

# Kuantum Tavlamayı Keşfetmek: Kuantum Hesaplamaya Giden Yol

## *Exploring Quantum Annealing: A Pathway to Quantum Computing*

Hüseyin Türker 

Bilişim Uzmanı, QTURKEY Eğitmen, e-mail: [huseyinturker@gmail.com](mailto:huseyinturker@gmail.com)

### Öz

Tüm dünyada Kuantum'un 2.devrime ile Kuantum hesaplama alanında bir yarış başlamıştır. Günümüz teknolojisi ile kuantum mekaniğini temel alan kuantum bilgisayarları, bebek adımları ile gelişmeye başlamış, büyüyen dev adımlarla da gelişme sürecini sürdürmektedir. Saf kuantum bilgisayarları gelişirken, klasik bilgisayarların uzun işlem sürelerinde çözdüğü problemleri, Kuantum Tavlamanın istatistiksel verilerini kullanarak daha hızlı hesaplama yapabilen "Hibrit" bilgisayarlar hemen çözmeye hazırdır. Kuantum tavlama, geliştirilen yöntemlerle, (Ising Model, Binary Quadratic Model, Quadratic unconstrained Binary Optimizasyon) yoğun bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Bu amaçla, D-Wave, IBM, Rigetti, Qilimanjaro gibi firmalar bu alanda yoğunlaşmışlardır. Bu firmaların çözümleri (D-Wave'in Dimod, Networkx vb.) gelişmeye katkı vermektedirler.

Atatürk'ün emaneti olan Türkiye Cumhuriyeti'nin 100'üncü yılında, Türkiye'de, kuantum hesaplama ve kuantum tavlamaya dönük farkındalık yaratmak için bu makaleyi yazma ihtiyacı doğmuştur. Quantum alanında yürütülen araştırmaların yakın gelecekteki amacının çözüm bekleyen endüstriyel uygulamalar için kuantum tavlama temeline hazırlanacak yazılımların geliştirilmesi yönünde olacağı düşünülmektedir.

Bu makalede ele alınan hususlar, literatürde yaygın olarak referans yapılan kaynaklardan derlenmiştir.

Kuantum hesaplama ve Kuantum tavlamanın, yapısı, nasıl çalıştığı, hangi çözüm platformlarının olduğu, avantajları ve kısıtları okuyucuya aktarılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** İkinci Dereceden Kısıtlanmamış İkili Optimizasyon (QUBO), Kuantum Hesaplama, Kombinatoriyal Optimizasyon, Kuantum Tavlama, Ising Modeli.

**Citation/Atf:** TÜRKER, H. (2023). Kuantum Tavlamayı Keşfetmek: Kuantum Hesaplamaya Giden Yol. *Kuantum Teknolojileri ve Enformatik Araştırmaları*. 1(1): 45-54, DOI: 10.70447/ktve.2242

**Corresponding Author/ Sorumlu Yazar:**

Hüseyin Türker

E-mail: [huseyinturker@gmail.com](mailto:huseyinturker@gmail.com)



Bu çalışma, Creative Commons Atif 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

## Abstract

With the second revolution of Quantum, a race has begun in the field of Quantum computing all over the world. With today's technology, quantum computers based on quantum mechanics have started to develop with baby steps and continue to develop with giant steps. While pure quantum computers are developing, "Hybrid" computers that can perform faster calculations using the statistical data of Quantum Annealing are ready to immediately solve the problems that classical computers solve in long processing times.

Quantum annealing has begun to be used intensively with the developed methods (Ising Model, Binary Quadratic Model, Quadratic unconstrained Binary Optimization). For this purpose, companies such as D-Wave, IBM, Rigetti, Qilimanjaro have concentrated in this field. The solutions of these companies (D-Wave's Dimod, Networkx, etc.) contribute to development.

On the 100th anniversary of the Republic of Turkey, which was entrusted to us by Atatürk, the need to write this article arose to raise awareness about quantum computing and quantum annealing in Turkey.

It is thought that the aim of research in the field of quantum in the near future will be to develop software based on quantum annealing for industrial applications that require solutions. The issues discussed in this article have been compiled from sources widely referenced in the literature. Quantum computing and Quantum annealing, their structure, how they work, which solution platforms there are, their advantages and limitations are explained to the reader.

**Keywords:** Second Order Unconstrained Binary Optimization (QUBO), Quantum Computing, Combinatorial Optimization, Quantum Annealing, Ising Model

## 1. GİRİŞ

Karmaşıklık teorisi içerisinden süzülerek ortaya çıkan argümanlar, kuantum bilgisayarlarının belirli problemleri ele alırken klasik hesaplama yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde hızlanma potansiyeli barındırdığına işaret etmektedir. Ne var ki, bu durumun P ve NP problemlerinin doğası kadar belirsizliğini koruduğu ve alanında uzman kişiler arasında bile nihai sonuca dair bir konsensüs oluşmadığı gözlemlenmektedir. Aynı zamanda, dünya genelindeki fizik laboratuvarlarında yürütülen çapı büyük kuantum bilgisayar üretim girişimleri, bu alanda karşılaşılan ciddi engellerin altını çizmektedir.

