



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
CUMHURBAŞKANLIĞI
SAVUNMA SANAYİİ
BAŞKANLIĞI

KUANTUM

ODAK TEKNOLOJİ AĞI

SONUÇ RAPORU

HAZİRAN 2026

TASNİF DIŞI

**T.C.
CUMHURBAŞKANLIĞI
SAVUNMA SANAYİİ BAŞKANLIĞI**



**KUANTUM TEKNOLOJİLERİ OTAĞ
SONUÇ RAPORU**

HAZİRAN 2026



“alıŐmadan, yorulmadan, üretmeden rahat yaşamak isteyen toplumlar önce haysiyetlerini, sonra hürriyetlerini ve daha sonra da istiklal ve istikballerini kaybetmeye mahkûmdur.”

K. Atatürk



“Türkiye, savunma sanayiindeki tüm stratejik ihtiyaçlarını kendisi tasarlayabilir, geliőtirebilir, üretebilir ve bunların ihracatını yapabilir hale gelene kadar durmayacağız, dinlenmeyeceğiz, gece gündüz çalıŐacađız.”

R. Tayyip ERDOĞAN

Türkiye Cumhurbaşkanı

A handwritten signature in black ink, which appears to be "R. Tayyip ERDOĞAN".



BAŐKAN N SÖZÜ

Bilginin en kıymetli sermaye hâline geldiği günümüzde, Savunma Sanayii Başkanlığı olarak lkemizin teknolojik ve bilimsel birikimini daha ileri seviyelere taŐımak için kararlılıkla çalıŐmaya devam ediyoruz. Stratejik alanlarda bilgi odaklı yerli ve millî çözümler geliŐtirmeyi, Türkiye Yüzyılı vizyonu doğrultusunda kritik teknolojilerde bağımsızlığımızı güçlendirmeyi temel önceliklerimiz arasında görüyoruz.

Geleceğin teknolojilerini yalnızca takip eden değil, aynı zamanda bu teknolojilere yön veren bir ekosistem oluŐturmak amacıyla Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi faaliyetlerimizi ortak akıl, güçlü iş birliği ve etkin koordinasyon anlayıŐıyla yürütüyoruz. Bu kapsamda gerçekleŐtirdiđimiz **Geleceğin Harekâat Ortamını Őekillendirecek Teknolojiler (GHOST) alıŐtay** ile savunma sanayiimizin gelecek dönem teknoloji ar-ge ve yatırım önceliklerini belirlemeyi hedefliyoruz. alıŐtay sonuçları doğrultusunda önümüzdeki dönemde baŐlatılacak olan **Odak Teknoloji Ağı (OTAĞ)** konularını tespit ediyoruz. Bu konulara yönelik OTAĞ faaliyetleriyle kısa, orta ve uzun vadeli hedefleri içeren teknoloji bazlı yol haritaları hazırlıyor; kritik teknoloji alanlarındaki geliŐmeleri yakından takip ediyoruz.

Kuantum teknolojileri; hesaplamadan algılamaya, haberleşmeden kriptografiye, hassas lmlemeden malzeme bilimine kadar birçok alanda lkelerin teknolojik üstünlüğünü belirleyecek stratejik bir alan hâline gelmiştir. Bu alanda atılacak her adım, yalnızca bilimsel kapasitemizi değil; aynı zamanda savunma sanayiimizin gelecekteki kabiliyetlerini, küresel



rekabet gücümüzü ve teknolojik bağımsızlığımızı da doğrudan etkileyecektir. Bu nedenle kuantum teknolojilerinde dünyayla eş zamanlı olarak yrtlen çalışmalar, lkemizin geleceği açısından büyük önem taşımaktadır.

Savunma Sanayii Başkanlığı olarak bizler, bu büyük teknolojik dönüŐümü yakından takip eden, ona katkı sunan ve gerektiğinde yön veren bir paydaŐ olma kararlılığındayız. Başkanlığımız koordinasyonunda yrtlen **Kuantum OTAĞ** alıŐmaları, 123 farklı kurum ve kuruluŐtan yaklaşık 305 katılımcının katkısıyla gerçekleŐtirilmiŐ; bu çalışmalar neticesinde lkemizin **Kuantum Teknoloji Yol Haritası** oluşturulmuştur. Kuantum hesaplama, algılama ve haberleşme başlıkları altında hazırlanan bu Yol Haritası'nın gelecek dönemde hayata geçirilecek projelere referans teşkil edeceğine, savunma sanayii ekosistemimizin teknoloji geliştirme kapasitesine önemli katkılar sunacağına inanıyorum.

Cumhurbaşkanımız Sayın Recep Tayyip ERDOĞAN'ın ortaya koyduğu güçlü liderlik vizyonu ve Türkiye Yüzyılı hedefleri doğrultusunda; savunma sanayiinden uzay teknolojilerine, yapay zekâdan kuantum teknolojilerine kadar kritik alanlarda tam bağımsız Türkiye idealini gerçekleŐtirmek için çalıŐmalarımızı kararlılıkla sürdürüyoruz. Stratejik teknolojilerde millî yetkinliklerimizi artırmayı, bilimsel üretim kapasitemizi güçlendirmeyi ve ülkemizi küresel rekabette nc ülkeler arasına taŐımayı en önemli sorumluluklarımızdan biri olarak görüyoruz.

lkemizin bilimsel ve teknolojik birikimini, ekonomik ve teknolojik bağımsızlığı hedefleyen **Millî Teknoloji Hamlesi** vizyonuyla buluŐturan bu değerli çalıŐmanın; savunma sanayii ekosistemimize, sivil sektörlerimize ve stratejik teknoloji hamlelerimize ışık tutmasını temenni ediyorum. Yol Haritası'nın hazırlanmasında emeği geçen Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı personeli başta olmak üzere tüm BaŐkanlık personelimize; değerli katkılarını esirgemeyen akademisyenlerimize, kurum ve kuruluŐlarımıza ve sektör temsilcilerimize göstermiŐ oldukları çaba ve özveri için teŐekkür ediyorum.

Prof. Dr. Haluk Grgn
SAVUNMA SANAYİİ BAŐKANI



HAZIRLAYANLAR	
AD SOYAD	KURUM/KURULUŞ
Dr. AyŐe Gül TOKTAŐ	Savunma Sanayii Başkanlığı
Bilge İNCEL	Savunma Sanayii Başkanlığı
Bünyamin BAYRAK	TUSAŐ
Dr. Erdem DEMİRCİOĞLU	ULAK Haberleşme
Dr. Fatma Feza BÜYÜKŐAHİN ÖNCEL	Savunma Sanayii Başkanlığı
Dr. Gamze KILIERKAN BAŐLAR	ULAK Haberleşme
Dr. Kadir DURAK	Özyeğin Üniversitesi
Kevser Sinem ŐİMŐEK TREL	TUSAŐ
Doç. Dr. Mehmet Cengiz ONBAŐLI	Koç Üniversitesi
Dr. Mehmet Erdem ÇORAPÇIOĞLU	TUSAŐ
Dr. Melek KELEŐ ÖZGÜL	Savunma Sanayii Başkanlığı
Mertcan ÖZÇELİK	TUSAŐ
Prof. Dr. Özgür MÜSTECAPLIOĞLU	Koç Üniversitesi
Sevi KKBEYCAN	Savunma Sanayii Başkanlığı
Dr. Sevil S. MALCIOĞLU	TÜBİTAK ULAKBİM
Dr. Tanyel ÇAKMAK	TUSAŐ
Dr. Yusuf TUTEL	Savunma Sanayii Başkanlığı

*Hazırlayanlar alfabetik sıralanmıŐtır.

İÇİNDEKİLER

BAŐKAN ÖN SÖZÜ	5
1. AMAÇ	10
2. KAPSAM	11
3. TANIMLAR VE KISALTMALAR	12
4. YÖNETİCİ ÖZETİ	16
5. YÖNTEM	17
5.1. Çalışma Metodolojisi	17
5.2. Önceliklendirme Metodolojisi	18
5.3. Önceliklendirme Kriterleri	23
5.4. Güncelleme Yöntemi	24
6. KUANTUM OTAĞ FAALİYETLERİ	25
6.1. Yönlendirme Komitesi	25
6.2. Odak alıŐma Grupları.....	26
6.3. Toplantılar	28
7. ODAK ÇALIŞMALARINDA ELE ALINAN TEKNOLOJİLER	30
7.1. Kuantum Hesaplama Odak alıŐma Grubu-1 (OG-1)	30
7.2. Kuantum Algılama Odak alıŐma Grubu-2 (OG-2)	50
7.3. Haberleşme Odak alıŐma Grubu-3 (OG-3)	70
8. SONUÇ ve DEĞERLENDİRMELER	85
9. SAVUNMA SANAYİİ BAŞKANLIĞI TEKNOLOJİ KAZANIM ÇALIŞMALARI	89
10. KAYNAKÇA	91
11. EKLER	95

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1 OTAĞ İzlenen Yöntem	17
Şekil 2. Önceliklendirme Metodolojisi Akıő Őeması	19
Şekil 3. Ana Kriterler ve Öznitelikler	19
Şekil 4. DEMATEL Yönteminde Kullanılan Etki Ölçeği ve DEMATEL Adımları.....	20
Şekil 5. Yönlendirme Komitesi	26
Şekil 6. Kuruluş Dağılımı ve Sayıları	28
Şekil 7. Kuantum OTAĞ Toplantı Takvimi.....	30
Şekil 8. Süperiletken Tabanlı Kuantum Bilgisayar Mimarisi [5]	32
Şekil 9. Kuantum Algılama Teknolojilerinin Kullanıldığı Uygulama Alanları [5]	51

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Değerlendirme Kriter Seti	17
Tablo 2. AHP Yöntemi Adımları	21
Tablo 3. AHP Yönteminde Kullanılan Önem Ölçeği.....	21
Tablo 4. TOPSIS Adımları.....	22
Tablo 5. Değerlendirme Kriter Seti	24
Tablo 6. Teknoloji Başlıkları	26
Tablo 7. OĞ Liderleri ve Kuruluşları	27
Tablo 8. OĞ'ler Bazında Konu Öneri Sayıları	27
Tablo 9. OĞ'ler Bazında Kayıt Yaptıran ve Toplantılara Katılım Sayısı.....	27
Tablo 10. OĞ-1 Yakın Vade Konu Önerileri.....	37
Tablo 11. OĞ-1 Uzak Vade Konu Önerileri.....	38
Tablo 12. OĞ-2 Yakın Vade Konu Önerileri.....	61
Tablo 13. OĞ-2 Uzak Vade Konu Önerileri.....	63
Tablo 14. OĞ-3 Yakın Vade Konu Önerileri.....	75
Tablo 15. OĞ-3 Uzak Vade Konu Önerileri.....	76

1. AMAÇ

Savunma Sanayii Başkanlığı Stratejik Planı çerçevesinde, teknoloji kazanımı çalışmaları bütüncül bir yaklaŐımla planlanmakta, takip edilmekte ve desteklenmektedir. Teknoloji yol haritaları, her yıl belirlenen teknoloji alanlarında; üniversiteler, araştırma kuruluşları, ihtiyaç makamları, sanayi ve KOBİ'lerden ilgili temsilcilerin katılımıyla gerçekleştirilen Odak Teknoloji Ağları (OTAĞ) faaliyetleri neticesinde ortaya çıkmaktadır.

Kuantum OTAĞ ve Teknoloji Yol Haritası alıŐması, Savunma Sanayii Başkanlığı Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığımız öncülüğünde, Milli Savunma Bakanlığı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, TÜBİTAK temsilcileri, ölkemizin önde gelen kurum, kuruluş, üniversite ve araştırma enstitülerinden konu uzmanları ve Savunma Sanayii BaŐkanlıđımızın ilgili Daire BaŐkanlıklarının katılımı ile oluşan geniş katılımlı bir takım çalışması ile gerçekleştirilmiştir.

Kuantum teknolojileri, askeri ve sivil alanda yenilikçi ve çığır açan teknolojilerin baŐında gelmektedir. Geleceğin harp ortamında oyun deđiŐtirici etkileri olması öngörölen kuantum teknolojilerinin sivil alanda da malzeme ve ilaç geliştirme, tıbbi araştırmalar, haberleşme, uzay ve enerji gibi kritik sektörlerde de yeni bir çığır aması beklenmektedir. Dünyada kuantum teknolojilerine olan ilgi ve farkındalık giderek artmaktadır. BirleŐmiŐ Milletler, 2025'i Uluslararası Kuantum Bilimi ve Teknolojisi Yılı (IYQ) olarak ilan etmiŐtir. Buna göre, yıl boyunca dünya çapında kuantum bilimi ve uygulamalarının önemi konusunda kamu farkındalığını artırmayı amaçlayan etkinlikler düzenlenmiŐtir. Dünya ile eş zamanlı olarak 2025 yılında BaŐkanlıđımızda kuantum teknolojilerine yönelik alıŐmalar Kuantum OTAĞ faaliyetleri ile başlatılmıştır.

Kuantum teknolojileri; **kuantum hesaplama**, **algılama** ve **haberleşme** olmak üzere üç ana başlık altında incelenmektedir. **Kuantum hesaplama**; kuantum bilgisayarlar, algoritmalar, kriptografi, programlama dilleri, modelleme ve simölasyon uygulamalarını kapsamaktadır. Kuantum bilgisayarları üzerine yapılan araştırmalar, kuantum hata düzeltme, güröltü azaltma, mantık kapıları, kriyojenik soğutma ve çeşitli kuantum bit teknolojilerine yođunlaŐmaktadır. **Kuantum algılama**; askeri alanda radar, lidar, sonar, atomik saat, manyetometre gibi hassas sensör teknolojilerinde; sivil alanda tıbbi görüntüleme başta olmak üzere çeşitli görüntüleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Kuantum algılama diğer kuantum teknoloji alanlarına göre daha olgundur. Kuantum algılama; klasik ölçüm sistemlerinin sınırlarının ötesine geçmeyi hedefleyerek zaman, mesafe, sıcaklık, hareket, ivme, basınç, yerçekimi, manyetizma, ışık frekansı ve elektromanyetik spektrum gibi birçok fiziksel parametreyi çok daha yüksek hassasiyetle ölçmeyi sağlamaktadır. **Kuantum haberleşme**; kuantum fiziği prensiplerini kullanarak güvenli veri iletimi sağlayan yeni nesil iletişim teknolojisidir. Bu teknoloji, kuantum



sensörler, kuantum bilgisayarlar ve kriptografide kullanılan kuantum anahtar dağıtımı gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Başkanlığımız tarafından 2020 yılında 6. Ar-Ge Paneli kapsamında Kuantum Teknolojilerinin Geliştirilmesi Programı başlatılarak Kuantum Teknoloji Yol Haritası oluşturulmuştur. 2024 yılında başlatılan ve 2025 yılında tamamlanan OTAĞ çalışmaları ile mevcut Yol Haritası güncellenmiş olup Kuantum OTAĞ Sonuç Raporu oluşturulmuştur.

2. KAPSAM

Kuantum OTAĞ faaliyetleri 25 Aralık 2024 tarihinde gerçekleştirilen Lansman ile başlatılmıştır. Lansman toplantısına 14 kurum/kuruluş, 64 üniversite ve araştırma merkezi ile 20 firmadan yaklaşık 300 kişi katılım sağlamıştır. OTAĞ faaliyetleri;

- Kuantum Hesaplama,
- Kuantum Algılama,
- Kuantum Haberleşme,

3 Odak Çalışma Grubu (OÇG) ile yürütülmüş olup Kuantum Hesaplama için 170, Kuantum Algılama için 183 ve Kuantum Haberleşme için 152 katılımcı ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalar ve toplantılar sonucunda 85 teknoloji konusu belirlenerek önceliklendirilmiştir. Yapılan önceliklendirme yöntemi ile bu teknolojilerin yakın ve uzak vadede kazanımına yönelik plan oluşturulmuştur.

Kuantum OTAĞ çalışmalarının çıktısı olarak Kuantum OTAĞ Sonuç Raporu hazırlanmıştır.

“Kuantum OTAĞ Faaliyetleri” bölümünde, çalışmalar kapsamında teşkil edilen Yönlendirme Komitesi, Odak Çalışma Grupları ve gerçekleştirilen toplantılara ilişkin bilgi verilmektedir.

Kuantum OTAĞ çalışma sürecinde izlenen metotlar ve aşamalar, Kuantum OTAĞ Sonuç Raporu’nun “Yöntem” bölümünde özetlenmektedir. Bununla birlikte, OÇG’lerde belirlenen teknoloji konularının, kritiklik, mevcut imkân ve kabiliyetler gibi kriterler ile önceliklendirme çalışması yapılmıştır.

“Odak Çalışmalarında Ele Alınan Teknolojiler” bölümünde, OÇG konularına yönelik genel bilgiler verilmiş, teknoloji konularının Dünya’daki ve Türkiye’deki mevcut durumu değerlendirilmiş, Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar ve Tehditler (GZFT) Analizi ve teknoloji konularının önceliklendirilmesi yapılmıştır.

“Sonuç ve Değerlendirmeler” bölümünde, Kuantum OTAĞ alıŐmaları özetlenmiŐ, OG’ler tarafından belirlenmiŐ ne çıkan teknoloji konularına ve lkemizde Kuantum Teknolojileri alanında hedeflenen yetkinliklere ulaŐılması için yapılan değerlendirmelere yer verilmiştir.

“SSB Teknoloji Kazanım alıŐmaları” bölümünde öncelikli teknoloji konularının kazanımına yönelik yaklaşımlar ve SSB destek yöntemlerine yönelik bilgi verilmiştir.

3. TANIMLAR VE KISALTMALAR

2D: İki Boyutlu (Two Dimensional)

AB: Avrupa Birliği

AHP: Analitik HiyerarŐi Süreci (Analytic Hierarchy Process)

APD: ığ Foto Diyotları (Avalanche Photodiode)

ASIC: Uygulama-zel Entegre Devre (Application-Specific Integrated Circuit)

BAW: Hacim Akustik Dalgaları (Bulk Acoustic Wave)

BBO: Beta Baryum Borat (Beta-Barium Borat)

BİLGEM: BiliŐim ve Bilgi Gvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi

CFD: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)

CMOS: Tmleyici Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)

CNOT: ok Kbit Yapıları (Controlled NOT)

COST: Avrupa Bilim ve Teknolojide İŐbirlięi (European Cooperation in Science and Technology)

CPU: Merkezi İŞlemci Birimi (Central Processing Unit)

CV-QKD: Srekli DeęiŐkenli Kuantum Anahtar Dağıtımı (Continuous Variable Quantum Key Distribution)

KKV: ok Kriterli Karar Verme

DAQ: Veri Toplama (Data Acquisition)

DEMATEL: Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)

DV-QKD: Ayırık DeęiŐkenli Kuantum Anahtar Dağıtımı (Discrete Variable Quantum Key Distribution)

ECC: Eliptik Eğri Kriptografisi (Elliptic Curve Cryptography)

ENISA: Avrupa Birliği Siber Güvenlik Ajansı (European Union Agency for Cybersecurity)

ETSI: Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (European Telecommunications Standards Institute)

EuroQCI: Avrupa Kuantum İletişim Altyapısı (European Quantum Communication Infrastructure)

FEA: Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis)

- FPGA:** Yeniden Programlanabilir Kapı Dizisi (Field-Programmable Gate Array)
- FWM:** Dört Dalga KarıŐımı (Four-Wave Mixing)
- GMR:** Dev Manyetodiren (Giant Magnetoresistance)
- GNSS:** Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System)
- GPS:** Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
- GPU:** Grafik İŞlemci Birimi (Graphical Processing Unit)
- h-BN:** Hekzagonal Bor Nitrür
- HDD:** Sabit Disk Sürücüsü (Hard Disk Drive)
- HHL:** HyperLogLog
- HPC:** Yüksek BaŐarımly Hesaplama (High Performance Computing)
- InGaAs:** İndiyum Galyum Arsenit
- INS:** Ataletsel Navigasyon Sistemleri (Inertial Navigation System)
- IRS:** Akıllı Yansıtıcı Yüzeyler (Intelligent Reflecting Surfaces)
- İYTE:** İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
- JPA:** Josephson Parametrik Yükseltici (Josephson Parametric Amplifier)
- JRC:** Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi (Joint Research Centre)
- KBRN:** Kimyasal, Biyolojik, Radyolojik ve Nükleer
- KOBİ:** Küçük ve Orta Büyüklükteki İŐletmeler
- KTP:** Potasyum Titanil Fosfat (Potassium Titanyl Phosphate)
- KUANTAL:** Kuantum Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı
- LFM:** IŞık Alanı Mikroskopisi (Light Field Microscopy)
- LİDAR:** IŞık Algılama ve Mesafe Olme (Light Detection and Ranging)
- MIMO:**oklu Giriş-oktuıkıŐ (Multiple-Input Multiple-Output)
- MIT LIGO:** Massachusetts Teknoloji Enstitüsü, Lazer İnterferometre Ktleekim Dalga Gzlemevi (Massachusetts Institute of Technology, Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)
- mK:** mili Kelvin
- MRI:** Manyetik Rezonans Görüntüleme (Magnetic Resonance Imaging)
- NATO:** Kuzey Atlantik Antlaşması rgt (North Atlantic Treaty Organization)
- NIR:** Yakın Kızıltesi (Near-Infrared)
- NISQ:** Grltl Orta Olekli Kuantum (Noisy Intermediate Scale Quantum)
- NIST:** ABD Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
- NLP:** Doğal Dil İŞleme (Natural Language Processing)
- NV:** Azot BoŐluĐu (Nitrogen Vacancy)
- OG:** OdakalıŐma Grubu
- OPM:** Optik Pompalı Manyetometre (Optically Pumped Magnetometer)
- OQC:** Oxford Quantum Circuits

