir potansiyel olabileceğini düşündürmüştür. Fındık zarı yağı, gıda, nutrasötik, farmasötik, kozmetik, biyomalzeme ve diğer endüstriyel uygulamalar için yeni kaynakların geliştirilmesine olanak sağlayabilir.

Şekil 3. Fındık kabuk hekzan ekstresi

Şekil 4: Fındık zar hekzan ekstresi

Fındık Zarı ve Fındık Kabuğundaki Yağ Asitlerinin Gaz Kromatografisi Yöntemiyle Tayin Sonuçları

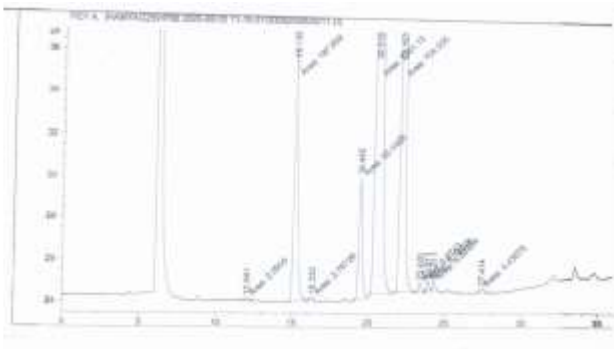
Fındık Zarı Yağ Asitlerinin Gaz Kromatografisi Yöntemiyle Tayin Sonuçları

Fındık zarı yağının GC analizi sonucunda toplam 10 adet yağ asidi tayin edilmiştir. Bu yağ asitlerinden 5 tanesi doymamış, 5 tanesi doymuş yağ asididir (Tablo 2).

Tablo 2. Fındık zarı yağında bulunan yağ asitleri

No	Bileşik adı	Miktar (%)
1	Miristik Asit(C14:0)	0.047
2	Palmitik Asit (C16:0)	5.886
3	Palmitoleik Asit (C16:1)	0.088
4	Stearik Asit(C18:0)	2.653
5	Oleik Asit (C18:1)	70.008
6	Linoleik Asit(C18:2)	20.655
7	Araşidik Asit(C20:0)	0.162
8	Linolenik Asit(C18:3)	0.166
9	Ekosenoik Asit(C20:1)	0.225
10	Behenik Asit(C22:0)	0.105

Tablo 2'e göre, tayin edilen yağ asitlerinden, en fazla bulunan bileşikler; oleik asit (%70.008), linoleik asit (%20.655) ve palmitik asit (%5.886)'dir. Fındık zarı yağı, doymamış yağ asitleri olan, linoleik asit, oleik asit ve doymuş yağ asidi olan palmitik asit bakımından zengin bulunmuştur. Bu asitler için, fındık zarı yağının potansiyel bir kaynak olabileceği düşünülmektedir. Şekil 5 te Fındık zarı yağına ait GC kromatogramı verilmiştir.



Şekil 5. Fındık zarı yağının GC kromatogramı

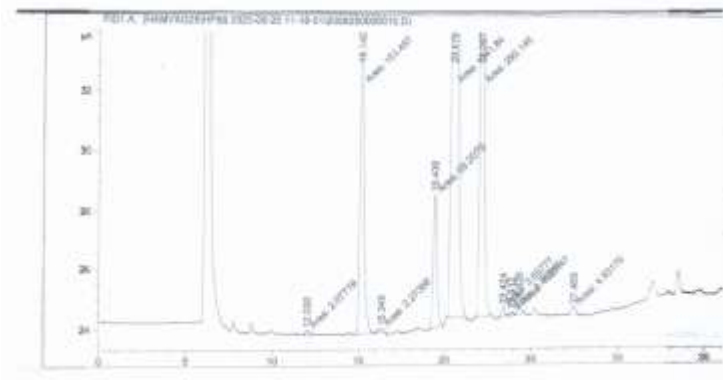
Fındık Kabuğundaki Yağ Asitlerinin Gaz Kromatografisi Yöntemiyle Tayin Sonuçları

Fındık kabuk yağının GC analizi sonucunda toplam 10 adet yağ asidi tayin edilmiştir. Bu yağ asitlerinden 5 tanesi doymamış, 5 tanesi doymuş yağ asididir (Tablo 3).

Tablo 3. Fındık kabuk yağında bulunan yağ asitleri

No	Bileşik adı	Miktar (%)
1	Miristik Asit(C14:0)	0.138
2	Palmitik Asit (C16:0)	9.086
3	Palmitoleik Asit (C16:1)	0.229
4	Stearik Asit(C18:0)	4.114
5	Oleik Asit (C18:1)	68.074
6	Linoleik Asit(C18:2)	17.452
7	Araşidik Asit(C20:0)	0.205
8	Linolenik Asit(C18:3)	0.083
9	Ekosenoik Asit(C20:1)	0.247
10	Behenik Asit(C22:0)	0.367

Tablo 3'e göre, tayin edilen yağ asitlerinden en fazla bulunan bileşikler; oleik asit (%68.074), linoleik asit (%17.452), palmitik asit (%9.086) ve stearik asittir (%4.114). Fındık kabuk yağı, doymamış yağ asitleri olan, linoleik asit, oleik asit ve doymuş yağ asidi olan palmitik asit bakımından zengin bulunmuştur. Şekil 6' da fındık kabuk yağına ait GC kromatogramı verilmiştir.