Çoğu zaman, kuantum hesaplamanın pratik başarıları için gerekli olan teorik çerçeve, kapı modeli kullanılarak evrensel hesaplama ulaşmayı hedefleyen yaklaşımlar tarafından şekillendirilmekte; fakat bu, sıradışı platformlar için her zaman geçerli olmayabilir. D-Wave tarafından geliştirilen çipler, daha geniş çapta bilinen kuantum kapı modelinin bir alternatifi olan adyabatik kuantum hesaplama (AQC) modeline dayanarak tasarlanmıştır. Bu çipler, tam anla-

myla merkezi işlem birimleri (CPU) olarak işlev görmemekte, ancak Kuantum Tavlama (QA) olarak bilinen, NP-Zor optimizasyon problemlerini çözmeye amaçlı güden bir teknik kullanarak "akıllı bellek hızlandırıcıları"na benzemektedir.

Bu çipler, 20 mili Kelvin gibi mutlak sıfıra yakın derecelere kadar aşırı soğutulduğunda, hesaplamalar sırasında kuantum özelliklerini etkin bir şekilde kullanabilmektedir. AQC çerçevesinde gerçekleştirilen hesaplamaların teorik temelleri, bilim insanları tarafından öne sürüldüğünden bu yana sürekli olarak gelişme göstermiştir. İlk başlarda klasik platformlarda kullanılması planlanan QA paradigması üzerine yapılan araştırmalar da büyük bir ivme kazanmıştır. 2007 yılından itibaren, araştırmacılar, belirli amaçlar için geliştirilmiş platformlarda bu problem çözme yöntemlerini detaylı olarak inceleme fırsatı bulmuşlardır [8].

Bu sistemlere dair başarılı modeller üzerine gerçekleştirilen kapsamlı deneysel çalışmalar literatüre kazandırılmış ve sistemlerin genel özellikleri hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir. Yine de bu yeni hesaplama yaklaşımının potansiyel gücüne dair sorular mevcudiyetini korumakta-

dır. Büyüklükleri genişleyen yeni modeller, genellikle önceki versiyonlara kıyasla daha hızlı performans gösterir ve daha düşük hata oranlarına sahiptir, bu da her bir çip üzerinde yürütülen deneysel çalışmaların ömrünün göreceli olarak kısa olmasına neden olmaktadır.

Gelişmelerin kronolojisi göz önünde bulundurulduğunda, D-Wave'in çip boyutları, 2007'de duyurulan 16 kübitlik prototipten başlayarak sürekli bir artış göstermiş ve günümüzde 5000'den fazla kübit kapasitesine sahip, kübitler, bağlantılar ve tutarlılık açısından sürekli gelişim gösteren birinci sınıf tavlama kuantum işlemcilerine ulaşmıştır. D-Wave Systems tarafından geliştirilen Leap platformu, kuantum-klasik hibrit çözücüsü aracılığıyla, 1 milyona kadar değişken ve 100.000 kısıtlamayı içeren gerçek dünya uygulamalarını desteklemek üzere tasarlanmıştır [6].

Üretim, finansal hizmetler ve yaşam bilimleri gibi çeşitli sektörlerdeki sayısız uygulama, günümüzde D-Wave kuantum sistemlerini aktif olarak kullanmaktadır. Ancak, alan sınırlamaları, bu kavramların temel ilkelerden itibaren eksiksiz bir şekilde geliştirilmesine engel olmaktadır. Bu nedenle, bu makale, alanda hızla büyüyen literatürün kapsamlı bir incelemesini sunmaktan ziyade, temel kavramları tanıtmayı, önemli araştırma konularını özetlemeyi ve daha derinlemesine araştırmalar için referanslar sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu tartışma, bilgisayar bilimleri alanında lisansüstü düzeyde eğitim almış ve karmaşıklık teorisi, algoritmalar, bilgisayar mimarisi, eşzamanlı sistemler, kombinatoriyal optimizasyon ve deneysel algoritmalar gibi çeşitli disiplinlerde bilgi sahibi olan okuyucuları hedeflemektedir. Ayrıca, doğrusal cebir ve temel fizik kavramlarına dair temel bir malumatın da okuyucu tarafından sağlanmış olması beklenmektedir [1].

### 1.1. Kuantum Tavlama: Genel Bakış

#### *Teorik arka plan*

Kuantum tavlama, temelde adyabatik teorem tarafından yönlendirilen karmaşık bir kuantum hesaplama yöntemidir[2]. Bu teorem, belirli koşullar altında, bir kuantum sisteminin temel durumunun korunacağı ilkesini varsayar. Özellikle,

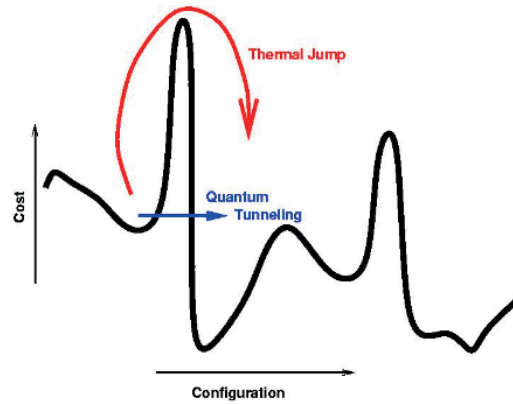
eğer bir sistemdeki Hamiltonyen yeterince yavaş değişirse, sistem büyük olasılıkla başlangıçtaki temel durumuna sadık kalacaktır. Bu kavram, kuantum tavlama sürecinin temelini oluşturur ve kritik dinamikleri anlamada merkezi bir rol oynar[9].