- OTAĞ:** Odak Teknoloji AĞı
- PDC:** Parametrik AŐaĐı Dönüşüm (Parametric Down-Conversion)
- PPLN:** Periyodik Olarak Kutup DeĐiŐtirilmiŐ Lityum Niobat (Periodically Poled Lithium Niobate)
- PQC:** Kuantum Sonrası Kriptografi (Post-Quantum Cryptography)
- QAOA:** Kuantum Yaklaşık Optimizasyon Algoritması (Quantum Approximate Optimization Algorithm)
- QFOG:** Kuantum Fiber Optik Dönüöler (Quantum Fiber Optic Gyroscope)
- QKD:** Kuantum Anahtar Dağıtımı (Quantum Key Distribution)
- QML:** Kuantum Makine Öğrenmesi (Quantum Machine Learning)
- QNLB:** Kuantum Doğal Dil İşleme (Quantum Natural Language Processing)
- QNN:** Kuantum Sinir AĞları (Quantum Neural Network)
- QPU:** Kuantum İşlemci Birimi (Quantum Processing Unit)
- QRNG:** Kuantum Rassal Sayı Üretici (Quantum Random Number Generator)
- QSB:** Kuantum Öğrenci Őubeleri (Quantum Student Branches)
- QSVM:** Kuantum Destekli Vektör Makineleri (Quantum Support Vector Machines)
- QuIC:** Kuantum Endüstri Konsorsiyumu (Quantum Industry Consortium)
- RADAR:** Radar (Radio Detecting and Ranging)
- RAM:** Rastgele EriŐimli Bellek (Random Access Memory)
- RSA:** Rivest, Shamir ve Adleman
- SAW:** Yüzey Akustik Dalgası (Surface Acoustic Wave)
- SERF:** Spin DeĐiŐimi Kaynaklı GevŐemenin Ortadan Kaldırıldığı Durum (Spin-Exchange Relaxation-Free)
- Si:** Silisyum
- SNSPD:** Süperiletken Nanotel Tek Foton Dedektörleri (Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors)
- SPAD:** Tek Foton Çığ Diyot (Single-Photon Avalanche Diodes)
- SPD:** Tek Foton Dedektörleri (Single-Photon Detectors)
- SPDC:** Kendiliğinden Parametrik AŐaĐı Dönüşüm (Spontaneous Parametric Down-Conversion)
- SQL:** Standart Kuantum Sınırı (Standart Quantum Limit)
- SQUID:** Süperiletken Kuantum Girişim Aygıtı (Superconducting Quantum Interference Device)
- SRS:** Uyarılmış Raman Saçılması (Stimulated Raman Scattering)
- SSB:** Savunma Sanayii Başkanlığı
- SSD:** Katı-Hal Sürücüsü (Solid State Drive)
- SUNUM:** Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi

SWaP: Boyut, Ağırlık ve G (Size, Weight, and Power)

TES: Geçiş Kenarı Sensörleri (Transition Edge Sensor, TES)

TF-QKD: İviz Alan Kuantum Anahtar Dağıtımı (Twin-Field Quantum Key Distribution)

THS: Teknoloji Hazırlık Seviyesi

TOBB ET: TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

TOPSIS: İdeal zme Benzerlik Bakımından Sıralama stnlğ (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

TQC: Transatlantik Kuantum Topluluğ (Transatlantic Quantum Community)

TUSAŐ: Türk Havacılık Uzay Sanayii A.Ő.

TÜBİTAK: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

UEKAE: Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü

UNAM: Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi

VC: Girişim Sermayesi (Venture Capital)

VQC: Değişken Kuantum Devreleri (Variational Quantum Circuits)

VQE: Değişken Kuantum zdeğer üzücü (Variational Quantum Eigensolver)

WPC: ZayıflatılmıŐ EŐevreli Darbe (Weak Coherent Pulse)

WS₂: Tungsten Disülfür

WSe₂: Tungsten Diselenr



4. YÖNETİCİ ÖZETİ

Günümüzde kuantum teknolojilerinin üretim, ölçeklendirme ve uygulama zorlukları olsa da kuantum devriminin gerçekleŐtiĐi kabul edilmektedir. Ülkelerin bu teknolojik yarışta konumlanabilmesi, firmaların rekabetçi kalabilmeleri ve insan gücünün bu alandaki ihtiyacı karşılayabilmesi için kuantum teknolojileri alanında yatırımlar yapılması ve çalıŐmaların desteklenmesi önemlidir. Bu teknolojinin kazanımı ve sürdürülebilirliği için temel bilimcilerin, mühendislerin ve kullanıcıların yer aldığı çoklu uzmanlık içeren iş birliğine ve hem devlet hem de özel sektör tarafından sağlanan bütçesel kaynağın sürekliliğine ihtiyaç vardır.

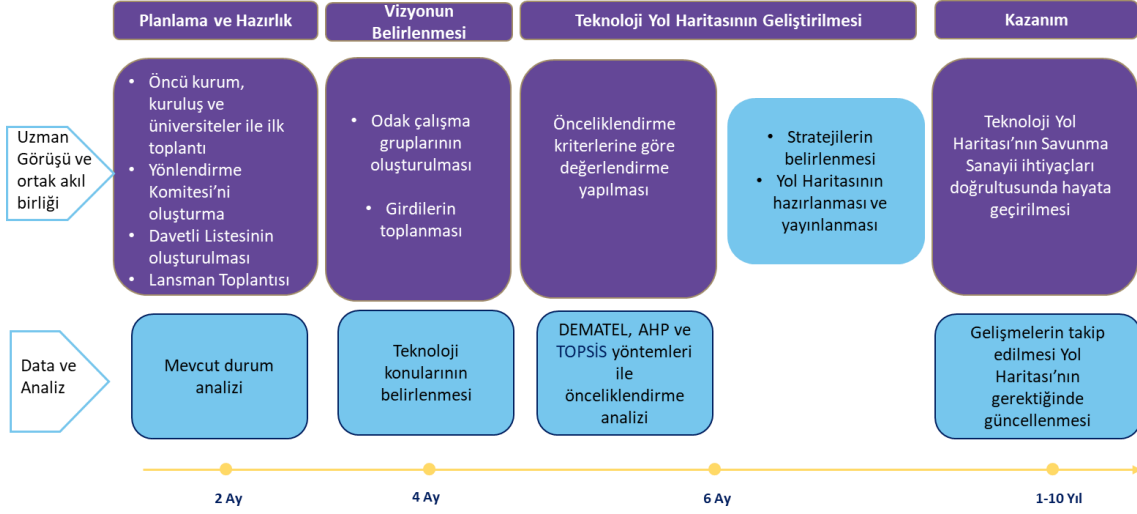
Başkanlığımız Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı tarafından kuantum teknolojilerindeki küresel gelişmeler dikkate alınarak 2020 yılında 6. Ar-Ge Paneli kapsamında Kuantum Teknolojilerinin Geliştirilmesi Programı başlatılmış olup kuantum hesaplama, kuantum algılama ve kuantum haberleşme konularında projelerin başlangıç kararı alınmıştır. Bu Program ile, yurt içindeki mevcut altyapı, insan gücü ve bilgi birikiminden en yüksek oranda yararlanacak şekilde kuantum teknolojilerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2024 yılı sonunda başlatılan Kuantum OTAĞ alıŐmaları ile sivil ve askeri tüm paydaşların katılımı sağlanarak mevcut Kuantum Teknoloji Yol Haritası daha uzun vadeyi içerecek şekilde güncellenmiştir. OTAĞ faaliyetleri “Kuantum Hesaplama”, “Kuantum Algılama” ve “Kuantum Haberleşme” Odak alıŐma Grupları altında ele alınmıştır.

Savunma Sanayii Başkanlığı öncülüğünde başlatılan Kuantum OTAĞ faaliyeti ile bu teknoloji alanlarında ülkemizdeki ve dünyadaki mevcut durum incelenerek stratejik öneme sahip teknolojilere yönelik çalışmalar yürütülmüŐtür. Ayrıca kazanılması hedeflenen teknolojiler, kullanıcı makamların yetenek ihtiyaçları ile ilişkilendirilmiştir. Bu kapsamda oluşturulan Yol Haritası ile ülkemizin kuantum teknolojisini kazanmasına yönelik teknoloji konuları belirlenmiştir.

25 Aralık 2024 tarihinde lansmanı yapılan Kuantum OTAĞ alıŐmaları ilgili kurum, kuruluş ve üniversitelerden konularında uzman toplam 305 üyenin katılımıyla gerçekleştirilmiştir. 25 Aralık 2025 tarihinde Kuantum OTAĞ KapanıŐ Toplantısı'nda, OTAĞ faaliyetleri süresince belirlenen 85 konu önerisinin önceliklendirme analizi sonucunda elde edilen yakın ve uzak vadede çalıŐılması gereken teknoloji konuları sunulmuŐtur.

OTAĞ alıŐmaları kapsamında izlenen yöntem **Şekil 1**'de özetlenmiştir. Odak alıŐma Grubu faaliyetlerinin çıktısı olarak “Kuantum OTAĞ Sonuç Raporu” hazırlanmıştır.



Şekil 1 OTAĞ İzlenen Yöntem

5. YÖNTEM

5.1. Çalışma Metodolojisi

Kuantum Teknoloji Yol Haritası güncellenmesi için “Ön Hazırlık, Lansman, Önerilerin/ Problemlerin Toplanması, OÇG Toplantıları ve Önceliklendirme” olmak üzere beş adımlı “Ortak Akıl” yöntemi kullanılmıştır. Söz konusu adımların açıklamalarına **Tablo 1**'de yer verilmiştir.

Tablo 1. Değerlendirme Kriter Seti

Yöntem Adımları	Kapsam
Ön Hazırlık	Lider kuruluşun belirlenmesi, Öncü kuruluşların tespiti, Alan uzmanları ve paydaşların tespiti, İlgili tematik alanda OÇG'lerin tanımlanması, Lansman hazırlıkları, Roller ve sorumluluklar ile çalışma usullerinin tanımlanması, Ortak veri paylaşımı alanının oluşturulması
Lansman	Tematik yol haritası çalışmaları kapsamında alan uzmanlarının ve ilgili paydaşların bilgilendirildiği bir etkinlik düzenlenerek girdilerin talep edilmesi: • Konu önerileri • Teknoloji envanteri • Yetenek ihtiyaçları • Katılım sağlanacak OÇG bilgileri
Önerilerin/Problemlerin Toplanması	Tematik yol haritası kapsamında iletilen konu önerilerinin derlenmesi
OÇG Toplantıları	OÇG toplantıları ile teknoloji yol haritası taslağının oluşturulması, • Konu önerilerinin değerlendirilmesi ve gruplandırılması

	<ul style="list-style-type: none">• Teknoloji konularının tespit edilmesi• Teknoloji yol haritası taslağının oluşturulması
Önceliklendirme	AHP ve DEMATEL yöntemleriyle kriter ağırlıklarının belirlenmesi, TOPSIS ile teknoloji konularının önceliklendirilmesi

Ortak Akıl yöntemi, konu hakkında deneyim sahibi olan üniversite, enstitü, kamu kurumları ve sanayii temsilcilerinin ilgili tematik alanda birlikte çalıŐarak teknoloji yol haritası ve kazanım planı hazırlanmasını esas almaktadır. “SSB Teknoloji Taksonomisi”, “THS Kılavuzu” ve “Teknoloji Envanteri” gibi daha önce hazırlanan teknoloji yönetimi araç ve metotlarının çalıŐmada kullanılması ve uygulanması sađlanmıŐtır.

5.2. Önceliklendirme Metodolojisi

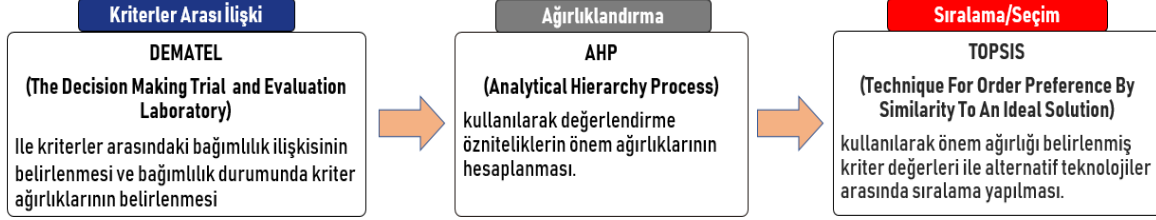
Günümüzde teknolojinin hızlı ve sürekli değişimi, uzun vadeli projeler yürüten Őirketler için önemli bir belirsizlik kaynağı haline gelmiştir. Bu durum; bütçeleme, insan kaynağı planlaması, yatırım kararları ve iş birlikleri gibi alanlarda öngörüde bulunmayı güçleŐtirmektedir. Özellikle uzun vadeye yayılan projelerde karŐılaŐılan en büyük risklerden biri, teknoloji geliŐtikçe rekabet avantajını yitirmiş, yani güncelliğini kaybetmiş bir ürün ortaya koyma olasılığıdır. Bu nedenle, sınırlı kaynaklara sahip Őirketlerin, teknoloji yol haritalarında yer alması beklenen ve gelecekte yüksek etki yaratacak teknolojileri analitik bir yaklaŐımla belirleyebilecek bir karar destek sistemine ihtiyaçları vardır. Ayrıca, problemler daha kritik ve karmaŐık hale geldikçe, değerlendirme sürecinde birden fazla kriterin dikkate alınması da kaçınılmaz hale gelmektedir.

Doğru ve etkili kararlar alabilmek için, çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinin karar problemlerine sistematik bir Şekilde uygulanması büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaŐımla, karmaŐık karar problemleri daha kolay modellenebilir ve değerlendirme süreci daha verimli hale getirilebilir. Teknoloji konularının önceliklendirilmesi de bir ÇKKV problemi olarak ele alınmalı ve bu tür problemlerin çözümünde uygun ve etkili ÇKKV yöntemlerinin kullanılması kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Geliştirilen karar destek sistemi yaygın olarak kullanılan ÇKKV yöntemlerinden DEMATEL [1], AHP [2] ve TOPSIS [3] metotlarının entegre edilmesi ile geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, karar verme sürecinde AHP ve DEMATEL yöntemleri kullanılarak kriter, alt kriter ve özniteliklerin ağırlıkları belirlenmiştir. Ardından, tanımlanan pozitif ve negatif ideal teknoloji konuları referans alınarak, TOPSIS yöntemiyle teknoloji konuları öncelik ve vade düzeylerine göre sıralanmıŐtır.

DEMATEL metodu ilk aşamada problem için önerilen ve uzmanlarca değerlendirilen kriterlerin aralarında bir iliŐki/bağımlılık olup olmadığının belirlenmesinde ve eğer bağımlılık varsa kriter ağırlıklarının tespit edilmesinde kullanılmıştır. AHP metodu kriterler arasında bir bağımlılık söz konusu olmadığı durumda ikili karŐılaŐtırma esaslarına dayalı olarak kriter ağırlıklarının ve önceliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. TOPSIS yöntemi ise DEMATEL veya AHP ile

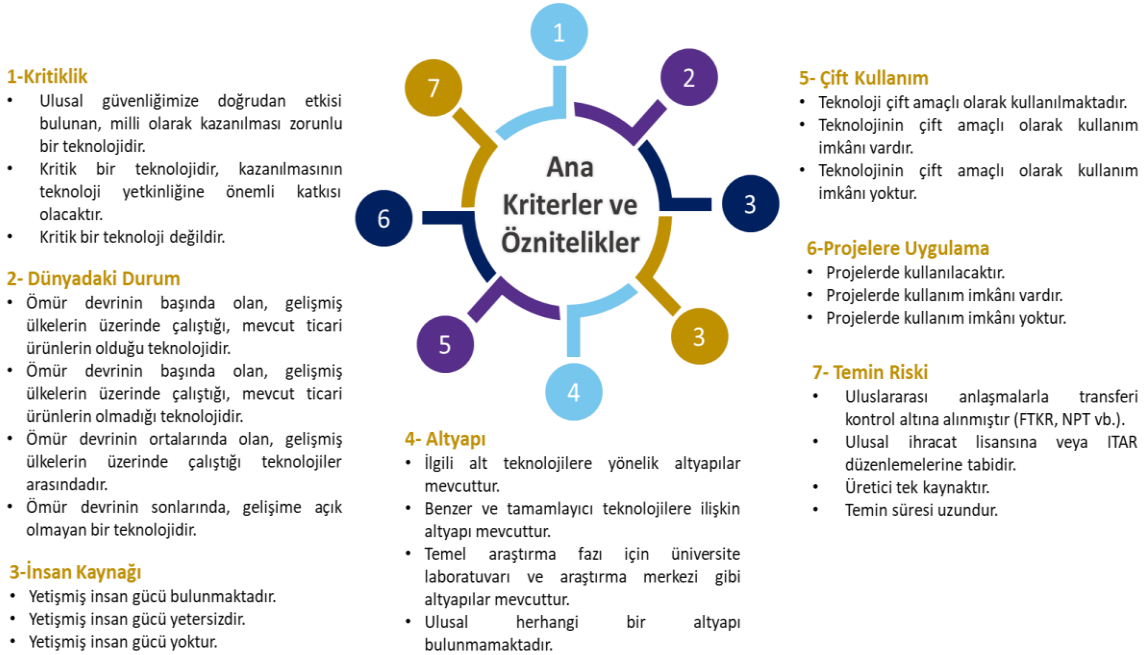
belirlenmiŐ kriter ağırlıkları baz alınarak, teknoloji yol haritası konularının yakın ve uzak vade dikkate alınarak önceliklendirilmesi ve sıralaması için kullanılmıştır. Bu yöntemsel yaklaşım, teknoloji nceliklendirme sürecinde sistematik ve analitik bir temel sağlamaktadır. Geliştirilen metodolojinin adımları ve her bir adımda kullanılan yöntem **Şekil 2**'de sunulmuŐtur.



Şekil 2. nceliklendirme Metodolojisi AkıŐ Őeması

Geliştirilen nceliklendirme metodolojisi kapsamında Teknoloji Konularına ait vade ve öncelik değerleri ayrı ayrı hesaplanmıŐtır. **Vade**, bir teknolojinin ne zaman kullanıma hazır hale geleceğini veya etkisini göstereceğini ifade etmektedir. Çalışma kapsamında konuların vade değerleri yakın ve uzak vade olarak kategorize edilmiştir. **ncelik** ise, bir teknolojinin ne kadar önemli olduğunu ve ne kadar hızlı bir Şekilde geliştirilmesi veya uygulanması gerektiğini ifade etmektedir. Bahse konu parametrelerin ayrı ayrı hesaplanmaları ile nceliklendirme çalıŐmasının kapsayıcılığı ile doğruluğu artırılmıŐtır.

Her bir Teknoloji Konusu için 7 ana kriter (Altyapı, ift Kullanım, Dünyadaki Durum, İnsan Kaynağı, Kritiklik, Projelere Uygulama, Temin Riski) altında yer alan 20 alt öznitelik, 4 alt kriter (Temin Riski ana kriteri altındaki) zerinden nceliklendirme değerlendirmesi yapılmıŐ olup **Şekil 3**'te sunulmuŐtur.



Şekil 3. Ana Kriterler ve öznitelikler

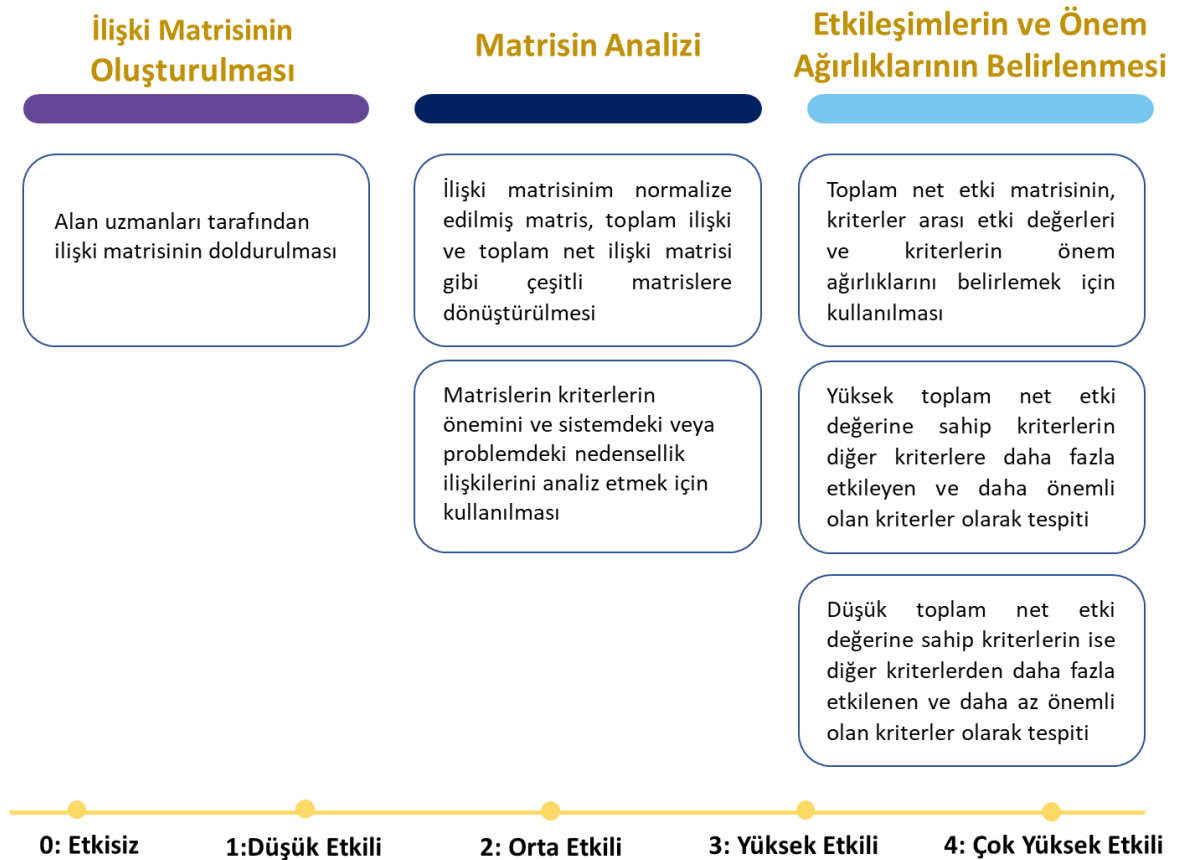
5.2.1. DEMATEL

DEMATEL yöntemi, 1970'li yıllarda Cenevre Battelle Enstitüsü tarafından geliştirilen, karmaŐık sistemlerdeki nedensel iliŐkilerin ve kriterler arasındaki etkileŐimlerin analiz edilmesinde kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yöntem, kriterler arasındaki neden-sonuç bağlantılarını görselleŐtirerek sistemin dinamiklerini daha iyi anlamaya olanak tanımaktadır [1].