Şekil 6. Fındık kabuk yağının GC kromatogramı

TARTIŞMA

Bu çalışmada, fındık işleme sürecinde ortaya çıkan ve yeterince değerlendirilemeyen yan ürünler arasında yer alan fındık zarı ve fındık kabuğunun yağ asidi kompozisyonları GC yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Her iki materyalden elde edilen yağ fraksiyonlarında toplam 10 farklı yağ asidi tanımlanmış ve bunların doymuş ve doymamış yağ asitlerinden oluştuğu belirlenmiştir. Fındık zarı yağında başlıca yağ asitlerinin oleik asit, linoleik asit ve palmitik asit olduğu; fındık kabuğu yağında ise oleik asit, linoleik asit, palmitik asit ve stearik asidin baskın yağ asitleri olduğu belirlenmiştir. Her iki yan ürünün yağ asidi profili değerlendirildiğinde, oleik ve linoleik asitlerin yüksek oranlarda bulunması dikkat çekmektedir. Ekstraksiyon verimleridüşünülerek değerlendirildiğinde, fındık zarı, tespit edilen yağ asitleri açısından potansiyel bir kaynak olabilir. Bu sonuçlar, fındık işleme yan ürünlerinin yalnızca bertaraf edilmesi gereken atık materyaller olarak değil, kimyasal bileşimleri açısından değerlendirilebilecek potansiyel biyokütle kaynakları olarak ele alınabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma fındık işleme yan ürünü olan, özellikle, fındık zarı yağ asidi profiline ilişkin veriler, bu materyalin döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir biyokütle değerlendirme yaklaşımı çerçevesinde yeniden ele alınmasına katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, fındık işleme yan ürünlerinin düşük katma değerli veya atık olarak değerlendirilmesi yerine, kimyasal bileşimleri temelinde daha ileri araştırmalarla katma değerli ürünlerin geliştirilmesinde kullanılabilecek potansiyel bir hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

Alasalvar, C., Huang, G., Bolling, B. W., Jantip, P.A., Pegg, R. B., Wong,

X. K., Chang, S. K., Pelvan, E., ve Camargo, A. C., Mandalari, G., Hossain, A.,ve Shahidi, F. (2025). Upcycling commercial nut byproducts for food, nutraceutical, and pharmaceutical applications: A comprehensive review. Food Chemistry, 142222, 467.

Cittadini, M.C., Martin, D., Gallo, S., Fuente, G., Bodoira, R., Martinez, M.,ve Maestri, D. (2020). Evaluation of hazelnut and walnut oil chemical traits from conventional cultivars and native genetic resources in a non-traditional crop environment from Argentina. European Food Research and Technology, 246, 833-843.

Granata, M. U., Bracco, F., Gratani, L., Catoni, R., Forana, F., Mannucci, B.,Sartori, F., ve Martino, E. (2017). Fatty acid content profile and main constituents of Corylus avellana kernel in wild type and cultivars growing in Italy. Naturla Product research, 31(2), 204-209.

Hojjati, M., Shahbazi, S., Askari, H., Nafchi, A. M., ve Makari, M. (2023). Impact of the gamma and electron beam irradiations on yeast-spot disease fungal agent and physicochemical attributes of hazelnut (*Corylus avellana* L.). Radiation Physics and Chemistry, 111469).

Kayahan, M. (2009). Sağlıklı beslenme açısından trans yağ asitleri. II. Geleneksel Gıdalar Sempozyumu, 27-29, Van.

Köksal, A. İ., Artik, N., Şimşek, A., ve Güneş, N. (2006). Nutrient composition of hazelnut (*Corylus avellana* L.) varieties cultivated in Turkey. Food Chemistry, *99*(3), 509-51. .

Mexis, S. F., ve Kontominas, M. G. (2009). Effect of γ-irradiation on the physicochemical and sensory properties of hazelnuts (*Corylus avellana* L.). Radiation Physics and Chemistry, *78*(6), 407-413.

Ozdemir, F., ve Akinci, I. (2004). Physical and nutritional properties of four major commercial Turkish hazelnut varieties. Journal of Food Engineering, 63(3), 341-347

Phuc, D., ve Popovich, D. (2017). Screening for paclitaxel and other taxanes in kernel and shell of *Corylus avellana* (Hazelnut). Journal of Pharmacognosy Phytochem, 6, 247-254.

Sabudak, T. ve Ozcan, E. (2025). Determination of Fatty Acids in Plant Oils by Gas Chromatography, Production and Analysis of Solid Soap from These Olis. Bulgarian Chemical Communications, 57(3), 166-169.

Scarpari, M., Vitale, S., Di Giambattista, G., Luongo, L., De Gregorio, T., Schreiber, G., ve Voglmayr, H. (2020). Didymella corylicola sp. nov., a new fungus associated with hazelnut fruit development in Italy. Mycological Progress, 19, 317-328.

Spataro, F., Rosso, F., Genova, G., ve Caligiani, A. (2023). Untargeted UHPLC-HRMS as a new tool for the detection of rotten defect markers in hazelnuts of different origins. Microchemical Journal, 109743.

Şahin, S., Kılıç, Ö., Şengül, S., ve Perçin, S. (2019). Farklı illerden temin edilen fındık zarının bileşimi ve antioksidan etkinliğinin araştırılması. Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(1), 27-35.

Zhao, J., Wang, X., Lin, H., ve Lin, Z. (2023). Hazelnut and its by-products: a comprehensive review of nutrition, phytochemical profile, extraction, bioactivities and applications. Food Chemistry, 135576.