#### *Teorik Çerçeve*

Adyabatik teorem, kuantum tavlama yaklaşımının merkezinde yer alır. Bu teorem, sistemdeki temel durum ile ilk uyarılmış durum arasındaki enerji farkının veya "minimum boşluğun" dinamikleri üzerinden, Hamiltonyenin evriminin hızını belirleyici bir faktör olarak tanımlar. Sistemin temel durumunun korunması, Hamiltonyenin evriminin bu enerji boşluğuna bağlı olarak ne kadar yavaş gerçekleştiğine bağlıdır [14].

Bu durum, kuantum sisteminin, geçiş süreci boyunca diğer potansiyel enerji durumlarına geçiş yapmadan temel durumda kalabilmesi için kritiktir. Adyabatik teorem, bu süreçte, Hamiltonyenin kontrollü bir şekilde manipüle edilmesi gerektiğini belirtir, böylece sistem, temel durumdaki tutarlılığını korurken, enerji düzeylerindeki değişikliklere yeterince yavaş bir şekilde yanıt verebilir.

Özetle, kuantum tavlama yöntemleri, sistemlerin kuantum durumlarının evrimleşmesini ve bu evrim sürecinde enerji yapılarının nasıl değiştiğini inceleyerek, enerji minimumlarına veya diğer istatistiksel özelliklere dayalı en uygun çözümleri arar.



Şekil 1. Kuantum Tavlamanın teorik görseli

## 2. Kuantum Tavlama'yı Anlamak

### *Klasik Hesaplama'da Tavlama*

Optimizasyon algoritmaları, karar verme ve problemlerin çözümlenmesi bağlamında kritik öneme sahiptir. Özellikle, benzetilmiş tavlama (SA) algoritması, çözüm arayışında olasılık içeren bir yaklaşım benimseyerek klasik hesaplama alanında kendine sağlam bir yer edinmiştir. Bu algoritma, metalurji alanında uygulanan fiziksel tavlama sürecinden esinlenerek, küresel bir optimuma ulaşmak için rastgele arama tekniklerini kullanır.

Benzetilmiş Tavlamanın Algoritmik Yapılandırması:

Benzetilmiş tavlama, enerji minimizasyonuna dayanan bir süreçtir ve bu yaklaşım, metalik materyallerin ısı işlemlerini taklit eder; madde önce yüksek sıcaklıklara çıkarılır, ardından kontrollü bir şekilde soğutulur. Algoritmik çerçevede, bu süreç bir dizi adımda gerçekleştirilir:

- **Başlatma Aşaması:** Algoritma, potansiyel bir başlangıç noktasından, genellikle bir rastgelelik unsuru taşıyan bir çözümle başlar.
- **Maliyet Fonksiyonunun Tanımlanması:** Algoritmanın temel hedefi, genellikle minimize edilmesi gereken bir maliyet fonksiyonudur. Bu fonksiyon, problem bağlamında en uygun çözümü yansıtır.
- **Sıcaklık Düzenlemesi:** Algoritma, arama sürecinde 'sıcaklık' adı verilen bir katsayıyı kullanır. Bu, çözüm uzayındaki rastgele gezinmeyi kontrol eder; yüksek sıcaklıklar geniş bir arama alanına izin verirken, düşük sıcaklıklar aramayı saflaştırır ve yerel aramaya odaklanır.
- **Geçiş Olasılığının Hesaplanması:** Yeni bir çözüm, mevcut çözüme kıyasla değerlendirilir ve kabulü veya reddi, belirli bir geçiş olasılığına göre gerçekleşir. Bu olasılık, mevcut sıcaklığa ve maliyet fonksiyonundaki değişikliklere bağlıdır.
- **Çözüm Değerlendirmesi:** Algoritma, olası yeni çözümleri, belirlenen olasılıklara dayalı olarak kabul eder veya reddeder. Bu süreç, yerel en uygun değerlerden kaçınmayı ve çözüm uzayının daha geniş bir kısmını keşfetmeyi amaçlar.
- **Soğutma Stratejisi:** Sıcaklık, belirlenmiş bir program doğrultusunda kademeli olarak düşü-

rülür, bu da rastgele arama olasılıklarını zamanla azaltır.

- **Algoritmanın Sonlandırılması:** Belirlenmiş bir durdurma kriterine ulaşıldığında, genellikle belirli bir yineleme sayısının tamamlanması veya çözümde belirgin bir iyileşme olmaması durumunda, algoritma sonlandırılır.

### **Uygulama Alanları ve Algoritmanın Önemi:**

Tavlama benzetimi, karmaşık optimizasyon problemlerine yaklaşık çözümler bulmak için makine öğrenimi, yöneylem araştırması, yapay zekâ ve birleştirilmiş optimizasyon gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Evrensel optimumu bulmanın zor olduğu dışbükey (convex) olmayan, yüksek boyutlu veya yeterince anlaşılmamış maliyet fonksiyonlarıyla uğraşırken özellikle faydalıdır [3][4].

## 3. Kuantum Tavlama Nasıl Çalışır

### *Kuantum Tavlama Algoritması*

Kuantum Tavlama, optimizasyon problemlerinin çözümlenmesine yönelik karmaşık bir yaklaşım sunar ve temelinde, kuantum mekaniklerinin duyarlarla benzersiz bilinenlerini -özellikle süperpozisyon ve tünelleme- kullanır [17]. Bu yöntem, olası çözüm alanlarını etkili bir şekilde tarayarak ve enerji seviyelerindeki en düşük noktaları belirleyerek, en uygun çözümlere ulaşmayı amaçlar.