Uzman görüŐlerine dayalı olarak gerçekleştirilen DEMATEL analizi, matris yapıları ve çeşitli analiz teknikleri aracılığıyla sistemde yer alan bileşenler ya da kriterler arasındaki etkileŐim düzeylerini ortaya koymaktadır. Böylece, sistemdeki nedensellik iliŐkileri belirlenebilir ve en kritik bileşen ya da kriterler tespit edilebilir.

Bu çalıŐmada, ilişkili olduğu değerlendirilen kriterler arasında DEMATEL yöntemi uygulanarak, kriterlerin birbirlerine göre önem ağırlıkları hesaplanmıŐtır. Bu kapsamda, Ana Kriterler ve "Temin Riski" alt kriterlerinin önem ağırlıkları DEMATEL yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen Ana Kriter ve Alt Kriter önem ağırlıkları ise TOPSIS yöntemine girdi olarak kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında izlenen DEMATEL adımları ve kullanılan etki leği Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. DEMATEL Yönteminde Kullanılan Etki leği ve DEMATEL Adımları

5.2.2. AHP

AHP, karmaŐık karar verme süreçlerini çözümlenmek amacıyla 1970’li yıllarda Thomas L. Saaty tarafından geliŐtirilmiŐ bir yöntemdir [2]. Bu yöntem, çok sayıda kriter ve alternatifin sistematik bir Şekilde değerlendirilmesini sağlayarak en uygun seçeneğin belirlenmesine katkı sunar. AHP’nin temel yaklaŐımı, karmaŐık karar problemini hiyerarŐık bir yapıya dönüŐtürmek ve bu yapıdaki unsurları ikili karŐılaŐtırmalarla analiz etmektir.

Bu alıŐmada, OTAĞ analizleri kapsamında birbirleriyle ilişkili olmayan kriterler altında yer alan özniteliklerin önem ağırlıklarının belirlenmesinde AHP yöntemi tercih edilmiştir. AHP sürecinde izlenen adımlar ise **Tablo 2**’de detaylı olarak sunulmaktadır.

Tablo 2. AHP Yöntemi Adımları

1	2	3	4	5
HiyerarŐık Yapı	İkili KarŐılaŐtırmalar	ncelik Matrisleri	Ağırlıklandırma	Tutarlılık Kontrolü
Kriterler ve alternatiflerin hiyerarŐık bir yapıya yerleŐtirilmesi	İkili karŐılaŐtırmalar için Tablo 4’te sunulan ölçek kullanılır	KarŐılaŐtırmalar dan elde edilen bilgilerle her kriter için bir öncelik matrisi oluşturulması	Her kriterin ve alternatifin genel önem derecesinin hesaplanması	Tutarsızlık değeri

AHP yönteminde ikili karŐılaŐtırmalar için kullanılan önem leği **Tablo 3**’te detaylı biçimde yer almaktadır.

Tablo 3. AHP Yönteminde Kullanılan önem leği

nem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	EŐit nem	İki faaliyet amaca eŐit düzeyde katkıda bulunmaktadır.
3	Orta derecede önem	Tecrübe ve yargı faaliyeti diğerine orta derecede tercih ettirmektedir.
5	Kuvvetli düzeyde önem	Tecrübe ve yargı faaliyeti diğerine kuvvetli bir Şekilde tercih ettirmektedir.
7	çok kuvvetli düzeyde önem	Bir faaliyet güçlü bir Şekilde tercih ediliyor ve uygulamada baskınlığı rahatlıkla görülür.
9	AŞırı düzeyde önem	Bir faaliyetin diğerine tercih edilmesine ilişkin kanıtlar büyük bir güvenliğe sahiptir.
2, 4, 6, 8	Ortalama değerler	UzlaŐma gerektiğinde kullanmak üzere iki ardıŐık yargı arasına düŐen değerdir.

5.2.3. TOPSIS

TOPSIS, çok kriterli karar verme yöntemleri arasında en sık tercih edilenlerden biridir. 1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından geliştirilen bu yöntem, alternatifleri ideal çözüme ve ideal olmayan çözüme olan uzaklıklarına göre değerlendirerek sıralar. TOPSIS yönteminin uygulanıŐ adımları **Tablo 4**'te gösterilmektedir.

Tablo 4. TOPSIS Adımları

1	2	3	4	5	6
Karar Matrisinin Oluşturulması	Karar Matrisinin Normalize Edilmesi	AęırlıklandırılmıŐ Normalize Matrisin Oluşturulması	İdeal ve İdeal Olmayan zmlerin Belirlenmesi	Alternatiflerin İdeal ve İdeal Olmayan zme Olan Uzaklıklarının Hesaplanması	Alternatiflerin Sıralanması
Alternatiflerin ve kriterlerin belirlenmesi	Her bir kriter için 0 ile 1 arasında değerlerin elde edilmesi	Her bir alternatif için her bir kriter göre ağırlıklı değerlerin elde edilmesi	İdeal zm, her bir kriter için en iyi değere sahip olan alternatiftir.	Her bir alternatif için ideal çözüme ve ideal olmayan çözüme olan uzaklıkların hesaplanması.	İdeal çözüme en yakın ve ideal olmayan çözümden en uzak olan alternatif en iyi alternatif olarak seçilir.
Her bir alternatif için her bir kriter göre bir değerlendirme matrisi oluşturulması			İdeal olmayan çözüm ise, her bir kriter için en kötü değere sahip olan alternatiftir.	Uzaklık hesaplamasında klid uzaklığı kullanılır.	Alternatifler, ideal çözüme olan yakınlıklarına göre sıralanır.

Bu çalıŐmada, ana kriterler, alt kriterler ve öznitelik ağırlıkları TOPSIS yöntemi kullanılarak belirlenmiŐ ve teknoloji konuları, pozitif ve negatif ideal konu vektörleri referans alınarak sıralanmıŐtır. Sıralama sonucunda elde edilen vade puanlarına göre konular sınıflandırılmıŐtır. Vade puanı hesaplanmıŐ olan konular, geçmiŐ OTAĞ'larda kullanılan histogram içerisinde kullanılan normal dağılım yerine kesme vektörü belirlenmiŐ olan sınır değere göre sınıflandırılmıŐtır. Bu kesme vektörü, konuları vade puanlarına göre "**yakın vade**" ve "**uzak vade**" olmak üzere iki gruba ayırmaktadır. Kesme vektörünün öznitelik değerleri, bir konunun yakın vadede değerlendirilmesi için gereken asgari öznitelik düzeylerine göre uzman görüŐüyle tanımlanmıŐtır. Yakın ve uzak vadeye ait konular, kendi grupları içerisinde öncelik puanlarına göre azalan Şekilde sıralanmıŐtır.

Uzman görüŐüne olan bağımlılığı azaltmak ve daha kapsamlı, objektif ve tutarlı bir karar süreci oluŐturmak amacıyla, AHP, DEMATEL ve TOPSIS yöntemleri bir arada kullanılarak hibrit bir karar modeli geliŐtirilmifitir. Bu yönteme yönelik gerçekleştirilen temel iyileŐtirmeler aŐaęıda açıklamalarıyla birlikte sunulmuŐtur:



- **Vade ve ncelik Düzeylerinin Belirlenmesi:** Teknoloji konuları, çalışma vadeleri ve öncelik düzeylerine göre farklı ağırlık kümeleriyle deĐerlendirilmiŐtir. Bu sayede daha Őeffaf ve izlenebilir bir süreç oluşturulmuştur.
- **Kapsamlılık:** AHP yöntemi, kriterler arasındaki ikili karŐılaŐtırmalara dayanır. DEMATEL yöntemi ise kriterler arasındaki karŐılıklı etkileŐimleri dikkate alır. Her iki yöntemin birlikte kullanılması, kriterler arası karmaŐık iliŐkilerin daha iyi anlaŐılmasını sağlar.
- **Tutarlılık:** TOPSIS yöntemi, alternatifleri ideal çözüme göre sıralayarak daha doğru ve tutarlı kararlar alınmasını sağlar.
- **Objektiflik:** nceden uzman görüŐüne ihtiyaç duyulan vade belirleme ve öncelik puanı iyileŐtirme süreçleri, geliştirilen metodoloji sayesinde otomatik hale gelmiştir. Bu süreçte referans vade vektörü kullanılarak konular analitik biçimde sınıflandırılmıŐtır.

5.3. nceliklendirme Kriterleri

Kuantum OTAĞ'ında yer alan teknoloji konuları özgün nceliklendirme metodolojisi kullanılarak konuların yakın ve uzak vadede kazanımları doğrultusunda sınıflandırılmıŐtır. Bu sınıflandırma sürecinin ardından, her OG'ye ait teknoloji konularının öncelik ve vade puanlarının aritmetik ortalamaları hesaplanmıŐtır. Elde edilen sonuçlar, sektördeki teknolojik yönelimleri belirlemek ve geleceğe dönük stratejik planlamalara ışık tutmak açısından önemli bir kaynak niteliğindedir. SSB OTAĞ alıŐmaları kapsamında kullanılan değerlendirme kriterlerine ilişkin ayrıntılar **Tablo 5**'te yer almaktadır.

Tablo 5. Değerlendirme Kriter Seti

Değerlendirme Kriterleri	Açıklamalar
Kritiklik	<ul style="list-style-type: none"> • Ulusal güvenliğimize doğrudan etkisi bulunan, milli olarak kazanılması zorunlu bir teknolojidir. • Kritik bir teknolojidir, kazanılmasının teknoloji yetkinliğine önemli katkısı olacaktır. • Kritik bir teknoloji değildir.
Dünyadaki Durum	<ul style="list-style-type: none"> • mr devrinin baŐında olan, geliŐmiŐ lkelerin üzerinde çalıŐtıęı, mevcut ticari ürünlerin olduğu teknolojidir. • mr devrinin baŐında olan, geliŐmiŐ lkelerin üzerinde çalıŐtıęı, mevcut ticari ürünlerin olmadığı teknolojidir. • mr devrinin ortalarında olan, geliŐmiŐ lkelerin üzerinde çalıŐtıęı teknolojiler arasındadır. • mr devrinin sonlarında, geliŐime açık olmayan bir teknolojidir.
İnsan Kaynağı	<ul style="list-style-type: none"> • YetiŐmiŐ insan gücü bulunmaktadır. • YetiŐmiŐ insan gücü yetersizdir. • YetiŐmiŐ insan gücü yoktur.
Altyapı	<ul style="list-style-type: none"> • İlgili alt teknolojilere yönelik altyapılar mevcuttur. • Benzer ve tamamlayıcı teknolojilere ilişkin altyapı mevcuttur. • Temel araştırma fazı için niversite laboratuvarı ve araştırma merkezi gibi altyapılar mevcuttur. • Ulusal herhangi bir altyapı bulunmamaktadır.
Çift Kullanım	<ul style="list-style-type: none"> • Teknoloji ift amaçlı olarak kullanılmaktadır. • Teknolojinin ift amaçlı olarak kullanım imkânı vardır. • Teknolojinin ift amaçlı olarak kullanım imkânı yoktur.
Projelere Uygulama	<ul style="list-style-type: none"> • Projelerde kullanılacaktır. • Projelerde kullanım imkânı vardır. • Projelerde kullanım imkânı yoktur.
Temin Riski	<ul style="list-style-type: none"> • Uluslararası anlaşmalarla transferi kontrol altına alınmıştır (FTKR, NPT vb.). • Ulusal ihracat lisansına veya ITAR düzenlemelerine tabidir. • retici tek kaynaktır. • Temin süresi uzundur.

Sıralama sonucunda belirlenmiŐ olan vade puanlarına göre konular referans vade kesme noktasına göre yakın ve uzak olmak üzere sınıflandırılmıŐtır.

5.4. Güncelleme Yöntemi

Güncelleme alıŐmaları, gerçekleştirilen OTAĞ faaliyetlerinde elde edilen Teknoloji Yol Haritalarının temel alınması ve periyodik olarak yapılacak OTAĞ faaliyet sonuçları ile güncellenerek tamamlanacaktır. Güncellemeler, 5.1 alıŐma Metodolojisi baŐlıęında tanımlanan adımlara, aŐaęıda yer alan adımların entegrasyonu ile gerçekleŐtirilecektir:

1. Mevcut Teknoloji Yol Haritalarında yer alan konu baŐlıklarının durumları detaylı bir Şekilde sorgulanacaktır. Bu aşamada, kazanımları tamamlanan konular tespit edilecektir.

2. Kazanımları henüz tamamlanmamıŐ konular, belirlenen Önceliklendirme Metodolojisi'ne tekrar sokularak öncelik ve vade hesaplamaları güncellenecektir.
3. OTAĞ alıŐmaları kapsamında elde edilecek yeni teknoloji konuları da aynı Önceliklendirme Metodolojisi'ne tabi tutularak öncelik ve vade hesaplamaları tamamlanacaktır.
4. Yeni teknoloji konuları ve mevcut durum analizi yapılarak güncellenmiş Teknoloji Yol Haritaları ile birleŐtirilerek güncelleme çalışmaları tamamlanacak ve bir sonraki Teknoloji Yol Haritası elde edilecektir.

6. KUANTUM OTAĞ FAALİYETLERİ

Savunma Sanayii Başkanlığı önderliğinde Kuantum Teknoloji Yol Haritası'nı güncellemek üzere 2024 yılı Aralık ayında başlanan çalıŐmalarda TUSAŐ lider kuruluş olarak belirlenmiştir.

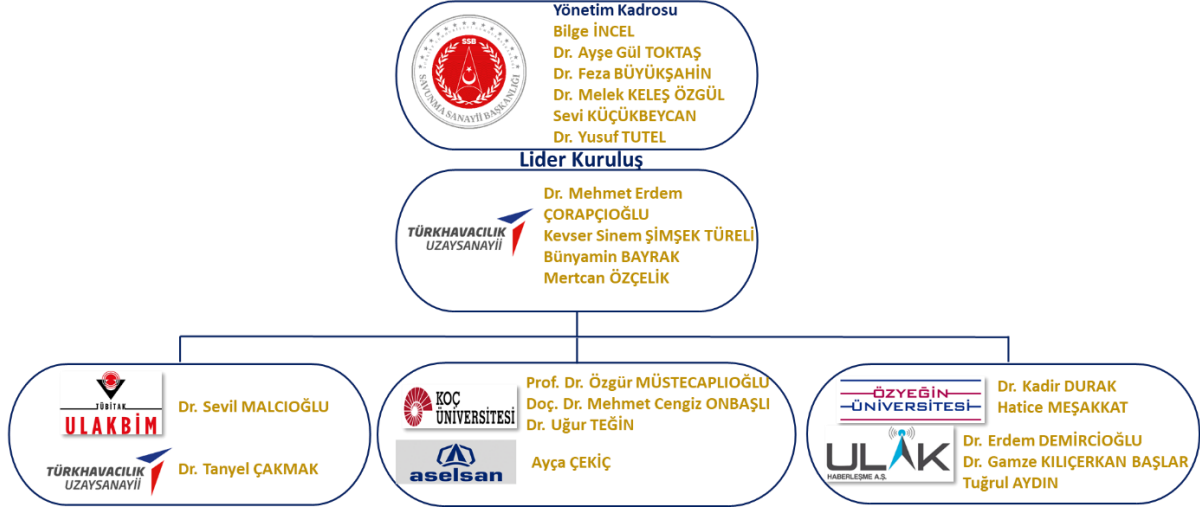
25 Aralık 2024 tarihinde lansman toplantısı gerçekleştirilmiŐ olup alan uzmanları ve ilgili paydaŐlar bilgilendirilmiŐ ve çalışma kapsamında beklenen girdiler ve güncellemeler talep edilmiştir. Lansman toplantısına Kuantum teknoloji konusunda araştırma/geliştirme faaliyetleri yürüten üniversite ve kurum temsilcileri ile ihtiyaç makamı temsilcileri katılım sağlamıştır.

Daha sonraki aşamada Odak alıŐma Grupları belirlenmiŐ, her bir grup ile ayrı ayrı düzenli toplantılar icra edilerek OTAĞ Sonuç Raporu ve Teknoloji Yol Haritası alıŐmaları gerçekleştirilmiştir.

6.1. Yönlendirme Komitesi

Yönlendirme Komitesi; SSB temsilcileri, lider kuruluş TUSAŐ temsilcileri ve OG lider kuruluşlarının temsilcilerinden oluşmaktadır. Yönlendirme Komitesi, tüm OG çalışmalarını planlama, yürütme, izleme ve raporlama görevlerini üstlenmiŐtir. Yönlendirme Komitesi üyelerinin isimleri ile temsil ettikleri kurum ve kuruluşlara ilişkin bilgiler **Şekil 5**'te sunulmuŐtur.

SSB Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı,
Kuantum ve İleri Algılayıcı Teknolojileri Müdürlüğü
Yönlendirme Komitesi



Şekil 5. Yönlendirme Komitesi

6.2. Odak Çalışma Grupları

Kuantum Teknoloji Yol Haritası çalışmaları, Kuantum Algılama, Kuantum Haberleşme ve Kuantum Hesaplama olmak üzere üç OG ile **Tablo 6**'da yer alan teknoloji alt gruplarında yürütülmüŐtür.

Tablo 6. Teknoloji Başlıkları

Kuantum Hesaplama	Kuantum Algılama	Kuantum Haberleşme
Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Kuantum Manyetometre	Kuantum İnternet
Kuantum Devre ve Kontrol Bileşenleri	Kuantum Görüntüleme (Radar, Lidar, Mikroskop, MRI)	Kuantum Anahtar Dağıtımı
Kriyojenik Sistemler ve Kuantum Soğutma Teknolojileri	Kuantum Akustik Sensörler	Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler
Kuantum Yazılımları	Tek Foton Kaynakları ve Dedektörleri	Kuantuma Dayanaklı Kriptografi
Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Kuantum Ataletsel Navigasyon Sistemleri	
Kuantum Güvenliği ve Kriptografi	Kuantum Radyasyon Dedektörleri	
	Kuantum Gravimetre	
	Atomik Saat	
	Kuantum Metroloji (Ölçüm Standartları)	
	Kuantum Anten	

OG liderleri, ilgili kuantum teknoloji alanlarındaki uzmanlıkları dikkate alınarak belirlenmiştir. Kuantum Algılama alanında Koç Üniversitesi ve ASELSAN, Kuantum Haberleşme alanında Özyeğin Üniversitesi ve ULAK Haberleşme, Kuantum Hesaplama alanında ise TÜBİTAK ULAKBİM ve TUSAŐ lider kuruluşlar olarak görevlendirilmiŐtir. OG liderleri, kuruluşları ve eŐleŐmeleri **Tablo 7**'de belirtilmiŐtir.

Tablo 7. OG Liderleri ve Kuruluşları

Odak alıŐma Grubu	Odak alıŐma Grubu Liderleri	Firma/Üniversite
Kuantum Algılama	Prof. Dr. Özgür MÜSTECAPLIOĞLU	Koç Üniversitesi
	Ayça EKİ	ASELSAN
Kuantum Haberleşme	Dr. Kadir DURAK	Özyeğin Üniversitesi
	Dr. Erdem DEMİRCİOĞLU	ULAK Haberleşme
Kuantum Hesaplama	Dr. Sevil SARIKURT MALCIOĞLU	TÜBİTAK ULAKBİM
	Dr. Tanyel ÇAKMAK	TUSAŐ

Her bir OG tarafından konu önerileri belirlenmiŐ, mevcut teknoloji, ihtiyaçlar ve altyapı envanteri gözden geçirilmiŐtir. Bu alıŐmalar sonucunda OG'lerde toplamda 85 adet teknoloji konu önerisi sunulmuŐtur. Bu teknoloji konuları önceliklendirme metodolojisine göre değerlendirmeye alınmıştır. OG'lere göre bu konuların dağılımı **Tablo 8**'de yer almaktadır.