1. **Başlangıç Hamiltonyen'inin İnşası:** Algoritmanın ilk aşaması, sistemin başlangıç durumunu temsil eden ve kolayca tanımlanabilir bir zemin durumuna sahip bir başlangıç Hamiltonyeni oluşturmaktır. Bu, sistemin tüm olası durumlarının kuantum süperpozisyonunu kapsar.
2. **Hedef Hamiltonyen'in Tanımlanması:** Optimizasyon-sorununun çözümü, enerji seviyelerini kodlayan ve sorunun kalite fonksiyonunu temsil eden belirli bir 'hedef' Hamiltonyeni ile karakterize edilir. Bu görünümdeki en düşük enerji seviyesi, istenen en uygun çözüme işaret eder.
3. **Adyabatik Evrim:** Sistemin evrimi, başlangıç Hamiltonyeni'nden hedef Hamiltonyen'e doğru önceden belirlenmiş bir zamanlama protokolüne uygun olarak kontrollü bir şekilde gerçekleştirilir. Adyabatik teorem, değişimin yeterince yavaş

olduğunda sistemin büyük olasılıkla temel durumunda kalacağını ve böylece hedef Hamiltonyeninin temel durumuna geçeceğini belirtir.

4. Tünelleme ve Süperpozisyon Kullanımı: Kuantum tavlama süreci, kubitlerin enerji engellerini tünelleme yoluyla geçebilmesine ve süperpozisyon vasıtasıyla birden çok olası çözüm durumunu eş zamanlı olarak keşfetmesine olanak tanır. Bu, algoritmanın enerji seviyeleri üzerinde daha geniş bir arama yapmasını ve yerel minimumlarda sıkışıp kalmamasını sağlar.

5. Ölçüm ve Sonuçların Elde Edilmesi: Adyabatik evrim sürecinin tamamlanmasının ardından, sistemin ölçülmesi yoluyla nihai çözüm elde edilir. Kuantum sisteminin bu ölçümü, hedef Hamiltonyeninin zemin durumunu açığa çıkarır, bu da aranan optimizasyon problemi için çözümlü temsil eder.

Kuantum Tavlama Algoritması'nın etkili uygulanması, yüksek tutarlılık sürelerine sahip kubitler ve gelişmiş hata düzeltme teknikleri gibi teknolojik gelişmelere bağlıdır. Bu yaklaşım, özellikle klasik yöntemlerle hesaplanması mümkün olmayan karmaşık birleştirilmiş optimizasyon problemlerini ele almak için büyük bir olasılığa sahiptir.

Bir örnek olarak rastgele bir portföy optimizasyon problemi ele alalım. Bu durumda, çeşitli varlıklar arasında yatırım yaparak beklenen getiriye en büyüğe çıkarmaya ve kaybı en aza indirmeye çalışıyoruz. Bu tür problemler, birçok değişken ve kısıtlama içerebilir ve kuantum tavlama kullanılarak etkili bir şekilde çözülebilir.

#### **Problem Tanımı:**

- Diyelim ki elimizde N adet farklı finansal varlık var ve bu varlıklar arasında bölüştürülecek belirli bir miktar sermayemiz var.
- Her bir varlığın beklenen getirisi ve kaybı(örneğin, değişkenliği) biliniyor.
- Amacımız, portföyümüzün toplam getirisini en büyük seviyeye çıkarmak ve aynı zamanda toplam kaybımızı en düşük seviyeye düşürmektir.

Bu problemi kuantum tavlama ile çözmek için şu adımları izleyeceğiz:

1. Problem Formülasyonu: Öncelikle, problemi-

mizi QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) biçimine dönüştürmeliyiz. Bu, portföy getirisini maksimize eden en büyükle-yen ve riski minimize eden kaybı en küçükleyen bir amaç fonksiyonu tanımlamayı içerir. Amaç fonksiyonu, her bir varlık için karar değişkenle-rini (yatırımın ikili temsili), beklenen getirileri ve riskleri kayıpları içerecek şekilde oluşturulur.

Formülün genelleştirilmiş biçimi aşağıdadır:

$$F(x) = - \sum_{i=1}^N r_{ij} x_{ij} + \lambda \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} x_i x_j$$

2. Kuantum Tavlama Hazırlığı: Amaç fonksiyonumuzu bir başlangıç Hamiltonyenini temsil edecek şekilde tanımladıktan sonra, bu fonksiyonu en düşük enerji durumuna karşılık gelen bir amaç Hamiltonyenine evirecek şekilde bir süreç başlatırız. Bu aşamada, tüm kubitler, portföyümüzdeki olası yatırım dağılımlarının süperpozisyonunu temsil edecek şekilde ayarlanır.

3. Adyabatik Evrim ve Tavlama: Sistemimizi yavaşça başlangıçtan amaç Hamiltonyenine evirerek, sistem sürekli olarak en düşük enerji durumunu "arama" eğiliminde olur. Bu süreçte, kubitlerin süperpozisyonu, portföyümüz için en iyi sonuçları veren yatırım birleşimlerine yönelik taramayı temsil eder.

4. Ölçüm ve Değerlendirme: Evrim sürecinin sonunda, kubitlerimizin son durumlarını ölçerek, portföyümüz için en uygun yatırım dağılımını belirleriz. Ölçümler, hangi varlıklara yatırım yapılacağı ve hangilerinden kaçınılacağı konusunda ikili (0 veya 1) sonuçlar üretecektir.

5. Sonuçların Analizi: Elde edilen sonuçları kullanarak, yatırım stratejimizi uygulayabiliriz. Hangi varlıkların portföyümüzde yer alacağını ve hangi oranlarda sermaye ayrılacağını belirleyebiliriz.

Şekil 2'de kuantum tavlamanın finansal karar verme ve kayıp yönetimi gibi daha karmaşık alanlardanasılıkullanılabileceğini göstermektedir. Kuantum tavlama, özellikle büyük ölçekli ve yüksek derecede kısıtlı problemlerde, en uygun çözümleri bulma konusunda klasik yöntemlere göre avantajlar sunabilir. Bununla birlikte, bu tür bir uygulamanın gerçek dünyada etkin bir

şekilde gerçekleştirilmesi, kuantum donanımının kapasitesi, hata oranları ve sistem gürültüsü gibi faktörlere de bağlıdır [5].

Şekil 3'de programın ekran çıktısı verilmiştir.

#### 4. KUANTUM TAHLAMA UYGULAMALARI

Kuantum tahlama, klasik hesaplama yöntemleriyle çözülmesi zor olan bir dizi problemin üstesinden gelmek için kuantum mekaniğinin prensiplerini kullanan bir optimizasyon tekniğidir.

Bu teknoloji, özellikle karmaşık arama problemleri ve optimizasyonun gerekli olduğu alanlarda umut vaat ediyor. Aşağıda, kuantum tahlamanın bazı pratik uygulamalarını ve bu alanlardaki örnekleri bulabilirsiniz.

##### 4.1 Finansal Modelleme:

- Portföy Optimizasyonu: Yatırımcılar, belirli bir getiri hedefi için kaybı en aza indirgeyen veya öngörülen bir kayıp seviyesi için en yüksek getiriyi sağlayan varlık bileşimlerini bulmak ister.

Şekil 2. Kuantum tahlamanın finansal karar verme ve risk yönetimi ile ilgili bir örnek.

```
import numpy as np
import dimod

# Portföydeki varlık sayısı
num_assets = 10

# Rastgele getiri (mu) ve volatilité (sigma) değerlerini üretme
np.random.seed(0)
mu = np.random.rand(num_assets) # Beklenen getiriler
sigma = np.random.rand(num_assets, num_assets) # Volatilité
for i in range(num_assets):
    sigma[i, i] = 1.0 # Diagonal elemanlar 1
    for j in range(i+1, num_assets):
        sigma[i, j] = sigma[j, i] = np.random.rand() # Simetrik matris oluşturuluyor

# Risk-getiri oranını dengeli bir şekilde belirleme
risk_return_ratio = 0.5

# QUBO problem matrisini oluşturma
Q = {}
for i in range(num_assets):
    for j in range(num_assets):
        if i == j:
            Q[(i, i)] = -mu[i] + risk_return_ratio * sigma[i, i] # Diagonal terimler
        else:
            Q[(i, j)] = risk_return_ratio * sigma[i, j] # Off-diagonal terimler

# Kuantum tahlama benzetimi ile problemi çözme
sampler = dimod.SimulatedAnnealingSampler() # Benzetimli tahlama örnekleyci
response = sampler.sample_qubo(Q, num_reads=100) # QUBO problemini çözme

# En iyi çözümü alma
portfolio = None
for datum in response.data(['sample', 'energy']):
    if portfolio is None or datum.energy < portfolio['energy']:
        portfolio = {'combination': datum.sample, 'energy': datum.energy}

# Sonuçları yazdırma
print("Optimal portföy kombinasyonu:")
for asset in range(num_assets):
    print(f"Varlık {asset + 1}: {'Yatırım yapılıyor' if portfolio['combination'][asset] else 'Yatırım yapılmıyor'})
```

Şekil 3. Şekil 2'de verilen kodun ekran çıktısı.

```
Optimal portföy kombinasyonu:
Varlık 1: Yatırım yapılmıyor
Varlık 2: Yatırım yapılmıyor
Varlık 3: Yatırım yapılmıyor
Varlık 4: Yatırım yapılmıyor
Varlık 5: Yatırım yapılmıyor
Varlık 6: Yatırım yapılmıyor
Varlık 7: Yatırım yapılmıyor
Varlık 8: Yatırım yapılıyor
Varlık 9: Yatırım yapılıyor
Varlık 10: Yatırım yapılmıyor
```

Kuantum tavlama, parasal olarak büyük portföylerde ve karmaşık finansal ürünlerde bile bu tür kararları hızlandırabilir [16].

- Fiyatlandırma Seçenekleri: Kuantum tavlama, finansal türevlerin ve diğer enstrümanların karmaşık fiyatlandırma modellerini çözmede kullanılabilir, çünkü bu hesaplamalar, çok sayıda değişken ve gelecekteki senaryoları içerebilecek karmaşık matematiksel modellere dayanır.

#### 4.2 Tedarik Zinciri Yönetimi:

- Rota Planlaması ve Lojistik: Şirketler, ürünlerini mümkün olan en düşük maliyetle müşterilere ulaştırmak için en verimli nakliye rotalarını bulmak ister. Kuantum tavlama, trafik, hava durumu, yakıt maliyetleri gibi dinamik değişkenleri hesaba katan karmaşık lojistik problemlerini çözebilir [15].

- Envanter Yönetimi: Kuantum tavlama, envanter seviyelerini optimize en iyileyerek, depolama maliyetlerini düşürebilir ve ürün kullanılabilirliğini artırabilir.