Tablo 8. OG'ler Bazında Konu Öneri Sayıları

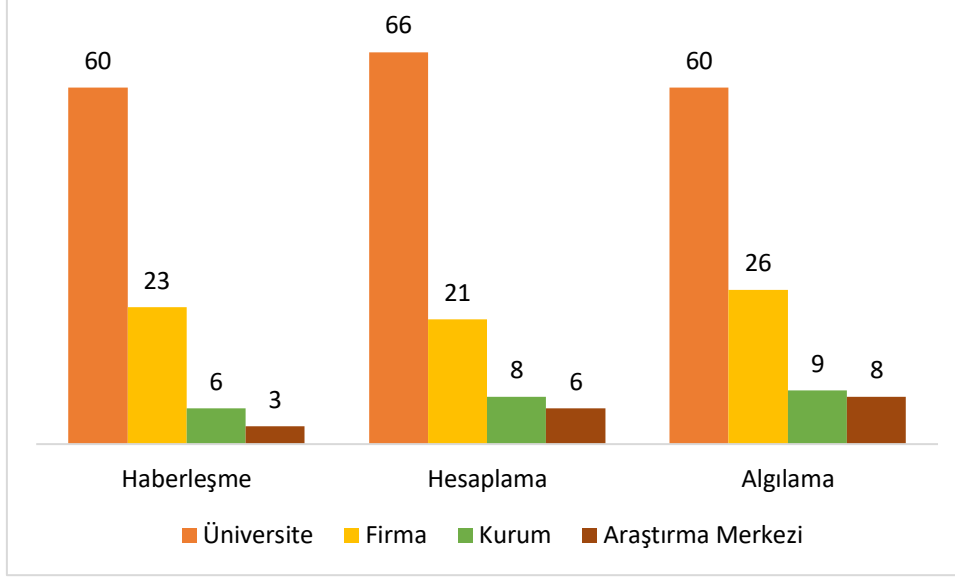
Odak alıŐma Grubu	Konu Öneri Sayısı
Kuantum Hesaplama	37
Kuantum Algılama	25
Kuantum Haberleşme	23

OG'ler, Yönlendirme Komitesi, liderleri ve ilgili alandaki uzmanların katılım ve koordinasyonu ile çalışmalarını yürütmüŐtür. Tüm OG'lerde toplam katılımcı sayısı 305 kiŐidir. Katılımcının OG'ler bazında dağılımı ise **Tablo 9**'da sunulmuŐtur.

Tablo 9. OG'ler Bazında Kayıt Yaptıran ve Toplantılara Katılım Sayısı

Odak alıŐma Grubu	Kayıtlı Sayısı	1. OG Toplantısı Katılım	2. OG Toplantısı Katılım
Kuantum Hesaplama	170	90	52
Kuantum Algılama	183	97	43
Kuantum Haberleşme	152	73	57

Tüm OG'lerde 123 farklı kuruluş yer almıŐtır. Kuantum OTAĞ faaliyetlerine katılan üniversite, firma, araştırma merkezi ve kurum sayıları **Şekil 6**'da sunulmuŐtur.



Şekil 6. Kuruluş Dağılımı ve Sayıları

6.3. Toplantılar

Kuantum OTAĞ alıŐmaları kapsamında, SSB'nin koordinasyonunda ve TUSAŐ'ın liderliğinde, Yönlendirme Komitesi ve OG'lerin katılımıyla akademi, sanayi ve araştırma kurumları arasında koordinasyon sağlanarak çeşitli toplantılar düzenlenmiŐtir. 25 Aralık 2024 tarihinde gerçekleştirilen Kuantum OTAĞ lansman toplantısına 300 katılımcı iŐtirak etmiŐ, aynı süreçte başlatılan ve 123 farklı kuruluŐtan 200'ün üzerinde geri bildirim alınan anket çalışması ile sektörel ilgi ve yönelimler detaylı Şekilde deėerlendirilmiŐtir. Özellikle üniversitelerden gelen yoğun katılım, akademik camianın sürece güçlü Şekilde dahil olduğunu göstermiŐtir. Ardından, 28 Ocak 2025 tarihinde 275'e yakın katılımcının katılımıyla düzenlenen başlangıç toplantısıyla OG alıŐmaları resmen baŐlamıŐtır.

İlk OG toplantıları sırasıyla 11 Mart 2025'te Hesaplama, 12 Mart 2025'te Haberleşme ve 13 Mart 2025'te Algılama baŐlıklarında gerçekleştirilmiştir. Bu toplantılara katılım sayıları; Hesaplama için 90, Algılama için 97 ve Haberleşme için 73 kişi olarak kaydedilmiŐtir. Takip eden ikinci OG toplantıları: 27 Mayıs 2025 Hesaplama oturumuna 52, 29 Mayıs 2025 Haberleşme oturumuna 57 ve 30 Mayıs 2025 Algılama oturumuna 43 kişi katılmıŐtır. Süreç boyunca sonradan eklenen katılımlarla birlikte toplam kayıt belirten katılımcı sayısı 305'e ulaşmıştır. Kuantum Hesaplama alanında 170, Algılama alanında 183 ve Haberleşme alanında 152 katılımcı kayıt belirtmiŐtir. Toplantıların ilk fazında katılımcılar tarafından önerilen konu başlıkları değerlendirilmiş; Hesaplama alanında 37, Algılama alanında 25 ve Haberleşme alanında 23 adet teknoloji önerisi toplanmıŐtır. İkinci toplantılarda ise bu öneriler OG liderlerinin moderasyonunda, belirlenen önceliklendirme kriterleri çerçevesinde ilgili uzmanlar



ve katkı sağlayan kurumlar ile birlikte doėrulanmiŐ ve nihai konu listeleri oluşturulmuştur. Ek olarak, toplantılar sırasında sunulan yeni konu başlıkları da değerlendirmeye alınarak konu havuzu güncellenmiştir.

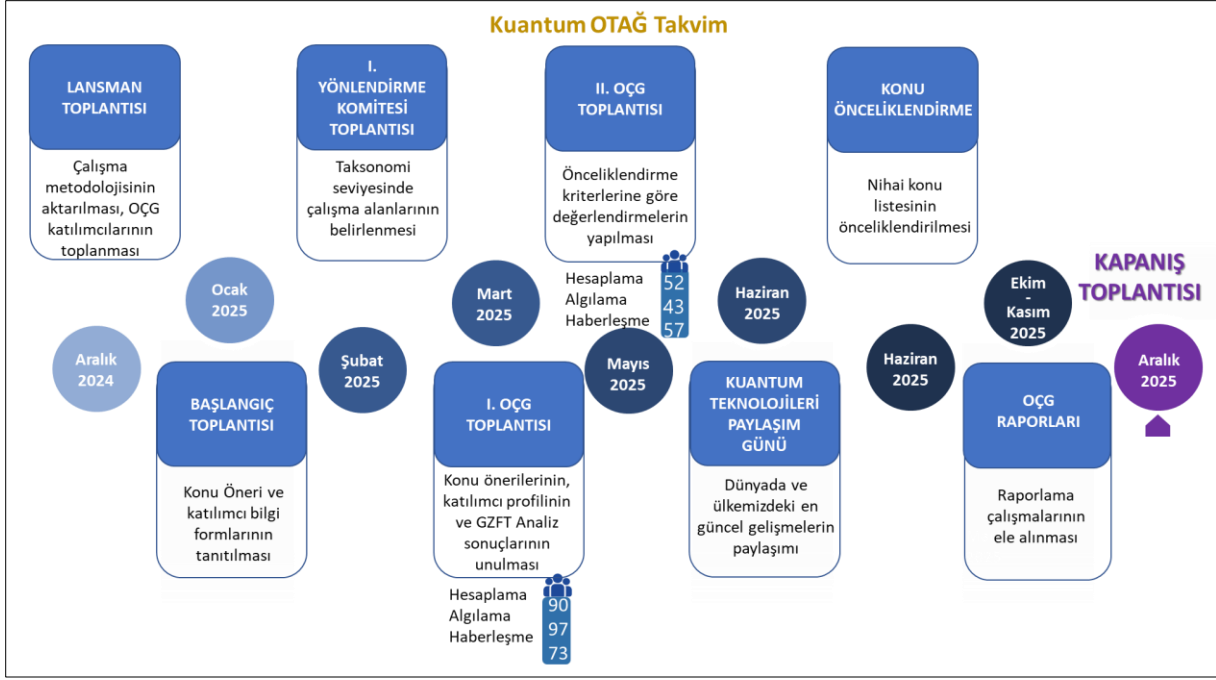
Başkanlığımız tarafından 2025 Kuantum Yılı kapsamında, 23 Haziran 2025 tarihinde “**Kuantum Teknolojileri PaylaŐım Günü**” etkinliği düzenlenmiŐtir. Kuantum Teknolojileri alanındaki dünyadaki ve ülkemizdeki en güncel gelişmeler katılımcılarla paylaŐılmıŐ olup Başkanlığımız bünyesinde yrtlen projeler ve faaliyetler hakkında bilgilendirme saėlanmıŐtir.

Gerçekleştirilen değerlendirme toplantılarında Kuantum Hesaplama, Algılama ve Haberleşme OG’leri tarafından oluşturulan çıktılar bütüncül bir çerçevede ele alınmıŐ ve teknoloji alanlarının mevcut durumu, geliŐim ve uygulama potansiyelleri deėerlendirilmiŐtir.

09 Aralık 2025 tarihinde gerçekleştirilen toplantıda, Türk Silahlı Kuvvetleri temsilcilerinin katılımıyla Kuantum OTAĞ alıŐmaları savunma ihtiyaçları doğrultusunda bütüncül olarak gözden geçirilmiŐ; Kuantum Hesaplama, Algılama ve Haberleşme alanlarında belirlenen önceliklerin operasyonel gereksinimler ile uyumu deėerlendirilmiŐtir. nceliklendirilmiŐ konu nerileri sistem/platform Daire BaŐkanlıklarındaki ihtiyaçlar doğrultusunda toplantılarla gözden geçirilmiŐtir.

Sürecin kapanıŐ aŐaması, 25 Aralık 2025 tarihinde, 14 kurum ve kuruluş, 21 firma ve 53 üniversiteden yaklaşık 250 katılımcı ile gerçekleştirilen Kuantum OTAĞ KapanıŐ Toplantısı ile tamamlanmıŐtir. KapanıŐ toplantısında, program süresince elde edilen tüm çıktılar kapsamlı bir bakıŐ açısıyla ele alınmıŐtir. Akademi, sanayi ve kamu paydaŐlarının katkılarıyla Őekillenen Kuantum Teknoloji Yol Haritası’nın genel erevesi deėerlendirilmiŐtir. Toplantı kapsamında ayrıca, edinilen tecrübeler, geliştirilen fikirler ve ortaya çıkan iş birliği imknları tartıŐılmıŐtir. Kuantum teknolojilerinin savunma ve sivil alanlardaki potansiyel kullanım senaryolarına ilişkin ne çıkan değerlendirmeler paylaŐılmıŐtir. Çalışma süreçleri boyunca liderlik rolü üstlenen paydaŐlar tarafından gerçekleştirilen değerli aktarımlar eŐliėinde, ülke genelinde yrtlen projelere ilişkin bilgiler paylaŐılmıŐ ve ilgili çalıŐmalara yönelik bir demonstrasyon gerçekleştirilmiştir.

Etkinlik ve toplantıların detayları ve takvimi **Şekil 7**’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Kuantum OTAĞ Toplantı Takvimi

7. ODAK ÇALIŞMALARINDA ELE ALINAN TEKNOLOJİLER

Kuantum teknolojisi dünyada hızla gelişen ve geleceğin harp ortamında yıkıcı etkileri olması beklenen teknolojidir. Bu nedenle, birçok ülkede kuantum teknolojileri egemenlik alanında kritik bir alan olarak değerlendirilmektedir. Bu rapor kapsamında kuantum teknolojileri, hesaplama, algılama ve haberleşme olmak üzere üç ana başlık altında incelenmiştir. Kuantum teknolojilerinin hesaplama, algılama ve haberleşme alanlarında kullanılması, günümüzde mevcut olmayan pek çok yeteneğin harp ortamında kullanılmasını mümkün kılacağı değerlendirilmektedir.

Kuantum Hesaplama, klasik bilgisayarların kullandığı ikili sistem (0 ve 1) yaklaşımının aksine, atom altı parçacıkların süperpozisyon, dolanıklık ve girişim gibi temel özelliklerini kullanan ve kubitleri temel alan bir teknolojidir. **Kuantum Algılama**, kuantum mekaniği prensiplerinden yararlanarak manyetik alan, yer çekimi, sıcaklık ve zaman gibi fiziksel nicelikleri atomik düzeyde yüksek hassasiyetle ölçen bir alandır. **Kuantum Haberleşme** ise parçacıkların kuantum özelliklerini kullanarak verinin güvenli şekilde iletilmesini sağlayan yeni nesil iletişim teknolojisidir.

7.1. Kuantum Hesaplama Odak alıŐma Grubu-1 (OG-1)

7.1.1. Genel Bilgi

Kuantum hesaplama, bilginin işlenmesi, depolanması ve iletilmesi için klasik fiziğin aksine kuantum mekaniğinin temel ilkelerinden yararlanan, gelişmekte olan bir teknoloji alanıdır. Bu alan kuantum bilgisayar donanımlarını, algoritmik mimarileri, kuantum sonrası kriptografiyi,



özelleŐmiŐ programlama dillerini, modelleme ve simlasyon uygulamalarını kapsar. Kuantum bilgisayarları üzerine yapılan güncel araştırmalar; kuantum hata düzeltme, gürültü azaltma, algoritma optimizasyonu, mantık kapıları ve süperiletken, iyon tuzağı, fotonik gibi farklı fiziksel yaklaŐımlarla geliştirilen kübitlerin kararlılığının artırılması ile çeşitli kuantum bit teknolojilerinin keŐfi konularına yoĐunlaŐmaktadır.

Kuantum bilgisayarlar, hesaplama üstünlüğünü elde etmek için aŐaĐıda yer alan temel kuantum özelliklerinden yararlanır:

Süperpozisyon (Superposition), kübitlerin aynı anda birden fazla durumda bulunabilmesidir. Klasik bir bit yalnızca 0 veya 1 değerini alabilirken, bir kübit bu iki durumun lineer bir kombinasyonunda ($|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$) bulunabilir. Süperpozisyon durumu bilgisayarların hesaplama kapasitelerini artırır ve birçok olasılığı aynı anda değerlendirme imkânı sunar [4]. Kübit teknolojileri arasında süper iletken kübitler, spin kübitler, fotonik kübitler ve hapsolmüŐ iyon kübitleri yer almaktadır.

Dolanıklık (Entanglement), iki veya daha fazla parçacığın, aralarındaki mesafe ne kadar uzak olursa olsun, kuantum durumlarının birbirine ayrılmaz bir Şekilde bağlanmasıdır. Bir kübit üzerinde yapılan ölçüm, onunla dolanık olan diğer kübitin durumunu anında belirler. Bu "yerel olmayan" (non-local) korelasyon, işlem hızını ve veri iletim kapasitesini klasik sınırların ötesine taŐır.

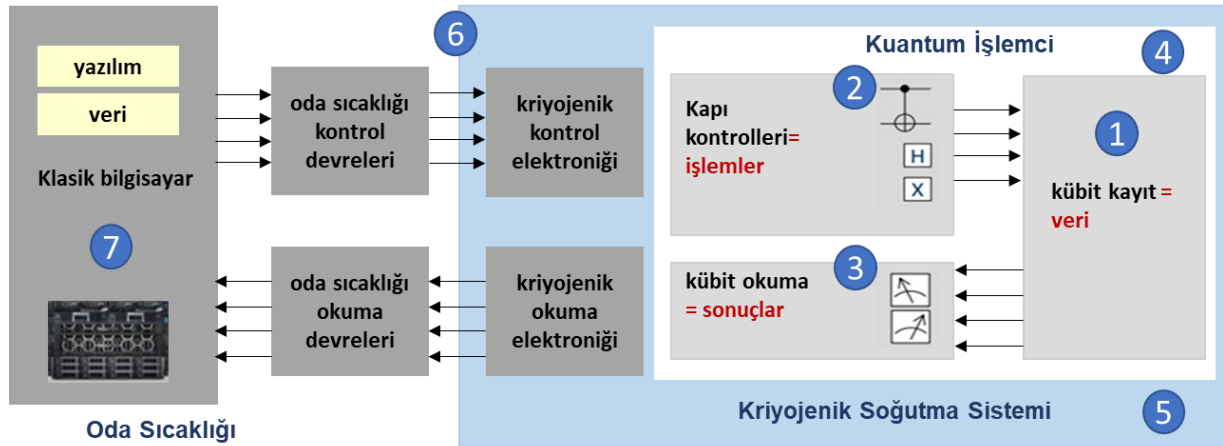
Kuantum GiriŐimi (Interference), bir kuantum algoritması çalıŐırken, doğru çözüm yolunun olasılık genliğini artırmak (yapıcı girişim) ve yanlış sonuçların olasılığını sönümlemek (yıkıcı girişim) için kullanılır. Belirli hesaplamaların sonuçlarını daha hızlı bulmak için olasılıkların yönlendirilmesinde kullanılır. Bu zellik, karmaŐık problemlerin çözümünde olasılıksal bir filtreleme mekanizması iŐlevi görür.

Klasik bilgisayar mimarisinin ana bileşenleri anakart, işlemci (CPU, vb.), ekran kartı (GPU), ses kartı, aĐ kartı, rastgele eriŐimli bellek (RAM), depolama birimleri (Sabit Disk-HDD, Katıhal sürücü-SSD, vb.), güç kaynağı ve soğutma sistemlerinden oluşmaktadır. Bilgisayarın kullanımı için algoritma ve yazılımlar bulunmaktadır.

Klasik bilgisayarlar bilgiyi 0 ve 1'lerden oluşan bitlerle doğrusal bir Şekilde iŐlerken kuantum bilgisayarlar bilgiyi kuantum bitleri (kübit) kullanarak süperpozisyon ve dolanıklık gibi kuantum mekaniksel özelliklerden faydalanarak iŐler. Bu zellik, çok daha karmaŐık hesaplamaların aynı anda yapılmasını sağlar. Klasik bilgisayarlarda iŐlemler ardıŐık olarak yapılır; yani bir işlem tamamlanmadan bir sonraki işleme geçilemez. Kuantum bilgisayarlar, aynı anda çok hızlı bir Şekilde birçok iŐlemin yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Bu iŐlemler kapsamında klasik bilgisayarlarda oluşan bit hataları, çoğunlukla yazılım ve donanım düzeyinde hata düzeltme yöntemleriyle yönetilir. Kuantum bilgisayarlarda ise kübitlerin hata oranları daha yüksektir ve bu nedenle daha karmaŐık hata düzeltme yöntemleri gerektirmektedir.

Kuantum bilgisayarlarının ana bileŐenlerini tanımlamak için aŐaĐıda yer alan süperiletken kübit iŐlemciye sahip bilgisayar örnek olarak verilmiştir.



Şekil 8. Süperiletken Tabanlı Kuantum Bilgisayar Mimarisi [5]

Kuantum bilgisayarların ana bileşenleri **Şekil 8**'de yer aldığı gibi kuantum işlemci (Kuantum ipset 4), Kriyojenik soğutma sistemi (Kriyostat 5), Kontrol Elektronikleri (6), Bilgisayar Entegrasyon Birimi (Klasik Bilgisayar 7) oluşmaktadır.

Kuantum işlemci (Kuantum ipset 4): Kuantum bilgisayarda hesaplama işlemlerini yürüten ana birimdir.

Kriyojenik Soğutma Sistemi (Kriyostat 5): Kübitlerin kuantum durumlarını koruyabilmesi için milikelvin düzeyinde soğutma sağlayan birimdir.

Kontrol Elektronikleri (6): Kübit kontrol elektroniği, kübit durumunu baŐlatmak, deĐiŐtirmek ve okumak için kullanılan fiziksel cihazları çalıŐtırır.

Bilgisayar Entegrasyon Birimi (Klasik Bilgisayar 7): Bilgisayar entegrasyon birimi, kontrol elektroniğini ve hangi kübit modülasyonu olursa olsun kübitleri yönetmek için kullanılmaktadır.

Kuantum Algoritma ve Kontrol Yazılımları: Kuantum bilgisayarlar kullanılarak hesaplama yapabilmek için gerekli yazılım altyapısıdır.

Kuantum haberleşme, kuantum hesaplama ve kuantum algılama uygulamalarında kullanılan fotonik ve elektronik bileşenler, özel tasarlanmış kuantum malzemelere ihtiyaç duymaktadır.



Bu alanlarda kullanılan baŐlica malzemeler; doğrusal olmayan kristaller, yarıiletkenler, süper iletkenler, topolojik yalıtkanlar, spintronik tabanlı yarıiletken yapılar ve manyetik garnetlerdir.

KUANTUM HESAPLAMA DONANIMLARI ve YARDIMCI ELEMANLAR

Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri

Kuantum hesaplamanın temel donanım katmanı, kübitlerin fiziksel olarak oluşturulduğu ve kontrol edildiği kuantum ipleridir. Günümüzde süperiletken devreler (IBM, Google, Rigetti, IQM, OQC, vb.), hapsolmuŐ iyonlar (IonQ, Quantinuum), fotonik kübitler (Xanadu, PsiQuantum, Quandela, vb.) ve nötr atomlar (Pasqal, QuEra, vb.) gibi farklı yaklaşımlar arasında teknolojik bir yarış sürmektedir [6]. Mevcut kuantum işlemcilerde kübit kararlılığı milisaniye ölçeğinde kalmakta, bu da karmaŐık ve derin hesaplamaların gerçekleştirilmesini zorlaŐtırmaktadır. Hata toleranslı kuantum hesaplamaa ulaşmak için, teorik olarak olgunlaŐmış hata düzeltme yaklaşımlarının hayata geçirilmesi büyük donanım maliyetleri gerektirmektedir [7].

Bu alandaki temel mühendislik hedefi, kübit sayısını artırırken dekoherans (evresel gürültü nedeniyle kuantum durumunun bozulması) etkisini en aza indirerek hata oranlarını düşürmek ve ölçeklenebilir entegre mimariler geliŐtirmektir.