#### 4.3 Enerji:

- En küçük kapsayan ağaç yöntemi ile elektirik şebekelerinin yapılmasını sağlamak: Kuantum tavlama, enerji dağıtımını en iyi şekilde dengelemek ve böylece tüketimi en iyi şekilde yönetmek için kullanılabilir. Bu, enerji kaynaklarını daha verimli kullanmayı ve kesintileri en aza indirmeyi amaçlar [10].

- Yenilenebilir Enerji Düzenlemesi: Enerji üretimini çevresel koşullara (örneğin, rüzgâr hızı veya güneş ışığı) ve talebe göre en uygun çözümler olarak, kuantum tavlama enerji şirketlerinin yenilenebilir kaynaklardan en iyi şekilde yararlanmalarına yardımcı olabilir. [11].

#### 4.4 İlaç ve Sağlık Hizmetleri:

- Moleküler Tasarım: Kuantum tavlama, olası ilaç adaylarının keşfini hızlandırmak için kullanılabilir. Örneğin, belirli bir biyolojik hedefe bağlanabilecek moleküllerin tasarımı ve ilaç keşfi için kuantum tavlama yaklaşımı ve kafes protein katlamasında farklı kodlama yöntemlerinin kullanılması [7].

- Genomik Veri Analizi: Kuantum tavlama yöntemleri, büyük ölçekli genetik verilerin analiz edilmesine yardımcı olarak, hastalıklar için tehli-

ke etmenlerini belirlemede veya kişiselleştirilmiş tedavi planları oluştırmada kullanılabilir.

#### 4.5 Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi:

- Veri Kümeleme ve Sınıflandırma: Makine öğrenimi algoritmaları, büyük veri setlerinden anlamlı örüntüler çıkarmak için kullanılır. Kuantum tavlama, veri noktalarını özelliklerine göre etkili bir şekilde sınıflandırmak veya kümelemek için kullanılabilir [12].

- Derin Öğrenme: Kuantum tavlama, özellikle sinir ağlarının eğitilmesi ve en uygun çözümler bulma söz konusu olduğunda, derin öğrenme modellerinin performansını artırabilir [13].

Bu uygulamalar, kuantum tavlamanın sunduğu hız ve hesaplama kapasitesinden faydalanarak, karmaşık problemleri daha verimli ve etkili bir şekilde çözmeye olasılığına sahiptir. Ancak, kuantum tavlamanın pratikte kullanılabilirliği ve etkinliği, kullanılan kuantum donanımının olgunluğuna ve ilgili algoritmaların geliştirilmesine bağlıdır.

## 5. KUANTUM TAVLAMANIN ÜSTÜNLÜKLERİ VE SINIRLAMALAR

### 5.1 Üstünlükleri

- Paralellik ve Süperpozisyon: Kuantum tavlama, kuantum süperpozisyon prensibini kullanarak aynı anda birden fazla olası durum üzerinde hesaplama yapabilir. Bu özellik, sistemlerin karmaşık çözüm uzaylarında çok daha geniş bir alanı eş zamanlı olarak tarayabilmesine olanak tanır, bu da optimizasyon süreçlerinde klasik yöntemlere kıyasla üstün bir hız ve verimlilik sağlar.

- Enerji Verimliliği: Geleneksel hesaplama tekniklerine kıyasla, kuantum tavlama prosedürleri, hesaplama süreçlerini birleştirerek ve kuantum durumlarının doğal özelliklerini kullanarak enerji tüketiminde olasılığı mevcut olan iyileştirmeler sunabilir. Bu, daha düşük enerji maliyetleri ve artan hesaplama kapasitesi anlamına gelir.

- Çözüm Alanının Keşfi: Kuantum tavlama algoritmaları, çözüm uzaylarını geniş bir açıdan inceleyebilir ve kuantum paralelliğinin sağladığı geniş kapsamlı arama kapasitesi sayesinde en uygun ve en uyguna yakın çözümlere ulaşabilir. Bu özellikle, sayısız olası çözüm birle-

şimine sahip optimizasyon en iyileme görevleri için kritik öneme sahiptir.

- **Çözüm Kalitesi:** Kuantum tavlama, çözüm yelpazesinin derinliklerine nüfuz edebilir ve enerji seviyeleri üzerinde tünelleme yaparak evrensel endüyük seviyeleri keşfetme yeteneğine sahiptir. Bu, özellikle klasik yöntemlerin yerel en küçüklerde sıkışıp kaldığı durumlarda çözüm kalitesinde belirgin bir artış sağlar.
- **Azaltılmış Arama Süresi:** Kuantum tavlama, klasik yöntemlerin aksine, kuantum tünelleme özelliğini kullanarak arama süreçlerini hızlandırır. Bu, çözüm uzayındaki yerel en küçüklerden çıkışı ve daha geniş bir evrensel arama kabiliyetini mümkün kılar.
- **Birleştirilmiş Optimizasyon Uygulamaları:** Kuantum tavlama, birleştirilmiş optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili bir araç olarak ortaya çıkmaktadır. Bu problemler, genellikle, gezgin satıcı problemi ve portföy optimizasyonu problemi gibi, çok sayıda değişkenin ve kısıtlamaların en uygun düzenlemelerini gerektirir. Kuantum tavlama, bu tür problemlerdeki çözümlerin kalitesini ve elde edilmiş hızını iyileştirebilir.
- **Gürültü Toleransı ve Sağlamlık:** Kuantum tavlama sistemleri, çevresel bozulmalara ve işlemel kusurlara karşı gösterdikleri dirençle dikkat çeker. Kuantum tutarsızlığı ve kabul edilen gürültü seviyesi, bu sistemlerin güvenilirliğini ve dayanıklılığını artıran hassas etmenler arasındadır.
- **Hibrit Yaklaşımlar:** Kuantum ve klasik hesaplama tekniklerinin bir arada kullanımı, her iki örneğin güçlü yanlarını birleştirir. Hibrit sistemler, kuantum hızlandırmaları ve klasik hesaplama altyapıları arasında bir köprü kurarak, daha geniş bir uygulama yelpazesi ve artan işlevsel esneklik sunar.
- **Hızlanma Potansiyeli:** Kuantum tavlama, belirli problemlerde teorik olarak üstel hızlandırma sunabilir. Bu, en uygun çözümlerin bulunmasında gereken sürenin dramatik olarak azaltılmasıyla sonuçlanabilir, böylece çözüm süreçleri klasik yöntemlere göre daha verimli hale gelir.