Bir kuantum işlemcinin (Quantum Processing Unit-QPU) alıŐması için gereken temel bileşenler arasında kübit kontrol hatları, kuantum durumlarını okumak için kullanılan rezonatörler, hassas kontrol sinyalleri üreten mikrodalga jeneratörleri, ölçüm devreleri ve gürültüyü yönetmek için hata düzeltme modülleri yer alır.

QPU'nun merkezinde yer alan kuantum ip üzerinde bilgi işleme, kuantum devreleri aracılığıyla gerçekleştirilir. Kuantum devreler, kübitlerin mantıksal işlemlerden geçirilmesini sağlayan yapılardır. Klasik mantık kapılarının kuantum karşılığı olan kuantum kapıları, süperpozisyon ve dolanıklık ilkeleriyle çalıŐarak kübitlerin durumunu manipüle eder.

Teknolojik eğilimler, farklı QPU'ları birbirine bağlayan modüler kuantum mimarileri, fotonik tabanlı entegre devreler ve uzun vadeli hedef olan hata toleranslı kuantum bilgisayarlara yönelik tasarımlar üzerinde yođunlaŐmaktadır.

Kuantum Devre ve Kontrol Bileşenleri

Kuantum devre ve kontrol bileşenleri, kuantum hesaplama alanında kuantum bilgi işleme süreçlerinde temel bir araştırma alanıdır.

Kuantum devreleri, hesaplama sürecinin kübitler üzerinde tanımlandığı matematiksel ve fiziksel yapılardır. Bir kuantum devresi, başlangıç durumu hazırlama, kuantum kapılarının



uygulanması ve ölçüm olmak üzere üç aşama ile tanımlanır. Bu yapı, algoritmaların fiziksel sistemlerde uygulanabilir hale gelmesini sağlar.

Kuantum kapıları, kubitler üzerinde işlem yapan ve sistemin durumunu değiştiren temel operatörlerdir. Tek kubit kapıları (Hadamard, Pauli kapıları) ve çok kubit kapıları (Controlled-NOT (CNOT) Controlled-Z (CZ), Toffoli (CCNOT) Gate, Swap Gate) birlikte kullanılarak hesaplama gerçekleştirilebilir.

Kuantum kontrolü, teorik olarak tanımlanan devrelerin fiziksel sistemlerde hassas elektromanyetik darbelerin uygulanmasını sağlar. Kontrol mekanizmaları genel olarak açık döngü ve kapalı döngü kontrol yöntemleri ile gerçekleştirilir.

Kriyojenik Sistemler ve Kuantum Soğutma Teknolojileri

Kuantum işlemcilerin çalışabilmesi, kubitlerin kuantum durumlarını koruyabilmesi için olağanüstü derecede düşük sıcaklıkların (mili kelvin düzeyinde) sağlanmasını gerektirir. Bu nedenle, soğutma teknolojileri ve kriyojenik elektronik sistemler, kuantum donanım mimarilerinin en kritik bileşenlerinden biridir. Süperiletken kubitlerin kararlılığını ve tutarlılığını korumak için bu sistemler genellikle seyreltme buzdolapları kullanılarak 10-20 mK seviyelerine kadar soğutulur [8].

Bu aşırı düşük sıcaklık ortamında, yalnızca kubitler değil, bunlarla etkileşen tüm kontrol hatları, amplifikatörler, filtreler ve okuma devreleri de özel olarak tasarlanmış kriyojenik koşullarda çalışmak zorundadır. Kriyojenik Tümleyici Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS) ve Josephson parametric amplifikatörler (Josephson Parametric Amplifier, JPA) gibi özel devre çözümleri geliştirilmiştir.

Sistem ölçeklendike kontrol elektronisinin minyatürizasyonu, ısı yönetimi, elektromanyetik parazit yalıtımı ve modüler kriyojenik mimariler büyük mühendislik zorlukları haline gelmektedir. Kriyojenik elektronik ve soğutma teknolojileri yalnızca destekleyici altyapı değil, kuantum bilgisayarların ölçeklenebilirliği ve kararlılığı için belirleyici bir teknolojik temel olarak kabul edilmektedir.

KUANTUM YAZILIMLARI ve ALGORİTMALARI

Kuantum Yazılımları

Kuantum yazılımları, kuantum hesaplama sistemlerinde çalışan ve bilgi işlem süreçlerinde kuantum mekaniği ilkelerini kullanan yazılım bileşenleri olarak tanımlanır. Bu yazılımlar, kuantum algoritmaların tasarımı, kuantum devrelerinin modellenmesi ve fiziksel donanım üzerinde yürütülmesi gibi konuları kapsayan çok katmanlı bir yapıdan oluşur. Bu yapı, yüksek seviyeli programlama araçlarından düşük seviyeli kontrol sistemlerine kadar uzanır.



Günümüzde kuantum yazılımlar çoğunlukla Gürültülü Orta Ölçekli Kuantum (Noisy Intermediate Scale Quantum, NISQ) ortamında çalıştığından, gürültü, hata oranları ve sınırlı kubit kapasitesi önemli kısıtlar oluşturmaktadır. Bu nedenle uygulamalar genellikle hibrit (kuantum-klasik) yaklaşımlara dayanmaktadır.

Kuantum donanım ile algoritmalar arasında **kuantum ara katman yazılımları** kullanılarak hesaplamaların güvenli, yönetilebilir ve ölçeklenebilir şekilde yapılması sağlanmaktadır. Ayrıca ara katman yazılımları, donanım bağımlılığını azaltarak farklı kuantum mimarilerinde verimli çalışmayı da mümkün kılabilir.

Kuantum yazılım ekosistemi, IBM Qiskit, Google Cirq ve Xanadu PennyLane gibi açık kaynaklı platformlar sayesinde hızla olgunlaşmaktadır.

Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon

Kuantum algoritmalarının en bilinen teorik örnekleri; büyük sayıları çarpanlarına ayırarak mevcut asimetrik kriptografinin temelini tehdit eden Shor algoritması [9] ve yapılandırılmamış veri tabanlarında arama problemini kuadratik olarak hızlandıran Grover algoritmasıdır [10].

NISQ döneminde araştırmalar, klasik ve kuantum işlemcileri bir arada kullanan hibrit algoritmalara odaklanmıştır. Bu yaklaşımlardan en yaygın olanları; moleküler enerji seviyelerini hesaplamak için kullanılan Değişken Kuantum Özdeğer Çözücü (Variational Quantum Eigensolver, VQE) ve optimizasyon problemleri için geliştirilen Kuantum Yaklaşık Optimizasyon Algoritmasıdır (Quantum Approximate Optimization Algorithm, QAOA) [11].

Bu algoritmalar geniş bir endüstriyel yelpazede uygulama potansiyeline sahiptir. Özellikle ilaç ve malzeme bilimi (yeni katalizör tasarımı, moleküler simülasyon, vb.), finans (portföy optimizasyonu, risk modelleme, vb.) ve yapay zekâ alanlarında kullanılmaktadır.

Kuantum algoritma araştırmaları kapsamında kuantum yapay zekâ ve makine öğrenmesi son yıllarda önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Kuantum makine öğrenmesi, kuantum hesaplama ile makine öğrenmesi disiplinlerinin kesişiminde yer alan ve kuantum bilgi işleme prensiplerini öğrenme problemlerine uygulamayı amaçlayan bir araştırma alanıdır.

Bu alanda geliştirilen yöntemler arasında kuantum sinir ağları, kuantum çekirdek (kernel) yöntemleri ve hibrit klasik-kuantum öğrenme modelleri yer almaktadır. Bu doğrultuda Google, IBM, Xanadu ve Quantinuum gibi kurumlar, kuantum makine öğrenmesi alanında aktif araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütmektedir.



KUANTUM GÜVENLİĞİ VE KRİPTOGRAFI

Kuantum bilgisayarların gelişiminin en somut etkilerinden biri, mevcut siber güvenlik altyapısına yönelik oluşturduğu tehdittir. Bu tehdide yanıt olarak "kuantum güvenliği" alanı iki ana koldan ilerlemektedir:

- Kuantum Sonrası Kriptografi (Post-Quantum Cryptography, PQC): PQC, klasik bilgisayarlarda çalışan ancak kuantum bilgisayarların dahi çözmekte zorlanacağı karmaŐık matematiksel problemlere dayanan yeni nesil Őifreleme algoritmaları geliŐtirmeyi amaçlar. ABD Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (National Institutes of Standards and Technology-NIST) bu alandaki standardizasyon sürecine öncülük etmekte olup ilk standartlar 2024 yılında yayımlanmıŐtır [12].
- Kuantum Anahtar Dağıtımı (Quantum Key Distribution, QKD): Kuantum mekaniğinin ölçüm problemi ilkesine dayanarak, iki taraf arasında paylaşılan bir Őifre anahtarının üçüncü bir tarafça gizlice dinlenip dinlenmediğini tespit etmeyi garanti eder. QKD sistemleri, tek foton kaynakları ve Kuantum Rassal Sayı Üreteçleri (Quantum Random Number Generator, QRNG) gibi özel donanım bileşenleri gerektirir.

Güncel araştırmalar, bu iki yaklaŐımı birleŐtiren hibrit PQC-QKD sistemleri ve gelecekte güvenli bir kuantum internet altyapısını mümkün kılacak kuantum aĐ teknolojileri üzerine yoğunlaşmıştır. Halen kuantum güvenliği ve iletişim protokollerinde uluslararası uyumun sağlanmasını güçleŐtiren standartlaŐma eksiklikleri mevcuttur. HPC/QC donanım ve yazılımlarının karŐılaŐtırılması (benchmarking) ve diğer gelişmekte olan teknolojilerle ara yüzlerinin standartlaŐtırılması gerekmektedir [13].

2025 Mayıs–2026 Mart döneminde yayımlanan çalışmalar, kuantum bilgisayarlarla modern Őifrelemeyi kırmak için gereken kübit sayısı tahminlerinin hızla düŐtüĐünü göstermektedir. RSA ve ECC gibi kriptografik sistemler için gereken kaynaklar, önce milyonlar seviyesinden yüz binlere, ardından yaklaşık on bin kübit seviyelerine kadar gerilemiŐtir. Bu durum, kuantum algoritmalarındaki ve hata düzeltme tekniklerindeki gelişmelerin, kuantum bilgisayarların kriptografik tehdit potansiyelini önceki tahminlere göre çok daha erken ortaya çıkarabileceğini göstermektedir [[14], [15], [16], [17], [18]].

7.1.2. Teknoloji Konu Önerileri

Kuantum hesaplama alanındaki **Tablo 10** yakın vadeli konular **Tablo 11** uzak vadeli konular yer almaktadır.

Tablo 10. OG-1 Yakın Vade Konu nerileri

Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
1 Kuantum Güvenliği ve Kriptografi	Kuantum Sonrası (Post-Quantum) Őifreleme ve Saldırı Tespiti: <i>Kuantum bilgisayarların mevcut klasik kriptografik sistemlere (RSA, ECC vb.) yönelik oluşturduğu yıkıcı tehditlere karşı, matematiksel zorluk derecesi kuantum algoritmalarıyla (Shor, Grover vb.) kırılmayacak düzeyde, kuantum saldırılarına dayanıklı, Őifreleme algoritmaları ve kuantum temelli saldırı tespit mekanizmalarının geliştirilmesini kapsar.</i>	Yakın
2 Kuantum Güvenliği ve Kriptografi	Kuantum-Dirençli Kriptografik Algoritmalar ve Blokzincir Tabanlı Güvenlik Uygulamaları: <i>Kuantum saldırılarına karşı dayanıklı matematiksel altyapılar üzerine kurulu yeni nesil kriptografik algoritmaların, blokzincir sistemleriyle entegre edilerek dijital kimlik yönetimi, veri bütünlüğü ve finansal iŐlemsel güvenliğin korunmasına/sağlanmasına yönelik çözümleri ifade eder. Akıllı sözleŐmelerin ve dijital imzaların "Kuantum-Güvenli" (Quantum-Safe) hale getirilerek, gelecekteki olası "Őimdi Depola, Sonra z" (Harvest Now, Decrypt Later) saldırılarına karşı verinin siber dayanıklılığını artırmayı hedefler.</i>	Yakın
3 Kuantum Güvenliği ve Kriptografi	Lazer Tabanlı Rassal Sayı reteci Geliştirilmesi: <i>Kuantum gürültüsünden kaynaklanan foton salınımlarını kullanarak gerçek fiziksel rastgelelik sağlayan lazer tabanlı kuantum rassal sayı retelerinin (QRNG) geliştirilmesidir.</i>	Yakın
4 Kuantum işlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Kübit retiminde Mikro/Nano-Fabrikasyon Süreç Optimizasyonu: <i>Kübitlerin mikro ve nano ölçekte üretiminde, elektron demeti litografisi (EBL), ince film kaplama, aŐındırma ve yüzey iŐlemleri gibi yarı iletken üretim tekniklerinin hata oranlarını minimize edecek biçimde optimize edilmesini amaçlayan süreç geliştirme faaliyetlerini kapsar.</i>	Yakın
5 Kuantum işlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Foton Kübit Tabanlı Kuantum işlemci Geliştirilmesi: <i>Fotonik kübitlerin üretilmesi, manipüle edilmesi, dalga kılavuzları ve faz kaydırıcıların geliştirilmesi ve oda sıcaklığında çalıŐabilen, ölçeklenebilir fotonik kuantum hesaplama prototiplerinin entegre fotonik devre (PIC) mimarisiyle oluşturulmasını kapsar.</i>	Yakın
6 Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Kuantum Ara Katman Yazılımlarının Geliştirilmesi: <i>Kuantum algoritmalarının farklı donanım mimarilerinde (QPU) verimli çalıŐmasını sağlayan; algoritma derlemesi, devre sadeleŐtirme, kapı seviyesinde zamanlama optimizasyonu ve kaynak yönetimini üstlenen yazılım katmanlarının geliştirilmesidir.</i>	Yakın
7 Kriyojenik Sistemler ve Kuantum	Milikelvin (mK) Mertebesinde Kriyojenik Soğutma Sistemlerinin Geliştirilmesi:	Yakın

Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
Soğutma Teknolojileri	Süperiletken ve spin kübitli sistemlerin çalışması için kritik olan milikelvin (10–20 mK) seviyesindeki sıcaklıkları sağlayan seyreltme (dilution) buzdolapları ve kriyojenik kontrol sistemlerinin geliştirilmesini ifade eder.	
8 Kuantum Devre ve Kontrol Bileşenleri	Kuantum Hesaplama için Dinamik Devrelerin Geliştirilmesi: Kuantum hesaplama süreci devam ederken kübit durumlarını ölçebilen (mid-circuit measurement) ve bu sonuçlara göre sonraki kapı işlemlerini tetikleyebilen "feed-forward" (ileri beslemeli) mekanizmaların tasarımı (yazılım düzeyinde) kapsamaktadır.	Yakın

Tablo 11. OG-1 Uzak Vade Konu Önerileri

Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
1 Kuantum Güvenliği ve Kriptografi	Yerel Olmayan Kuantum Korelasyonlara (Non-local Correlations) Dayalı Veri SıkıŐtırma ve Kuantum Gizlilik Protokollerinin Geliştirilmesi: Kuantum dolaŐıklık ve yerel olmayan (non-local) korelasyonlardan yararlanarak bilgi aktarımında hem verimlilik (sıkıŐtırma) hem de mutlak gizlilik sağlayan ileri iletişim protokolleridir.	Uzak
2 Kuantum Algoritma, Simölasyon ve Optimizasyon	Kuantum Hata Düzeltme Algoritmalarının Geliştirilmesi: Kübitlerin çevresel gürültü, dekoherans ve kontrol hatalarına karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla geliştirilen algoritmalarıdır. Bu yöntemler, hataları tespit ederek hatalı fiziksel kübitlerden hata toleranslı mantıksal kübitler oluşturur.	Uzak
3 Kuantum Algoritma, Simölasyon ve Optimizasyon	Nükleer Kabuk Modeli için Kuantum Algoritmalarının Geliştirilmesi: Atom çekirdeğindeki nükleon etkileŐimlerini, parçacık çarpıŐmalarını ve enerji spektrumlarını modelleyerek temel fizik araŐtırmalarında klasik sistemlerin sınırlarını aÇan hesaplama yöntemleridir. İlgili hesaplamaların kuantum bilgisayarlarda daha verimli yapılmasını sağlayan algoritmalarıdır.	Uzak
4 Kuantum Algoritma, Simölasyon ve Optimizasyon	GPU/CPU ParalleleŐtirmesi ile Kuantum Algoritmalarının Klasik Sistemlerde Verimli Simölasyonu ve Yazılım Kütüphanelerinin Geliştirilmesi: Kuantum algoritmalarının klasik yüksek baŐarımlı bilgi işlem (HPC) altyapılarında GPU/CPU paralelleŐtirme teknikleri kullanılarak verimli biçimde simüle edilmesini sağlayan yazılım kütüphanelerinin geliştirilmesidir.	Uzak
5 Kuantum Algoritma, Simölasyon	Lojistik ve Operasyonel Süreçlerde Kuantum Hesaplama Algoritmalarının Uygulanması:	Uzak

	Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
	ve Optimizasyon	Tedarik zinciri optimizasyonu, rota planlama, üretim çizelgeleme ve kaynak tahsisi gibi karmaŐık operasyonel problemlerin çözümünde kuantum optimizasyon algoritmalarının (QAOA, VQE) uygulanmasını kapsar.	
6	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Tuzaklanmış İyon Sistemlerinin Elektromanyetik Simülasyonu ve Fiziksel Kübit Davranışlarının Modellenmesi Kuantum işlemcilerde kübit olarak kullanılan atomların (iyonların) boşlukta kararlı bir şekilde hapsedilmesini sağlayan elektromanyetik tuzakların dijital bir prototipinin oluşturulmasıdır. Bu kapsamda, henüz fiziksel üretim aşamasına geçilmeden önce; elektrik ve manyetik alan tasarımlarının iyon hareketleri üzerindeki etkileri bilgisayar ortamında analiz edilerek, dış gürültüye en dayanıklı ve hata payı en düşük donanım mimarisinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.	Uzak
7	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Yüksek Enerji Fiziği ve Parçacık Fiziği için Kuantum Algoritmaları Geliştirme ve Kuantum Optimizasyon Uygulamaları: Parçacık çarpışmaları, kuantum alan teorileri ve enerji spektrum analizleri gibi karmaŐık fiziksel sistemleri kuantum bilgisayarlar üzerinde modellemeyi amaçlayan algoritmalarıdır.	Uzak
8	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	oklu Giriş oklu ÇıkıŐ (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) ve Akıllı Yansıtıcı Yüzey (Intelligent Reflecting Surface, IRS) Sistemlerinde Kuantum Tabanlı Optimizasyon Algoritmalarının Geliştirilmesi: 5G/6G kablosuz iletişimde çoklu anten sistemlerinin (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) ve akıllı yansıtıcı yüzeylerin (IRS-Intelligent Reflecting Surfaces) optimizasyonunu kuantum hesaplama tabanlı algoritmalarla gerçekleŐtirmeyi hedefleyen yöntemlerdir.	Uzak
9	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Kuantum Algoritmalar ile Moleküler Simülasyon ve İlaç KeŐi: Moleküler yapıların elektronik enerji seviyelerini, bağlanma özelliklerini ve reaksiyon dinamiklerini doğrudan kuantum mekaniksel düzeyde simüle eden yüksek doğruluklu algoritmalarıdır.	Uzak
10	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Geribesleme Tabanlı Kuantum Algoritmalarının Geliştirilmesi: Gerçek zamanlı ölçüm sonuçlarını algoritmanın sonraki adımlarına dahil ederek sistemin evrimini dinamik olarak optimize eden adaptif kuantum kontrol yöntemleridir.	Uzak
11	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Yeni Nesil Malzeme KeŐi ve Modelleme: Yeni nesil malzemelerin elektronik yapıları, enerji bantları ve kuantum geçiş özelliklerinin modellenmesine yönelik olarak kuantum hesaplama ve kuantum tabanlı simülasyon yöntemlerinin kullanılmasını kapsamaktadır. Bu yaklaşımlar, malzeme keŐi ve	Uzak

	Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
		<i>endüstriyel Ar-Ge süreçlerinde hesaplama verimliliğini artırma potansiyeli taşımaktadır.</i>	
12	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Havacılıkta Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) Simülasyonlarının Kuantum Bilgisayarlar ile Hızlandırılması: <i>Havacılık ve savunma sanayiindeki yüksek maliyetli hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics, CFD) ve sonlu eleman analizi (Finite Element Analysis, FEA) gibi yüksek maliyetli mühendislik simülasyonlarını kuantum algoritmalarıyla hızlandırmayı amaçlayan yaklaşımlardır.</i>	Uzak
13	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Van der Waals Malzemelerde Defekt Tabanlı Katı Hal Kübitlerinin Geliştirilmesi ve Oda Sıcaklığında Kuantum Koherensinin Sağlanması: <i>Atomik düzeyde kusur (defekt) içeren van der Waals malzemelerinde spin tabanlı kübitlerin üretilmesi; oda sıcaklığında kararlı kuantum koherensi elde etmeyi amaçlayan bir yaklaşımdır.</i>	Uzak
14	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Süperiletken Kübit Devre Tasarımı, Üretimi ve Entegrasyonu: <i>Mikrodalga frekanslarında çalışan süperiletken devre elemanlarının (ör. Josephson eklemleri) kullanımıyla, kuantum bilgiyi taşıyan kübitlerin tasarımı, üretimi, karakterizasyonu ve ölçeklenebilir devre mimarilerine fiziksel entegrasyonu süreçlerini içerir. Josephson eklemlerini kullanarak düşük gürültü ve yüksek eşvrelilik (coherence) sürelerine sahip, mikrodalga rezonatörleri ile optimize edilmiş entegre devre tasarımlardır.</i>	Uzak
15	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Nötral Atom Tabanlı Kuantum İşlemci Birimi Geliştirilmesi: <i>Optik tuzakları (optical tweezers) kullanılarak belirli geometrilere dizilen nötr atomların, Rydberg durumları aracılığıyla etkileşime sokularak yüksek ölçeklenebilirlik sunan bir kuantum işlemci mimarisine dönüŐtürülmesini kapsar.</i>	Uzak
16	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Tuzaklanmış İyon Tabanlı Kuantum İşlemci Birimi Geliştirilmesi: <i>Elektrostatik tuzaklarda tutulan iyonların dinamik davranışlarının elektromanyetik simülasyonlarla modellenmesi; kübit manipülasyonu ve hata analizi süreçlerini optimize edilmesini kapsar.</i>	Uzak
17	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Soğuk Atom Kübit Tabanlı Kuantum İşlemci Birimi Geliştirilmesi: <i>Lazer soğutma teknikleri kullanılarak mutlak sifıra yaklaştırılan atom bulutlarının, kuantum bilgi işleme süreçleri için kararlı ve gürültüsüz bir ortamda kontrol edilmesidir.</i>	Uzak
18	Kuantum İşlemci Birimi	NV Merkezli Elmas Bazlı Kuantum Hesaplama İşlemci Birimi Geliştirilmesi:	Uzak

	Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
	ve Donanım Teknolojileri	<i>Elmas kristalinde nitrojen-boŐluk (Nitrojen Vacancy, NV) merkezlerini mikrokavite yapılarıyla birleŐtirerek optik okuma ve kontrol imkânı sunan katı hal kuantum işlemcilerinin geliştirilmesidir.</i>	
19	Kuantum Devre, Kontrol ve Donanım Bileşenleri	Fotonik Kuantum Bilgisayarlar için Entegre Optik Komponentlerin Geliştirilmesi: <i>Fotonik kuantum bilgisayarlarda, ıŐıŐın fazı, genliği ve polarizasyonu üzerindeki kontrolü hassas biçimde sağlayan voltaj kontrollü faz kaydırıcılar ve optik modülatörlerin geliştirilmesidir. Bu teknolojiler, entegre fotonik devrelerin dinamik olarak yeniden yapılandırılmasına olanak tanıyarak, kuantum iŐlemlerinin esnek, ölçeklenebilir ve çok amaçlı Şekilde programlanabilmesini de mümkün kılar.</i>	Uzak
20	Kuantum Algoritma, Simüasyon ve Optimizasyon	Kübit Kalibrasyon Teknolojilerinin Geliştirilmesi: <i>Kübitlerin bireysel ve sistem düzeyinde yüksek doğrulukla kontrol edilmesi için gerekli kalibrasyon protokolleri, hata ölçüm teknikleri ve otomatik ayarlama algoritmalarının geliştirilmesini kapsar. Amaç, kübit hata oranlarının azaltılarak daha güvenilir kuantum hesapaplama altyapılarının oluşturulması hedeflenmektedir.</i>	Uzak
21	Kuantum Yazılımları	Kuantum Memristör Tabanlı Yapay Zekâ Geliştirilmesi: <i>Kuantum memristör bileşenleri kullanılarak, bellek etkisinin kuantum sistemlerle entegre edildiği ve öğrenme ile karar verme süreçlerinin kuantum düzeyde gerçekleŐtirildiĐi hibrit yapay zekâ mimarilerinin geliştirilmesini kapsar.</i>	Uzak
22	Kuantum Devre, Kontrol ve Donanım Bileşenleri	Lineer Optik Devre ve Dedektör Tasarımı: <i>Fotonların süperpozisyon özelliklerini kullanarak kuantum bilgi işleme yapan dalga kılavuzu (waveguide) tabanlı devrelerin ve süperiletken nanotel dedektörlerin (Superconducting Nanowire Single-Photon Detector, SNSPD) tasarımıdır.</i>	Uzak
23	Kuantum Algoritma, Simüasyon ve Optimizasyon	Markov Olmayan Kuantum Devre Sentezi ve Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi: <i>Bellek etkisi içeren (Markov olmayan) kuantum sistemler için dinamik gürültü modellerine dayalı devre kontrol ve optimizasyon algoritmalarının tasarımıdır.</i>	Uzak
24	Kuantum İŞlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	İki Boyutlu Malzemelerde Kuantum Hesaplama İçin Foton Üretimi: <i>2 boyutlu malzemelerde (örneğin MoS₂, hBN) kusur mühendisliği yoluyla fotonik kübitlerin temel kaynağı olan yüksek verimli tekil foton kaynaklarının üretilmesidir.</i>	Uzak
25	Kuantum Algoritma, Simüasyon ve Optimizasyon	Kuantum Yapay Zekâ Destekli Büyük Veri Analitiği: <i>Klasik yöntemlerin ölçeklenme açısından zorlandığı büyük veri problemlerinde kuantum makine öğrenmesi algoritmaları</i>	Uzak

	Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
		<i>kullanılarak kümeleme, ngrsel analiz ve veri sınıflandırma çalışmalarının gerçekleştirilmesini kapsamaktadır.</i>	
26	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Kuantum Doğal Dil İŞleme Teknolojisi: <i>Doğal dilin anlam yapısını ve sözdizimini temsil etmek için kuantum bilgi kuramının süperpozisyon ve dolanıklık ilkelerini kullanan bir yaklaşımdır. Klasik doğal dil işleme (Natural Language Programming, NLP) yöntemlerinden farklı olarak, kuantum doğal dil işleme (Quantum Natural Language Programming, QNLP) modelleri kelimeler ve cümleler arasındaki bağlamsal iliŐkileri Hilbert uzaylarında temsil eder ve bu sayede dilsel anlamın daha yüksek boyutlu, bütüncül biçimde kodlanmasını sağlar.</i>	Uzak
27	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Kuantum Makine Ğrenmesi (Quantum Machine Learning, QML) Algoritmalarının Geliştirilmesi ve İyileştirilmesi: <i>Klasik makine öğrenmesi yöntemlerini kuantum süperpozisyon ve dolanıklık prensipleriyle birleŐtirerek daha yüksek boyutlu veri uzaylarında örüntü tanıma, sınıflandırma ve optimizasyon yapabilen algoritmaların tasarlanmasıdır. Bu alandaki çalışmalar, özellikle varyasyonel kuantum devreler (Variational Quantum Circuits, VQC), kuantum destek vektör makineleri (Quantum Support Vector Machines, QSVM) ve kuantum sinir ağları (Quantum Neural Network, QNN) gibi modellerin performansını artırmayı, hata dayanıklılığını geliŐtirmeyi ve klasik sistemlerle hibrit öğrenme mimarileri oluŐturmayı hedefler.</i>	Uzak
28	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Kuantum Veri Sınıflandırması ve Veri Kodlama: <i>Klasik verilerin kuantum kübit uzayına en düşük bilgi kaybıyla aktarılması ve kuantum durumları arasında sınıflandırma yapabilen öğrenme temelli algoritmalarıdır.</i>	Uzak
29	Kuantum Hesaplama Donanımları ve Yardımcı Elemanlar	Kuantum Bilgisayar Geliştirilmesi: <i>Donanım, kriyojenik altyapı ve kontrol elektroniğinin entegre edildiği, uçtan uca çalışan kuantum hesaplama platformlarının tasarımı, montajı ve sistem düzeyinde karakterizasyonudur.</i>	Uzak

7.1.3. GZFT Analizi

Türkiye'nin kuantum hesaplama alanındaki mevcut durumunu, güçlü araştırma kapasitesi, yetenekli insan kaynağı ve mevcut altyapı belirlemektedir. Kuantum OTAĞ alıŐmaları kapsamında kuantum hesaplama özelinde gerçekleştirilen GZFT (Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar, Tehditler) analizinin bulguları Türkiye'nin bu alandaki durumunu ve gelecekteki potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

**Güçlü Yönler:**

- Türkiye’de temel bilim ve mühendislik alanlarında uzmanlaşmış akademik kadrolar ve araştırma gruplarının mevcut olması,
- Üniversite laboratuvarlarında kuantum kriptografi ve ilgili donanım projeleri başta olmak üzere ulusal Ar-Ge çalışmalarının yürütülmesi,
- CERN gibi uluslararası merkezlerle yürütölen projelerde deneyim kazanmış araştırmacıların varlığı ve süperiletken devreler, fotonik sistemler ile MIMO sinyal işleme alanlarında bilgi birikimine sahip olunması,
- Kuantum algoritmalar, kuantum hata düzeltme, QNLP, QAOA, VQE gibi ileri düzey konularda hem akademik hem de uygulamaya dönük bilgi birikiminin bulunması,
- Ülkemizdeki kuantum etkinlikleri (QTurkey, TEKNOFEST Kuantum Hackathon, vb.) sayesinde genç araştırmacıların hızla ekosisteme kazandırılması,
- Fizik, mühendislik, bilgisayar bilimi ve matematik alanlarından uzmanların disiplinlerarası iş birliği içinde çalışması ve bilgi paylaşımının sağlanması,
- Savunma, iletişim ve finans alanlarında kamu kurumlarının ilgisi ve konuya stratejik öncelik vermesi, ekosistemin büyümesinin hızlanması.

Zayıf Yönler:

- Süperiletken, iyon tuzağı ve fotonik kübit sistemleri için gerekli kriyojenik, litografi ve ölçüm altyapıları ile ulusal üretim kapasitesinin kısıtlı olması,
- Yüksek maliyetli donanım ve uzun Ar-Ge süreçleri için yeterli yatırım ve sürdürülebilir finansmanın sınırlı olması,
- Kuantum hesaplama, yazılım ve donanım alanlarında nitelikli işgücü açığıının bulunması,
- Kuantum teknolojilerinde akademi, sanayi, kamu iş birliği mekanizmalarının yeni kurumsallaşması ve ulusal strateji uygulamalarının erken aşamada olması,
- Kuantum teknolojilerinde sektörel farkındalığın az olması,
- Üniversitelerde lisans düzeyinde kuantum dersleri ve uzmanlık programları sınırlı olması.

Fırsatlar:

- Uluslararası yüksek bütçeli kuantum programlarında erişim imkânı, iş birliği ve proje yürütme fırsatlarının olması,



- Türkiye'nin savunma sanayi, haberleşme ve siber güvenlik alanlarında sahip olduğu deneyimin kuantum teknolojilerinin stratejik uygulamalarına adaptasyon potansiyeli sunması,
- Kuantum kriptografi ve optimizasyon algoritmalarının geliŐmesi ile savunma sanayiinde stratejik üstünlük sağlaması,
- Finans, ilaç geliştirme, lojistik ve malzeme bilimi gibi sektörlerde kuantum hesaplamanın erken benimsenmesinin yüksek ticari değer yaratma potansiyeli sunması,
- Qiskit, Cirq ve PennyLane gibi açık kaynak platformlara donanım bağımlılığı olmadan eğitim ve geliştirme amaçlı erişim imkânının bulunması,
- Genç mühendis ve bilim insanlarının çeşitli etkinlikler ile (TEKNOFEST, QTurkey, vb.) kuantum teknolojilerine yönlendirilmesi,
- Kuantum teknolojilerinin bilim, savunma ve sanayi politikalarında öncelikli alan olarak konumlanması ve yakın, uzak vadeli yol haritalarının oluşturulması,
- Kuantum tabanlı çözümler ile yeni pazarların oluşması.

Tehditler:

- lkelerin ve teknoloji Őirketlerinin (IBM, Google, Amazon, vb.) büyük ölçekli yatırımlarla teknoloji liderliğini pekiŐtirmesi,
- Kritik bileşenlerin ve üretim ekipmanlarının yurt dıŐına bağımlılığın bulunması nedeni ile ulusal kapasite gelişiminin sınırlı olması
- Uluslararası Őirketlerin sahip olduğu patent portföyleri, yerli girişimlerin rekabet alanını kısıtlaması,
- YurtdıŐındaki yüksek gelir ve araştırma imkânlarının nitelikli insan kaynağını çekmesi,
- Finansman kısıtının, uzun vadeli altyapı yatırımlarının planlanmasına ve sürdürülebilirliğine olumsuz etkisi,
- Kriptografi sistemlerinin kuantum bilgisayarlar tarafından kırılabilir hale gelmesi ile siber güvenlik risklerinin oluşması,
- Teknolojinin olgunlaŐmasının ve lçklenebilir sistemlerin geliŐtirilmesinin zaman alması, yatırımın geri dönüŐünün gecikmesi.

7.1.4. Değerlendirmeler

Kuantum hesaplama teknolojilerinin, klasik hesaplamaa kıyasla bilgi işlem, güvenlik altyapıları, iletişim sistemleri ve hassas ölçüm uygulamalarında önemli üstünlük sağlayacağı değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, dünya genelinde kamu destekli programlar, özel sektör yatırımları ve akademik iş birlikleri ile kuantum ekosistemi hızla gelişmekte ve giderek daha



olgun bir yapıya ulaşmaktadır. Özellikle Avrupa Birliği'nin (AB) Kuantum Amiral Gemisi (Quantum Flagship) Programı, ABD'nin Ulusal Kuantum Girişim (National Quantum Initiative) Stratejisi ve Çin'in ulusal Ar-Ge yatırımları bu alandaki küresel rekabeti oluşturmaktadır. Ayrıca Japonya, Kanada ve Avustralya gibi ülkelerde yürütölen ulusal kuantum programları küresel ölçekte bilgi birikimi ve uygulama kapasitesinin artmasına katkı sağlamaktadır.

Kuantum hesaplama alanında dünya genelinde rekabet, hem donanım hem de yazılım alanlarındadır. Günümüzde kuantum işlemci biriminin geliştirilmesinde süperiletken, tuzaklanmış iyon, fotonik ve nötr atom temelli teknolojiler çalışılmakta olup hata oranlarının azaltılması, koherens süresinin uzatılması ve çok sayıda kübite sahip işlemcilerinin geliştirilmesine yoğunlaşmıştır. IBM, Google, IonQ, Rigetti, Pasqal, IQM, Atom Computing ve Quantinuum gibi firmalar süperiletken, tuzaklanmış iyon, nötr atom ve fotonik tabanlı kuantum işlemciler geliştiren öncü kuruluşlardır. Oda sıcaklığına yakın çalışan spin veya fotonik tabanlı sistemler ile topolojik, nötr atom ve süperiletken hibrit yaklaşımları gibi yeni kübit türleri, ölçeklenebilirlik ve enerji verimliliği açısından umut vaat eden teknolojiler üzerinde çalışmalar devam etmektedir [19]. Önümüzdeki dönemde çalışmalar daha kararlı ve entegre edilebilir kuantum donanımları geliştirmek, hata toleransını artırmak ve kuantum sistemlerinin klasik süper bilgisayar altyapılarıyla etkin biçimde bütünleştirilmesini sağlamak yönünde olacaktır.

Avrupa'da Kuantum Amiral Gemisi Programı kapsamında yürütölen projeler ağırlıklı olarak fotonik ve silikon tabanlı çip entegrasyonuna odaklanırken, Japonya ve Kanada'da hibrit süperiletken-spin kübit yaklaşımları üzerine araştırmalar sürdürölmektedir. Avrupa'da klasik elektronik ve optik bileşenlerin entegrasyonuna dayanan elektronik-fotonik kuantum çipler geliştirilmekte ve bu sayede ölçeklenebilirlik ile üretilebilirlik açısından yeni olanaklar ortaya çıkmaktadır [20]. IBM'in Quantum System One ve Google'ın Sycamore işlemcileri, süperiletken mimaride ölçeklenebilirlik çalışmalarını sürdürürken IonQ ve Quantinuum, iyon tuzağı teknolojilerinde yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Avrupa merkezli IQM ve Pasqal ise sırasıyla süperiletken ve nötr atom tabanlı sistemlerde üretim kapasitesini artırmaya yönelik çalışmalar yürötmektedir.

Donanımların henüz kısıtlı olması nedeniyle günümüzde NISQ dönemine uygun hibrit algoritmalar (VQE, QAOA, HHL- HyperLogLog, vb.) ön plandadır. Kuantum bilgisayarların sınırlamaları nedeniyle, klasik yüksek performanslı sistemlerle entegre hibrit mimariler ve bu sistemleri optimize eden yapay zekâ algoritmaları günümüzde küresel araştırmaların temel odak alanlarından biridir. Son yıllarda, hibrit kuantum–klasik hesaplama mimarileri, kuantum hata düzeltme yöntemleri ve uygulamaya özgü yazılımlar bilimsel ve teknolojik araştırma alanlarında odak noktası olmuştur. Bulut tabanlı kuantum erişim hizmetleri (IBM Quantum, Amazon Braket, Microsoft Azure Quantum, vb.) aracılığıyla kullanıcılar donanım bağımsız deneyler yürötebilmektedir.



Kuantum makine öğrenmesi alanında, kuantum sinir ağları, kuantum çekirdek yöntemleri ve hibrit klasik–kuantum öğrenme modelleri üzerine yürütölen çalışmalar giderek yoğunlaŐmakta olup Google, IBM, Xanadu ve Quantinuum gibi öncü kurumlar bu alanda aktif araştırma programları sürdürmektedir. Bu uygulamalı gelişmelere ek olarak, teorik araştırmalar kuantum bilgi teorisi, hesaplama karmaŐıklığı, hata düzeltme, kübit topolojileri ve kuantum devre modellemesi gibi temel konulara odaklanmaktadır. Söz konusu çalışmalar, algoritma verimliliği ile donanım gereksinimleri arasındaki iliŐkinin belirlenmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Bu alan, algoritma verimliliği ve donanım gereksinimleri için belirleyici rol oynar. ABD, Almanya, İsrail ve Singapur gibi ölkelerdeki araştırma merkezlerindeki çalışmalar (ör. Perimeter Institute, Max Planck Institute for Quantum Optics, vb.) küresel bilgi için öncüdür. Böylece, matematiksel olarak temellendirilmiş hata toleranslı modellerin geliştirilmesi, simölasyon destekli optimizasyon yaklaşımlarının ilerletilmesi ve kuantum ađ protokollerinin kuramsal çerçevesinin oluŐturulmasına yönelik çalışmalar giderek artmaktadır.

Kuantum bilgisayar teknolojilerinin ilerlemesiyle klasik Őifreleme sistemlerinin güvenliği zayıflamakta, bu durum PQC çalıŐmalarına ve QKD teknolojilerine olan yönelimi hızlandırmaktadır. ABD NIST, PQC standartlarını 2024 yılında yayımlayarak küresel geçiş sürecini resmen baŐlatmıŐtır [[12], [21]]. Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) ve Avrupa Birliği Siber Güvenlik Ajansı (European Union Agency for Cybersecurity, ENISA), kuantuma dayanıklı güvenlik stratejilerini ulusal ađ güvenliğine dahil etmektedir [22]. QKD alanında özellikle in’de Pekin–Őanghay arasında yaklaşık 2.000 km uzunluğunda bir hat kurulmuŐtur. Ayrıca Almanya, Japonya ve Güney Kore gibi ölkelerde QKD teknolojileri ulusal ve bölgesel olarak pilot ölçekli uygulamalar çerçevesinde geliştirilmektedir.

in, Hefei merkezli Ulusal Kuantum Bilgi Bilimleri Laboratuvarı (National Laboratory for Quantum Information Science) ile fotonik ve süperiletken donanımlar alanında büyük ölçekli devlet güdümlü yatırımlar yapmaktadır. in, Kuantum Hesaplama özelindeki patent baŐvurularında küresel liderdir [23].

Kuantum hesaplama, kuantum işlemci birimi ve donanım teknolojileri, kuantum devre ve kontrol bileşenleri, kriyojenik sistemler ve kuantum soğutma teknolojileri, kuantum yazılımları, kuantum algoritmaları, simölasyonları ve optimizasyonu, kuantum güvenliği ve kriptografi gibi alt alanlardaki gelişmeler, ölkelerin bilimsel ve ekonomik rekabet gücünü doğrudan etkilemektedir. Küresel ölçekte kuantum teknolojilerinin gelişimi, artan kamu yatırımları ile özel sektör girişimlerinin katkılarıyla birlikte artmaktadır. Uluslararası eğilimler, çok paydaŐlı iş birliklerinin güçlendirilmesi, standartlaŐma faaliyetlerinin kurumsallaŐtırılması, kuantum bulut



hizmetlerinin yaygınlaŐtırılması, siber güvenlik uygulamalarının geliştirilmesi ve donanım odaklı üzümlerin ticarileŐtirme süreçlerinin hızlandırılması yönünde yoĐunlaŐmaktadır.

Türkiye’de son yıllarda kamu kurumları, büyük sanayi kuruluşları, niversiteler, araştırma merkezleri ve KOBİ’lerin kuantum teknolojilerine yönelik çalıŐmalarıyla ülkemizdeki kuantum ekosistemi Őekillenmektedir.

Türkiye’nin kuantum teknolojileri alanındaki en güçlü dayanağını, temel bilimler ve mühendislik disiplinlerindeki köklü birikime sahip niversiteler oluşturmaktadır. Öncelikle Bilkent Üniversitesi, Boğaziçi Üniversitesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Hacettepe Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi (İT), İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE), Koç Üniversitesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), Sabancı Üniversitesi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi (TOBB ET) ve Özyeğin niversitesi gibi kurumlar, temel kuantum teorileri, kuantum teknolojileri, kuantum optik sistemler, kuantum donanımlar ve kuantum algoritmaları konularındaki araŐtırmalarıyla nitelikli insan kaynağı yetiŐtirmektedir. TOBB ET tarafından, QuanT sisteminin geliştirilmesi, kuantum ip tasarım ve ölçüm süreçlerine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Donanım çalışmalarının temelini oluŐturan malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanında ise Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM), Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (SUNUM) ve TÜBİTAK UME (Ulusal Metroloji Enstitüsü) gibi ulusal araştırma merkezleri çalışmalarını yrtmektedir.

lkemizde ayrıca kuantum teknolojilerine yönelik topolojik yalıtkan araŐtırmaları, ince film üretimi ve karakterizasyonu, teorik modelleme ve iki boyutlu malzeme konularında akademik düzeyde çeşitli üniversitelerde çalışmalar srdrlmektedir.

Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji ve Araştırma Merkezi’nde (NANOTAM) kuantum teknolojilerine yönelik araştırma faaliyetleri yrtmektedir.

TÜBİTAK, kuantum teknolojileri alanında birçok çalışma yürütmekte olup TÜBİTAK UME tarafından ölçüm bilimi (metroloji), siber güvenlik ve savunma stratejilerinde kuantum güvenliğine erken aşamada hazırlık yapılması amacı ile TÜBİTAK BİLGEM UEKAE tarafından PQC, QKD ve kriptografik alanında çalışmalar yrtlmektedir [24].

Türkiye’de kuantum teknolojileri alanındaki özel sektör ekosistemi, son yıllarda hem donanım hem de yazılım odaklı Ar-Ge faaliyetlerinin artmasıyla birlikte giderek çeŐitlenmektedir. Bu kapsamda, özellikle kuantum güvenliği ve kriptografi alanına yönelik zmler geliştiren giriŐimler ne çıkmaktadır.



Qubitrium kuantum güvenliği ve QKD zmleri üzerine çalıŐmaktadır [25]. Cyber Quanta PQC ve kuantum güvenli aĐ protokolleri üzerine yoğunlaşmıştır [26]. Kuanticity, kuantum teknolojileri alanında mühendislik, danıŐmanlık ve eğitim hizmetleri sunan bir girişim olup, özellikle eğitim ve araştırma amaçlı masaüstü kuantum sistemleri sağlamaktadır [27]. Quantum PIYA kuantum algoritmaları ve yapay zekâ uygulamaları üzerinde çalışmalar yrtmektedir [28]. QLocked tek foton seviyesinde ışık-madde etkileŐimlerine dayalı nanofotonik zmler ve güvenli iletişim teknolojileri geliştirmektedir [29]. Qavis kuantum tabanlı simlasyon ve optimizasyon teknolojileri üzerine çalıŐmaktadır [30]. Phi0 Technologies süperiletken elektronik devreler ve kuantum hesaplama alanında çalıŐmaktadır [31]. Q&Co kuantum teknolojilerine yönelik yazılım ve donanım çalışmaları yrtmektedir [32]. QReady Kuantum Teknolojileri ve DanıŐmanlık firması otomotiv, tekstil, lojistik ve imalat gibi sektörlerde üretim verimliliği ve ölçülebilir performans artıŐları sunan hibrit kuantum-klasik optimizasyon zmleri geliştirmektedir [33]. NanoMagnetics Instruments tarafından düşük sıcaklık ölüm sistemlerine yönelik çalışmalar yrtmektedir [34].

ASELSAN tarafından yurt içi paydaŐları içeren proje modeli çerçevesinde kuantum hesaplama konusunda süperiletken kuantum işlemci birimi geliştirilmesine yönelik çalışmalar yrtlmektedir.

T3 (Türkiye Teknoloji Takımı) Vakfı'nın Teknofest kapsamında farklı kuruluşlar önderliğinde organize ettiği Kuantum Teknolojileri YarıŐmaları [[35], [36]], gençlerin alana ilgisini artırırken; QTurkey topluluğu ve Quantum Student Branches (Quantum Student Branches, QSB) yapılanmaları tarafından düzenlenen hackathon ve eğitim etkinlikleri, öğrencilerin ve araŐtırmacıların kuantum algoritmaları ve uygulamaları konusunda pratik deneyim ve yetkinlik kazanmalarına olanak sağlamaktadır. Ayrıca QTurkey, QSB gibi giriŐimler yazılım, algoritma ve insan kaynağı geliŐimini destekleyen önemli çalışmalar yrtmektedir [[37], [38]]. İYTE Kuantum Topluluğu ve QTurkey tarafından çeşitli paydaşların desteğiyle düzenlenen "Quantum Days" etkinliği gibi ulusal konferanslar, akademik topluluklar arasındaki iş birliğini güçlendirmektedir. Ankara niversitesi tarafından düzenlenen Uluslararası Süperiletken ve Manyetizma, Kuantum Malzemeleri ve Teknolojileri konferansı düzenlenmektedir.

Uluslararası düzeyde, Eureka Network Uygulamalı Kuantum Teknolojileri ağrıları [[39], [40]] araŐtırmacı ve giriŐimcilere destek sunarken; Türkiye'nin de paydaŐ olduğu NATO DIANA Programı [41], ift kullanımlı yenilikçi teknolojiler için hızlandırma, aĐ kurma ve uluslararası iŐbirliĐi fırsatları yaratmaktadır.

Savunma sanayi, kuantum teknolojilerinin kazanımında önemli bir rol almaktadır. Savunma Sanayii Başkanlığı, Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı tarafından kuantum teknolojilerindeki küresel gelişmeler dikkate alınarak 2020 yılında Kuantum Teknolojilerinin

Geliştirilmesi Programı başlatılmış olup kuantum hesaplama, kuantum algılama ve kuantum haberleşme konularında projeler yrtlmektedir. Bu Program ile, yurt içindeki mevcut altyapı, insan gücü ve bilgi birikiminden en yüksek oranda yararlanacak Şekilde kuantum teknolojilerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, NATO'nun Kuantum Teknolojileri Stratejisi Belgesi doğrultusunda 2024 yılında kurulan Transatlantik Kuantum Topluluğu (Transatlantic Quantum Community, TQC) alıŐmaları kapsamında Türkiye Ulusal Heyet Başkanlığı, Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı Kuantum ve İleri Algılayıcı Teknolojileri Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Başkanlığımız tarafından kuantum teknolojilerine yönelik farkındalığın arttırılması, insan kaynağının geliştirilmesi ve yurt içi kuantum ekosisteminin gclendirilmesi amacı ile **“Türkiye Kuantum Platformu”** isimli dijital portal kurulmuŐtur. Başkanlığımız tarafından YK ve Ankara Üniversitesi, Bilkent Üniversitesi, Boğaziçi Üniversitesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Hacettepe Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Koç Üniversitesi, ODTÜ, Özyeğin Üniversitesi, Sabancı Üniversitesi, TOBB ET olmak üzere 11 niversite ile Savunma Sanayii Kuantum Teknolojileri Stratejik Yetkinlik Geliştirme İŞ Birliği Protokolü, Haziran 2026 döneminde imzalanacaktır. Kuantum algoritmalarına yönelik çalıŐmaların gerçekleŐtirilmesi için uluslararası katılımcıların da yer alabileceği kuantum algoritma yarışması da Haziran 2026 döneminde duyurulacaktır.

7.1.5. Sonuç

Kuantum Hesaplama Odak alıŐma Grubu-1 alanında lkemizde yazılım, algoritma geliştirme, teorik altyapı ve nitelikli insan kaynağı konularında yetkinlik bulunmaktadır. OG-1 yakın vadeli konular kapsamında öncelik, kuantum güvenliği ve kriptografi alt konu baŐlıĐı olup bu konu kapsamında kuantum dirençli kriptograflerin geliştirilmesi ve kuantum bilgisayarların mevcut klasik kriptografik sistemlere (RSA, ECC vb.) yönelik oluŐturacaĐı yıkıcı tehditlere karşı önlemlerin alınmasıdır.

Türkiye, gcl matematik ve bilgisayar bilimleri geleneği sayesinde, donanım bağımsız kuantum algoritmaları, optimizasyon problemleri ve makine öğrenmesi uygulamalarında hızlı bir adaptasyon sağlamakta olup kısa vadede katma değer yaratabilecek potansiyele sahiptir. Ayrıca kuantum algoritma geliştirme, hibrit hesaplama yazılımları, kuantum simlasyonları ve kuantum eğitim ekosistemi alanlarında geliŐim sağlayabileceği öngörülmektedir. Bununla birlikte, kuantum algoritma geliştirme konularında yetkin insan kaynağının uluslararası açık kaynak kütüphanelerle (Qiskit, PennyLane, Cirq, Q#, vb.) entegre olarak çalışabilmesi sağlanmalıdır.

Gelişen farklı kübit teknolojileri kuantum hesaplamada farklı teknolojilere sahip bilgisayarların gelişiminin hızlanmasına ve ne geçmesine neden olabilecektir. Bu geliŐimler günümüz kuantum bilgisayarlarının sahip olduğu zorlukların aŐılmasına çözüm yaratabilir. Kuantum



hesaplamaya yönelik farklı teknolojiler eş zamanlı olarak dünya çapında çalıŐılmaktadır. Bu alıŐmalar sonucunda bugünden daha farklı teknolojiler halihazırda nde görülen teknolojilerin önüne geçebilecektir. Bu çalıŐmaların çok çeşitli olması ve hangi teknolojinin ön plana çıkacağının henüz belirsiz olması lkemizde eş zamanlı farklı teknolojilere yönelik insan kaynağının yetiŐtirilmesi ve kuantum işlemci birimi ve donanım teknolojilerine yönelik Ar-Ge projelerinin desteklenmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

Kuantum devre ve kontrol bileşenlerinin yerli üretimi için yariletken ve optoelektronik üretim altyapılarıyla teknolojinin kazanımına yönelik çalıŐmaların yapılması gerektiği değerlendirilmektedir.

Kuantum alanındaki yazılım uygulamalarına yönelik gelişen korumacı yaklaşım nedeniyle ulusal paydaşların kütüphanelerinin eriŐiminin sınırlandırılmasına karŐın ulusal kuantum yazılım kütüphanesinin akademik ve çeşitli sektör paydaŐları ile hazırlanması gerekeceği değerlendirilmektedir. Bu kütüphane kübit kalibrasyon ve okuma yazılımlarından kuantum algoritmaların gerçekleŐtirilmesine kadar geniş bir yelpazeyi kapsayabilir.

Kuantum hesaplama ekosistemi, donanım, yazılım, teori üçgeninde bütünleŐik bir geliŐim göstermektedir. Küresel ölçekte eğilimler, ölçeklenebilir donanım mimarileri, kuantum-dayanıklı güvenlik yapıları, yapay zekâ destekli optimizasyonlar ve kuantum hesaplama donanımları ve yardımcı elemanlara yönelik teknolojiler etrafında Őekillenmektedir. Bu alanlarda devlet destekli Ar-Ge programları/projeleri, özel sektör ve akademi iş birlikleri stratejik önem taşımaktadır. Uzun vadede hedef, hata toleranslı, ölçeklenebilir ve ekonomik olarak uygulanabilir kuantum bilgisayar sistemlerine ulaŐmaktır.

7.2. Kuantum Algılama Odak alıŐma Grubu-2 (OG-2)

7.2.1. Genel Bilgi

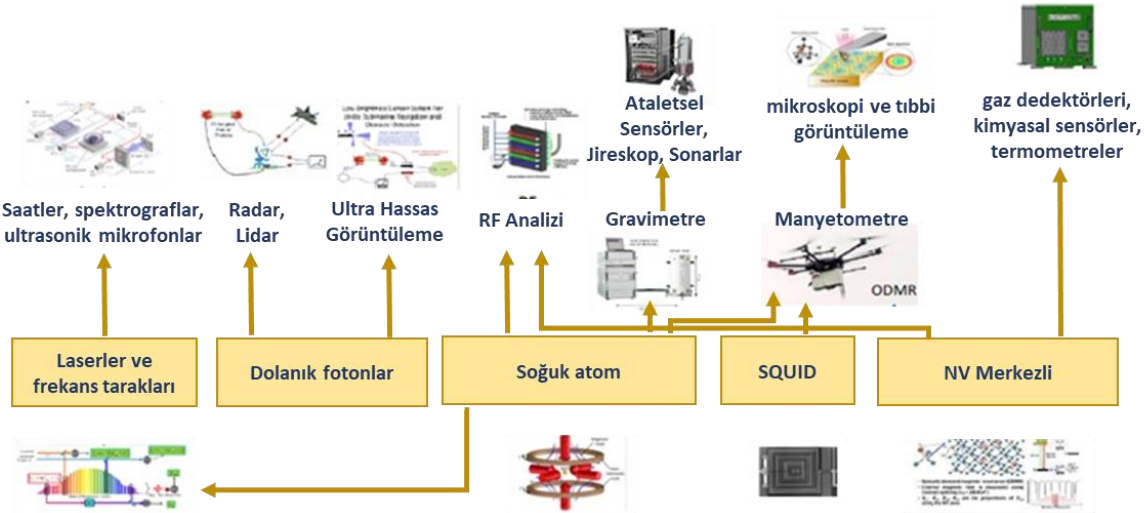
Kuantum algılama; zaman, mesafe, sıcaklık, hareket, ivme, basınç, yerçekimi, manyetizma, iŐık frekansı ve elektromanyetik spektrum gibi birçok fiziksel parametreyi çok daha yüksek hassasiyetle ölçmeyi hedeflemektedir. Bu hedefin temelinde, süperpozisyon, dolanıklık ve kuantum belirsizlik gibi ilkelerin, sensör olarak kullanılan fiziksel sistemlere doğrudan uygulanması yer almaktadır.

Kuantum sensörler, bazı uygulamalarda klasik sensörlerle eriŐilmesi zor olan düşük sinyal seviyelerinde daha yüksek hassasiyet, kararlılık veya mutlak ölçüm kabiliyeti sağlayabilir.

Kuantum metroloji, kuantum fiziğini kullanarak bir niceliği ne kadar hassas lebileceğimizi inceleyen bilim dalıdır. Kuantum metroloji ve algılama, 2019'da yeniden tanımlanan SI birim

sisteminin temelini oluŐturmuŐtur. Saniye, sezyum atomundaki kuantize geçiş frekansına, kilogram ise Planck sabitine dayalı kuantum metrolojik ölçümler kullanılarak tanımlanmıŐtır.

Kuantum algılama teknolojileri radarlar, sonarlar, atomik saatler, manyetometreler ve tıbbi görüntüleme uygulamalarında kullanılabilir. Bu uygulama alanlarında soğuk atomlar, NV merkezleri, iyon tuzakları ve süperiletken devreler gibi farklı kuantum sensör mimarileri kullanılmaktadır. **Şekil 9**'da kuantum algılama teknolojilerinin kullanıldığı uygulama alanları gösterilmektedir.



Şekil 9. Kuantum Algılama Teknolojilerinin Kullanıldığı Uygulama Alanları [5]

Kuantum lüm teknolojileri, lazerler ve dolanık fotonlar gibi fotonik sistemlerin yanı sıra soğuk atomlar ve NV merkezleri gibi ileri düzey kuantum sistemlerinden kapsamlı biçimde yararlanmaktadır.

Günümüzde kuantum algılama teknolojilerinin hizmet edeceği pazarlar ulaŐım, medikal görüntüleme, enerji, haberleşme, havacılık, uzay ve savunma olarak sıralanabilir. Kuantum algılama, kuantum bilgisayarlara kıyasla daha olgun bir teknoloji alanıdır ve bazı uygulamalar yüksek teknoloji hazırlık seviyelerine ulaşmıştır. Atomik saatler, atomik gravimetreler ve NV merkez tabanlı manyetometreler halihazırda ticarileşmiş ve saha uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu teknolojinin daha da yaygınlaŐması minyatürleştirme, maliyet ve uygulama parametrelerindeki (alıŐma sıcaklığı, boyut, ağırlık, sağlamlık, kullanım kolaylığı, entegrasyon, vb.) gelişmelere bağlı olarak beklenmektedir.

Kuantum Manyetometre

Kuantum manyetometreler, manyetik alanın çok küçük değişimlerini ve seviyelerini yüksek hassasiyetle tespit etmek için kullanılır. Bu algılama birimlerinin, navigasyon, mineral keŐfi, akım tespiti, malzeme muayenesi, Küresel Konumlama Sistemi'nin (KKS) alıŐmadıĐı



tünellerde dronların ve otonom araçların yönlendirilmesi, sonar, hareket eden metal nesnelerin tespiti ve hücresel görüntüleme gibi birçok kullanım alanı vardır.

Yüksek hassasiyetli manyetometre için birçok teknik mevcuttur ve aralarındaki fark, hassasiyetlerine karŐılık gelen manyetik gürültü ve geometrik doğruluklarıdır.

- **Süperiletken Kuantum Girişim Aygıtı (Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)**, Josephson eklemleri kullanarak manyetik akıya duyarlı süperiletken girişim etkisinden yararlanır ve en hassas manyetik alan sensörleri arasında yer alır.
- **SERF (Spin-Exchange Relaxation-Free) atomik manyetometreler**, alkali atom buharı kullanarak çok düşük manyetik alanların ölçümünü sağlar ve SQUID'lere alternatif olarak biyomanyetik ölçümlerde kullanılmaktadır.
- **Soğuk atom gazları ve Bose–Einstein yoĐuŐmaları**, atom interferometrisi ve spin-presesyon ölçümleri kullanarak yüksek hassasiyetli manyetik alan ölçümleri yapabilir.
- **Rydberg atom sensörleri**, yüksek ana kuantum sayısına sahip atomların çok büyük elektrik dipol momentlerinden yararlanarak zayıf elektrik alanları ve RF/mikrodalga sinyallerini yüksek hassasiyetle algılayabilir. Bu sensörler güvenilir Rydberg geçiş frekansları sayesinde metrolojik izlenebilirlik sağlayabilir. Elektromanyetik alan ölçümü ve kablosuz haberleşme sinyallerinin doğrudan tespiti gibi uygulamalarda kullanılabilir.
- **Moleküler spin toplulukları ve paramanyetik malzemeler**, elektron spin rezonansı temelli ölçümler ile zayıf AC manyetik alanların algılanmasında kullanılabilir.
- **Optomekanik manyetometreler**, manyetik alanın neden olduğu mekanik deformasyonları optik interferometri ile ölçerek yüksek hassasiyetli algılama sağlar.
- **NV merkezleri**, elmas kristalindeki spin kusurlarıdır ve optik olarak okunabilen spin durumları sayesinde oda sıcaklığında nanoskalada manyetik alan ölçümü yapılmasını sağlar. Bu zellikleri nedeniyle biyolojik görüntüleme, malzeme karakterizasyonu ve kuantum manyetometri uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kuantum Görüntüleme (Radar, Lidar, Mikroskop, MRI)

Kuantum algılama, hem mikro hem de nano seviyelerde görüntülemede kullanılmaktadır.

- **SQUID'ler**, klasik olarak helyum-4 tabanlı kriyojenik sistemlerde, ultra-düşük alan Manyetik Rezonans Görüntüleme (Magnetic Resonance Imaging, MRI) sistemlerinde ve biyomanyetik ölçümlerde kullanılır.
- **Süperiletken SNSPD kameralar** astrofizikte kullanılabilir.
- **Kuantum artırımı Raman mikroskopisi**, parlak sıkıştırılmış tek ışın kullanarak Uyarılmış Raman Saçılması (Stimulated Raman Scattering, SRS) sürecinin optimal verimliliğinde çalışmayı sağlar.



- **Dolanıklık tabanlı mikroskopisi**, kuantum mikroskopisi veya mevcut geniş alan kuantum görüntüleme yöntemleri kullanmaktadır.
- **Termal ışık tabanlı kuantum algılama**, termal veya korelasyonlu ışık kaynakları kullanılarak, düşük foton sayısında bile istatistiksel korelasyon ölçümleri ile görüntüleme yapılabilir. Bu yöntem özellikle düşük sinyal seviyelerinde klasik algılama yöntemlerine göre avantaj sağlayabilir.
- **Süper çözünürlüklü görüntüleme**, pasif uzaktan algılama için mikrodalga alanında interferometri kullanır. Uydu aracılığıyla toprak nemi, okyanus tuzluluğu ve zemin sıcaklığını tespit etme gibi uygulamalar içermektedir.
- **Lazer interferometri**, kuantum artırılmış interferometri, sıkıştırılmış veya dolanık ışık kullanarak faz duyarlılığını artırır ve bu sayede moleküler ve biyolojik sistemlerin yüksek hassasiyetle incelenmesine olanak sağlar. Bu yöntem shot-noise sınırının ötesinde hassasiyet elde edilmesini mümkün kılar.
- **Işık alanı mikroskopisi (Light Field Microscopy, LFM)**, bir sahneyi aydınlatan ışığın konum ve açısal momentumunu kullanarak hacimsel bilgilerin aynı anda yakalanmasını sağlar.
- **Tek piksel kameralar**, uzaysal modülasyon ve korelasyon ölçümleri kullanarak tek bir dedektör ile görüntünün yeniden oluşturulmasını sağlar. Bu yaklaşım düşük ışık seviyelerinde ve gürültülü ortamlarda etkin görüntüleme imkânı sunar.
- **Dev manyetodirenç (Giant Magnetoresistance, GMR) mikroskopları**, mükemmel nanoskalada mekansal çözünürlük sunar, ancak çok daha düşük alan hassasiyetine sahiptir. Sensör, ince filmlerle yapılır ve piezoelektrik aktüatörler kullanılarak incelenen örneğin üzerinde hareket ettirilir.
- **NV merkezleri görüntüleyiciler**, NV merkez tabanlı kuantum görüntüleme, elmas içindeki tek spinlerin optik olarak okunması ile nanoskalada manyetik alan ve sıcaklık haritalaması yapılmasını sağlar. Bu teknik oda sıcaklığında çalışabilir ve tek moleköl seviyesine kadar yüksek mekansal çözünürlük sunar.
- **Kuantum RADAR (Radio Detection and Ranging)**, dolanık foton çiftleri kullanarak bir fotonu hedefe gönderir ve diğerini referans olarak saklar. Hedeften dönen sinyal, referans foton ile ortak korelasyon ölçümleri kullanılarak karşılaştırılır ve yüksek gürültü ortamlarında zayıf hedeflerin tespiti mümkün olur.
- **Işık Algılama ve Mesafe Ölme (Light Detection and Ranging, LIDAR)**, tek foton algılama, sıkıştırılmış ışık veya korelasyon tabanlı ölçüm teknikleriyle düşük foton bütçesinde menzil ve görüntüleme performansını artırmayı hedefleyen sistemlerdir.
- **Hayalet Görüntüleme**, nesne ile doğrudan etkileşime girmeyen bir ışık demeti aracılığıyla görüntü elde edilmesini sağlayan bir görüntüleme tekniğidir. Hayalet



görüntüleme, kuantum dolanık foton çiftleriyle veya klasik olarak korelasyonlu/termal ışık kaynaklarıyla gerçekleştirilebilen korelasyon tabanlı bir görüntüleme yöntemidir. Sistem, nesneyle etkileşen ışık ile doğrudan ölçüm yapılmayan ancak onunla istatistiksel olarak ilişkili olan ikinci ışık demeti arasındaki korelasyonları analiz ederek nesnenin uzaysal özelliklerini yeniden yapılandırır. Bu yaklaşım sayesinde, doğrudan görüntüleme yöntemleriyle elde edilmesi zor olan bilgilerin dolaylı biçimde çıkarılması mümkün olmaktadır; özellikle düşük ışık koşullarında, gürültülü ortamlarda veya gizli nesnelerin tespitinde yüksek hassasiyet ve etkinlik sağlamaktadır.