## 5.2 Sınırlamalar

Kuantum tavlama belirli optimizasyon problemlerini çözme konusunda umut verici olsa da aynı zamanda sınırlamaları da vardır. Kuantum tavlama ile ilgili temel sınırlamalardan bazıları şunlardır:

- **Sınırlı Problem Türleri:** Kuantum tavlama, birleştirilmiş optimizasyon problemlerini çözmek için çok uygundur, ancak çok çeşitli diğer problemler için en etkili yaklaşım olmayabilir. Kuantum tavlama belirli optimizasyon problem türleri ile sınırlıdır. Kapı tabanlı kuantum hesaplama ile karşılaştırıldığında genel amaçlı kuantum hesaplama için çok yönlü olmayabilir.
- **Sorun Ölçeklendirme:** Daha büyük ve daha karmaşık sorunları çözmek için kuantum tavlama ölçeklendirmek önemli bir zorluktur. Sorunun boyutu arttıkça kuantum donanımı, kübit bağlantısı, tutarlılık süreleri ve kuantum süperpozisyonunu ve dolanıklığını sürdürme yeteneği açısından sınırlamalarla karşı karşıya kalabilir [17].
- **Kübit Bağlantı Kısıtlamaları:** Mevcut kuantum tavlama donanımındaki kübitler arasındaki bağlantı genellikle sınırlıdır. Bu sınırlama, tüm kübit çiftlerinin doğrudan bağlanmaması nedeniyle verimli bir şekilde çözülebilecek sorun türlerini kısıtlayabilir.
- **Kübit Tutarlılığı ve Hata Oranları:** Kuantum sistemleri gürültüye ve çevresel bozulmalara karşı hassastır, bu da kübit uyumsuzluğuna ve hatalara yol açar. Yeterince uzun bir süre boyunca (tutarlılık süresi) kübit tutarlılığını korumak ve hata oranlarını düşük tutmak, kuantum tavlamanın en büyük zorluklarıdır ve sonuçların güvenilirliğini ve doğruluğunu etkiler.
- **Donanım Kısıtlamaları:** Kuantum tavlama donanımının oluşturulması ve bakımı karmaşık ve maliyetlidir. Kübitlerin çalışması için gereken kontrolü, kararlılığı ve düşük sıcaklıkları elde etmek zordur ve kuantum tavlama teknolojisinin yaygın olarak benimsenmesini sınırlayabilir.
- **Sorunları İfade Etmedeki Zorluk:** Gerçek dünyadaki optimizasyon problemlerini kuantum tavlama için uygun bir şekilde dönüştürmek zor olabilir. Sorunun uygun bir *Ising* veya *QUBO* (İkinci Dereceden Kısıtlanmamış İkili Optimizasyon)



şekline eşlenmesi gerekir; bu her zaman basit veya verimli olmayabilir.

- **Hibrit Yaklaşımlar Gerekli Olabilir:** Kuantum tavlama, karmaşık sorunları en iyi şekilde çözmek için her zaman tek başına yeterli olmayabilir. Daha iyi performans ve çözüm kalitesi elde etmek için kuantum tavlama ile klasik algoritmalarla birleştiren hibrit yaklaşımlara ihtiyaç duyulabilir.
- **Piyasada Bulunabilen Sınırlı Donanım:** Son güncellemeler itibarıyla, ticari olarak temin edilebilen kuantum tavlama donanımı sınırlıdır ve kuantum tavlama için erişim yaygın değildir. Bu, araştırmacıların ve uygulayıcıların kuantum tavlama için deneme yapma ve uygulamalar geliştirme yeteneğini sınırlar.
- **Algoritma ve Tavlama Programı Hassasiyeti:** Kuantum tavlamanın verimliliği, algoritma seçimine, tavlama planına ve diğer değişkenlere duyarlı olabilir. Belirli bir sorun için en uygun ayarları bulmak, zaman alıcı ve önemli bir iş olabilir.
- **Bazı Problemler İçin Kanıtlanmamış Hızlanma:** Kuantum tavlamanın teorik olarak belirli problemler için hızlanma sağlaması beklenirken, bu hızlanmanın özellikle büyük, gerçek dünya problemleri için pratik olarak gerçekleştirilmesi hala açık bir sorudur ve devam eden araştırmalara tabidir.

## 6. SONUÇLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Kuantum tavlama, sunduğu çeşitli üstünlüklerle, optimizasyon teorisinde ve pratiğinde önemli bir devrim olasılıklarına sahiptir. Bununla birlikte, bu teknolojinin etkin bir şekilde uygulanması, kuantum donanımının gelişimi, algoritmaların mükemmelleştirilmesi ve sistemin genel kararlılığının sağlanması gibi çeşitli teknik zorlukların üstesinden gelmeyi gerektirir. Bu bağlamda, kuantum tavlamanın pratikteki etkinliği ve kullanılabilirliği, alanda devam eden araştırmalara ve teknolojik ilerlemelere bağlı olarak şekillenecektir.

### İleri Okumalar

Kuantum teknolojilerini anlamak, kuantum hesaplama ve kuantum tavlama konusunda, grafik ve şemalarla, ansiklopedik bilgiler sunan Olivier

Ezratty [17].

Kombinatoriyal Optimizasyon Problemlerin çözümünde öncülük yapan Kochenberger [18].

Endüstri uygulamaları konusunda detaylı bilgi veren Yarkoni, Sheir [19]. Alanında deneyimli yazarlar tarafından oluşturulmuş, yüzlerce referans kaynaktan QUBO konusunda detaylı bir derleme olan Punnen, Abraham [20]. Ayrıca [21] [22]. Bu alana ilgi duyanlara ilgiyle önerilir.

### Teşekkür

Bu makalenin oluşturulmasına vesile olan Sayın Öğr. Grv. Dr. Cumali Yaşar'a ve yazım düzeni ve hatalarının giderilmesi için çaba sarfeden Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sevdanur Genç'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

### KAYNAKÇA

- [1] C. McGeoch, Catherine Adiabatic Quantum Computation and Quantum Annealing Theory and Practice Copyright © 2014 by Morgan & Claypool
- [2] Morita, Satoshi & Nishimori, Hidetoshi Mathematical Foundation of Quantum Annealing, [Submitted on 11 Jun 2008]
- [3] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
- [4] Van Laarhoven, P. J., & Aarts, E. H. (1987). Simulated annealing: Theory and applications. Springer Science & Business Media.
- [5] Yaşar, Cumali. Kuantum tavlama benzetimi ile Portföy Optimizasyonu problemi <https://github.com/cyasar/qubo>
- [6] <https://docs.dwavesys.com/docs/latest/leap.html?highlight=leap> & <https://youtu.be/4-ctzeBQkTc>
- [7] Irbäck, Anders Knuthson, Lucas Mohanty, Sandipan and Peterson, Carsten *Folding lattice proteins with quantum annealing*

- ling, PHYSICAL REVIEW RESEARCH 4, 043013 (2022)
- [8] E. Farhi, J. Goldstone, S. Gutmann, J. Lapan, A. Lundgren, and D. Preda “A quantum adiabatic evolution algorithm applied to random instances of an NP-Complete problem.” *Science*, vol. 292, no. 5516, pp. 472–475, 20 April 2001.
- [9] Childs, Andrew Lecture 19: *The quantum adiabatic theorem*, *Quantum Algorithms* (CO 871 Winter 2008)
- [10] Silva, Filipe F. C. Carvalho, Pedro M. S. Ferreira, Luís A. F. M. and Omar, Yasser A *QUBO Formulation for Minimum Loss Spanning Tree Reconfiguration Problems in Electric Power Networks* arXiv:2109.09659v2
- [11] Sharabiani, Mansour T.A. Jakobsen, Vibe B. Jeppesen, Martin and Mahani, Alireza S. *Quantum Annealing Continuous Optimisation in Renewable Energy* arXiv:2105.11322v2 (2 Apr 2022)
- [12] Kurihara, Kenichi Tanaka, Shu Miyashita, Seiji *Quantum Annealing for Clustering* arxiv.org/abs/0905.3527v1
- [13] Hegde, Pratibha Raghupati Passarelli, Gianluca Cantele, Giovanni and Lucignano, Procolo *Deep learning optimal quantum annealing schedules for random Ising models* arXiv:2211.15209v3 [quant-ph] 26 Jun 2023
- [14] Childs, Prof. Andrew *LECTURE 18: The quantum adiabatic theorem* University of Waterloo Quantum algorithms (CO 781, Winter 2008)
- [15] Játiva, Pablo Galán García, Jesús Abel García *Application of Quantum Annealing to Supply Chain Planning under Uncertainty* //dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3583133.3596350
- [16] G, Kochenberger, Ma, M. *Quantum computing applications of QUBO models to portfolio optimization*. White paper, University of Colorado, Denver, Sept 2019 <https://link.springer.com/article/10.1007/s10288-020-00464-9>
- [17] Ezratty, Olivier. *Understanding Quantum Technologies Fifth edition* 2022.
- [18] Glover, Fred Kochenberger, Gary Du, Yu Ma, Moses. *Quantum Bridge Analytics I: A Tutorial on Formulating and Using QUBO Models* *Annals of Operations Research* (2022) 314:185–212 <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04695-3>
- [19] Yarkoni, Sheir Raponi, Elena Bäck, Thomas and Schmitt, Sebastian. *Quantum annealing for industry applications: introduction and review* Published 21 September 2022 • © 2022 IOP Publishing Ltd.
- [20] Punnen, Abraham P. *The Quadratic Unconstrained Binary Optimization Problem Theory, Algorithms, and Applications* © Springer Nature Switzerland AG 2022.
- [21] Der-San Chen, Robert G. Batson, Yu Dang. *Applied Integer Programming Modeling And Solution* © 2010 by John Wiley & Sons, Inc.
- [22] Chandra, Anjan Kumar. *Quantum Quenching, Annealing and Computation* Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010 ve *Binary Quadratic Models* © Copyright 2017, D-Wave Systems Inc Revision 8c1dd16f