Kuantum Akustik Sensörler

Akustik sistemler, malzemelerdeki mekanik titreşimlerin kuantum birimi olan fononların kontrolüne dayanır. Kuantum akustik sensörler, piezoelektrik rezonatörler, yüzey akustik dalgaları (Surface Acoustic Wave, SAW), hacim akustik dalgaları (Bulk Acoustic Wave, BAW) ve optomekanik yapılar kullanarak çok küçük kuvvet, kütle, ivme ve elektrik alan değişimlerini yüksek hassasiyetle ölçebilir. Süperiletken kubitlerle fonon modlarının hibritleştirilmesi, tek-fonon seviyesinde algılama ve kuantum sınırlı ölçüm yapılmasını mümkün kılmıştır. Bu teknolojiler hassas ivmeölçerler, kuvvet sensörleri, kuantum transdüserler ve mikro/nano ölçekli mekanik sistemlerin ölçümünde kullanılmaktadır.

Tek Foton Kaynakları ve Dedektörleri

Tek foton kaynakları, ideal olarak her uyarım döngüsünde yalnızca bir foton üreten veya çoklu foton üretim olasılığı bastırılmış ışık sistemleridir. Bu tür kaynaklar genellikle tek kuantum yayıcıların (örneğin tek atomlar, iyonlar, kuantum noktaları, NV merkezleri, vb.) uyarılması ve uyarılmış durumdan temel duruma geçiş sırasında tek bir foton yayılması prensibine dayanır. Tek foton kaynakları, kuantum teknolojilerinde klasik ışık kaynaklarına göre foton sayısının kuantum özelliklerini daha hassas bir şekilde kontrol etmeye olanak sağlar.

Bu özellikleri sayesinde özellikle kuantum anahtar dağıtımı (QKD), kuantum haberleşme ve hassas ölçüm uygulamalarında kritik rol oynarlar. Tek foton dedektörleri ise bu zayıf optik sinyalleri yüksek hassasiyetle algılayabilen, düşük karanlık sayım oranına ve yüksek zaman çözünürlüğüne sahip cihazlardır. Bu dedektörler arasında yarıiletken tabanlı çığ fotodiyotları (APD), süperiletken nanotel tek foton dedektörleri (SNSPD) ve geçiş kenarı sensörleri (Transition Edge Sensor, TES) gibi teknolojiler yüksek algılama verimi, düşük karanlık sayım oranı ve yüksek zaman çözünürlüğü sunarak kuantum algılama ve görüntüleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaynak ve dedektör teknolojilerindeki gelişmeler, kuantum sistemlerin güvenilirliği, doğruluğu ve ölçeklenebilirliği açısından belirleyici olup, kuantum internet ve ileri seviye sensör teknolojilerinin geliştirilmesinde kritik öneme sahiptir.



Tek foton kaynakların geliştirilmesi için aŐaĐıda yer alan teknolojilerden yararlanılmaktadır.

- **Kuantum Noktaları (Quantum Dots):** Yarıiletken nanoyapılar olan kuantum noktaları, iki seviyeli sistem gibi davranarak kesin tek foton emisyonu sağlayabilir. Mikro-kaviteler veya fotonik kristal yapılar ile birleŐtirildiĐinde yüksek parlaklık, düşük çok-foton olasılığı ve birbirinden ayırt edilemeyen tek foton üretimi mümkün olur. Bu kaynaklar entegre fotonik çipler için tek foton kaynakları olarak kullanılmaktadır.
- **Elmas İçi Kusur Merkezleri (NV Merkezleri):** Elmas kristali içindeki noktasal kusurlar, tek foton yayabilen ve optik olarak kontrol edilebilen kararlı ışık kaynakları oluşturur. Elmas kristalinde bir Silisyum (Si) atomu veya Germanyum (Ge) atomu iki karbon atomunun yerini alacak Şekilde bir boŐluk ile birlikte konumlanmasıyla silikon boŐluk merkezi (SiV) veya germanyum boŐluk merkezi (GeV) oluşmaktadır. NV merkezleri oda sıcaklığında çalıŐabilirken, SiV ve GeV merkezleri dar spektral çizgileri nedeniyle kuantum ağları ve fotonik entegrasyon için avantaj sunmaktadır.
- **Atomik ve İyonik Sistemler:** Tek atomlar, iyon tuzakları veya nötr atom kafesleri lazer ile kontrollü Şekilde uyarılarak kesin tek foton emisyonu üretilir. Bu sistemler yüksek koherens ve birbirinden ayırt edilemeyen foton üretimi sayesinde kuantum ağları ve kuantum iletişim uygulamalarında önemli rol oynar.
- **Mikro/Nano Yapılı Optik Rezonatörler:** Mikrodisk, halka rezonatör, fotonik kristal kavite yapıları gibi mikro/nano rezonatörler, tek kuantum yayıcılarla birleŐtirildiĐinde foton–madde etkileŐimini güçlendirerek tek foton emisyonunu artırır ve yönlendirir. Ayrıca doğrusal olmayan malzemelerle birlikte kullanıldığında ip üstü foton çiftleri ve tek foton kaynakları üretmek için de kullanılmaktadır.
- **Doğrusal Olmayan Kristaller ve Dalga Kılavuzları:** Parametrik AŐaĐı Dönüşüm (Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC) ve Dört Dalga KarıŐımı (Four-Wave Mixing, FWM) süreçleri ile korelasyonlu foton çiftleri üretilir ve bu çiftler kullanılarak tek foton kaynakları elde edilir. Beta Baryum Borat (Beta-Barium Borat, BBO), Potasyum Titanil Fosfat (Potassium Titanyl Phosphate, KTP), Periyodik Olarak Kutup DeĐiŐtirilmiŐ Lityum Niobat (Periodically Poled Lithium Niobate, PPLN) ve entegre dalga kılavuzları bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır.
- **İki Boyutlu Malzemeler:** Atomik kalınlıktaki iki boyutlu malzemelerde, elektron ve boŐluĐun bağlı hali olan eksitonların belirli bölgelerde hapsolmüŐ (lokalize) durumları oluŐabilir ve bu yapılar oda sıcaklığında tek foton yayıcı olarak iŐlev görebilir. Grafen, geçiş metal dikalkojenrler (molibden disülfür (MoS_2), tungsten disülfür (WS_2), tungsten diselenr (WSe_2), vb.), hegzagonal bor nitrür (h-BN) ve fosforen bu sınıfın en bilinen örnekleridir. Bu malzemeler, esnek yapıları, entegre edilebilir özellikleri ve nano ölçekli konumlandırma yetenekleri ile tek foton kaynakları sağlamaktadır.



- **Entegre Fotonik Dalga Kılavuzları:** Silikon, silikon nitrür ve lityum niyobat tabanlı entegre fotonik dalga kılavuzları, ip üzerinde FWM veya parametrik süreçlerle kompakt ve ölçeklenebilir tek foton kaynakları sağlar. Bu yaklaşım kuantum fotonik devrelerin geliştirilmesinde kritik öneme sahiptir.
- **Rydberg Atom Tabanlı Kaynaklar:** Güçlü dipol-dipol etkileŐimleri sayesinde Rydberg blokaj mekanizması kullanılarak kesin tek foton üretimi gerçekleştirilebilir. Bu yöntem özellikle kuantum ağları ve kuantum iletişim uygulamaları için büyük bir potansiyel taŐır.

Tek fotonların ve foton çiftlerinin verimli bir Şekilde retilmesi oldukça önemlidir. Kuantum teknolojilerinde kullanılan malzemelerin kalitesi, doğrudan kristal ve ince film büyütme süreçlerinin baŐarisına bağlıdır. Kuantum malzemelerin, yüksek saflıkta ve kontrollü Şekilde retilmesi önem arz etmektedir. Tek foton kaynaklarının, geleneksel elektronik sistemlerin yanı sıra nanoyapılar gibi çeşitli yapılarla uyumlu çalıŐabilme yeteneği, kuantum teknolojilerinin geliŐimindeki kritik rollerini ortaya koymaktadır. SPD'ler, kuantum haberleşme, kuantum hesaplama ve fotonik ölçüm sistemlerinin en kritik bileşenlerinden biridir. Bu dedektörler, tek bir fotonun varlığını yüksek hassasiyetle tespit edebilme yeteneği sayesinde kuantum teknolojilerinde güvenilir veri elde edilmesini sağlar.

Dedektörler baŐlıca iki ana grupta incelenmektedir.

- **Süperiletken Nanotel Tabanlı Dedektörler (Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors, SNSPDs):** Yüksek algılama verimliliği, düşük karanlık sayım oranı ve düşük zamanlama kararsızlığı (timing jitter) avantajlarına sahiptir. Ancak kriyojenik soğutma gereksinimi nedeniyle bu dedektörler maliyetli hale gelmektedir.
- **Çiğ Fotodiyot Tabanlı Dedektörler (Single-Photon Avalanche Diodes, SPADs):** Tek foton algılamada en yaygın kullanılan yarıiletken aygıtlar çiğ fotodiyotlardır. SPAD'ler, ters kutuplama altında çalıŐtırıldıėında tek bir fotonun oluşturduğu taŐıyıcıyı çiğ etkisiyle büyüterek ölçülebilir bir elektrik sinyali üretir. Silisyum tabanlı SPAD'ler görünür bantta yüksek verimlilik ve düşük gürültü performansı ile çalıŐmaktadırlar. InGaAs tabanlı SPAD'ler ise yakın kızılötesi (Near-Infrared, NIR) bölgede çalıŐmakta olup, kuantum haberleşme uygulamaları için kritik öneme sahiptir. SNSPD'lere kıyasla daha erişilebilir, kompakt ve düşük maliyetlidir, ancak karanlık sayım oranları ve zamanlama kararsızlıkları daha yüksektir.

Kuantum haberleşme ve kuantum optik deneylerde kullanılan tek foton dedektörleri (SPAD, SNSPD vb.), foton tespit edildiğinde elektriksels darbe (pulse) retmektedir. Bu darbelerin güvenilir biçimde okunması, zaman etiketlenmesi ve dijital sistemlere aktarılması, dedektör okuma sistemleri olarak tanımlanan elektronik yapılar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.



Dedektör okuma sistemlerinin temel bileşenleri şunlardır:

- **Ön Yükselteçler (Preamplifiers):** Dedektörden gelen zayıf elektriksel sinyalleri yükseltir.
- **Zamanlama Elektroniki (Timing Electronics):** Algılanan fotonların geliş zamanlarını pikosaniye duyarlılıkta kaydeder.
- **Sayısallaştırma ve Veri Toplama Kartları (Data Acquisition, DAQ):** Dedektör sinyallerini dijital formata çevirerek bilgisayar ortamına aktarır.
- **Yeniden Programlanabilir Kapı Dizisi (Field-Programmable Gate Array, FPGA)/ Uygulama-Özel Entegre Devre (Application-Specific Integrated Circuit, ASIC) Tabanlı Okuma Devreleri:** FPGA ve ASIC tabanlı okuma devreleri, kuantum bilgi işleme ve kuantum ölçüm sistemlerinde yüksek hız ve esneklik sunan önemli bileşenlerdir. FPGA'lar, kullanıcıya esnek bir şekilde donanım yapılandırması imkânı tanırken, ASIC'ler belirli uygulamalara özel optimize edilmiş çözümler sunar. Bu devreler, kuantum sistemlerin doğru ve verimli bir şekilde ölçülmesi için kritik öneme sahiptir, çünkü yüksek doğrulukta veri toplama, zamanlama ve işleme özelliklerini kullanmaktadır.

Tek foton kaynaklarının ve dedektörlerinin kuantum haberleşmeden kuantum algılamaya kadar birçok alanda kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Kuantum Ataletsel Navigasyon Sistemleri

Kuantum ataletsel sensörler (dönüölçer ve ivmeölçer), askeri uygulamalar için önemli bir algılama birimidir. Küresel Konumlama Sistemi'nin (Global Positioning System, GPS) olmadığı, engellendiği veya karıştırdığı ortamlarda Ataletsel Navigasyon Sistemleri (Inertial Navigation System, INS) navigasyon çözümleri sağlamaktadır. INS'lerin hassasiyetini içinde bulunan ataletsel sensörler sağlamaktadır. Dönüölçer teknolojisi olarak soğuk atom ve atomik spin, ivmeölçer teknolojisinde ise soğuk atom teknolojisi kullanılmaktadır.

Soğuk atom teknolojileri, atomların dalga doğasının kontrol edilerek kullanılmasına dayanır. Bu sistemlerde atomlar çok düşük sıcaklıklara soğutularak termal hareketleri minimize edilir ve böylece kuantum mekanik dalga özellikleri belirgin hale gelir. Işık interferometrelerinde olduğu gibi, atomlar da madde dalgaları olarak girişim yapabilir ve bu prensip madde dalga interferometrisi olarak ifade edilir. Optik interferometride, sol ve sağ dairesel polarizasyon bileşenleri ışığın yayılımı sırasında farklı fazlar kazanarak ölçülebilir bir faz kaymasına yol açar; bu faz farkı interferometrik yöntemlerle hassas biçimde tespit edilir. Benzer şekilde, soğuk atom interferometreleri atomların dalga fonksiyonlarını kullanarak girişim desenleri oluşturur ve bu desenler üzerinden çok yüksek hassasiyetli ölçümler yapılmasına olanak tanır. Bu teknolojiler özellikle ivme, yerçekimi ve dönme gibi fiziksel büyüklüklerin hassas ölçümünde



önemli uygulama alanlarına sahiptir. Atomik spin ölçümlerinde ise, atomik gaz hücresindeki alkali atomlar uyarılır ve spin polarizasyonu oluşturulur.

Kuantum fiber optik dönüölçer (Quantum Fiber Optic Gyroscope, QFOG), ışığın dolanık ve sıkıştırılmış kuantum durumlarından yararlanarak daha düşük gürültüyle ölçüm yapabilir ve böylece geleneksel dönüölerlere göre daha yüksek hassasiyet sağlayabilir. QFOG, özellikle yüksek doğruluk gerektiren askeri ve sivil navigasyon uygulamaları için umut vaat eden bir teknolojidir.

Kuantum Radyasyon Dedektörleri

Kuantum destekli radyasyon dedektörleri, maddenin kuantum özelliklerini (örneğin spin durumları, kuantum tutarlılığı veya enerji seviyelerinin kuantizasyonu) kullanarak iyonlaştırıcı radyasyonu (X ve gama ışınları veya enerjik parçacıklar) yüksek hassasiyet ve enerji çözünürlüğü ile tespit eden yeni nesil algılayıcılardır. Süperiletken sensörler, kuantum kalorimetreler ve kusur merkez tabanlı dedektörler, düşük gürültü ve tek parçacık seviyesinde algılama imkânı sağlayarak nükleer güvenlik, astrofizik ve tıbbi görüntüleme uygulamalarında kullanılmaktadır.

Kuantum Gravimetre

Kuantum gravimetreler, genellikle soğuk atom interferometrisine dayalı olarak yerçekimi ivmesini yüksek hassasiyetle ölçer. Bu cihazlar jeofizik haritalama, yeraltı boşluklarının tespiti, yeraltı suyu ve buz kütlesi değişimlerinin izlenmesi ile petrol ve maden aramalarında kullanılmaktadır. Ayrıca Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System, GNSS) / Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System, GPS) sinyallerinin bulunmadığı ortamlarda uçak, gemi, denizaltı ve otonom araçlar için yardımcı navigasyon sistemi olarak değerlendirilmektedir. Taşınabilir atomik gravimetrelerin sismik izleme ve altyapı denetimi gibi saha uygulamalarına yönelik geliştirilmesi devam etmektedir.

Kuantum gravimetrelerin önemli özellikleri yüksek hassasiyet, uzun süreli kararlılık ve mutlak ölçüm yapabilme yetenekleridir. Ancak güncel sistemlerde boyut, güç tüketimi ve hazırlık süresi açısından minyatürleştirme çalışmaları halen sürmektedir.

Atomik Saat

Atomik saatler, zamanı atomların enerji seviyeleri arasındaki geçiş frekanslarına dayalı olarak ölçen, günümüzün en hassas zaman belirleme sistemleridir. Uluslararası birim sisteminde saniyenin tanımı, Sezyum-133 Geçiş Frekansı esas alınarak yapılmaktadır. Geleneksel atomik saatler mikrodalga frekans bölgesinde çalışırken, son yıllarda geliştirilen yeni nesil sistemler



optik frekanslara dayanmaktadır. Bu sistemler literatürde sıklıkla “kuantum saat” olarak adlandırılrsa da, temelde tüm atomik saatler kuantum mekaniği prensiplerine dayanır.

Güncel atomik saat teknolojileri arasında ip ölçekli atomik saatler, taşınabilir optik saatler ve soğuk atom tabanlı zaman standartları yer almaktadır. Telekomünikasyon altyapıları, uydu sistemleri, finansal ağlar, enerji Őebekeleri ve hassas bilimsel ölçümler gibi zaman senkronizasyonuna bağımlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca GNSS sistemlerinin temelini oluşturur ve taşınabilir optik ve ip ölçekli atomik saatler, geleceğin navigasyon ve zamanlama sistemleri için geliştirilmektedir.

Kuantum Metroloji (Ölçüm Standartları)

Kuantum metroloji, kuantum mekaniğinin süperpozisyon, dolanıklık ve kuantum korelasyon gibi özelliklerini kullanarak fiziksel parametrelerin hassas ölçümünü inceleyen bir alandır. Kuantum algılama belirli bir fiziksel büyüklüğün ölçülmesine odaklanırken, kuantum metroloji bu ölçümlerin temel hassasiyet sınırlarını ve optimal ölçüm stratejilerini araŐtırır. Bu yaklaşım atomik saatler, atom interferometreleri ve optik interferometreler gibi yüksek hassasiyetli ölçüm sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır.

Temel kuantum metroloji teknikleri aŐaĐıda verilmiştir.

- **Ramsey Girişim Ölçümü:** Bu yöntem, iki koherent darbe arasında, sistemin dış etkileŐim olmadan kuantum fazının biriktiği bekleme süresindeki kuantum fazının ölçülmesine dayanır. Faz kayması frekans, manyetik alan veya zaman gibi fiziksel büyüklüklerle doğrudan iliŐkilidir. Ramsey girişim ölçümü atom saatleri, manyetometreler ve atom interferometrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Modern GPS uydularındaki atomik saatler, bu yöntemin en bilinen uygulamasıdır [[42], [43]].
- **Spin SıkıŐtırma (Spin Squeezing):** Kuantum sistemlerinde spin döngüsünün belirli bir yöndeki belirsizliğini azaltarak, diğer bir yöndeki belirsizliği artıran bir kuantum belirsizlik ilkesine dayalı tekniktir. Atom topluluklarının kolektif spin belirsizliği, spin sıkıŐtırma yöntemiyle yeniden dağıtılarak ölçüm duyarlılığı artırılır. Bu yöntem standart kuantum sınırının (shot-noise limit) altına inerek Heisenberg öleklemesine yaklaŐmayı mümkün kılar. Spin sıkıŐtırma teknikleri atom saatleri, manyetometreler ve atom interferometrelerinde aktif olarak kullanılmaktadır [[44], [45]].
- **Kuantum IŞık ile Girişim Ölçümü:** Sıkıştırılmış ışık veya dolanık foton durumları interferometrelerde kullanılarak faz duyarlılığı artırılır. Bu yaklaşım Mach–Zehnder ve Michelson interferometrelerinde gürültü azaltımı sağlayarak klasik sınırların ötesinde hassasiyet elde edilmesine olanak verir. Gravimetri ve optik faz ölçümleri bu tekniğin önemli uygulamaları arasındadır [[46], [47], [48]].



- **Kuantum Fisher Bilgisi Tabanlı Optimizasyon:** Kuantum metrolojide ölçüm hassasiyeti kuantum Fisher bilgisi ile belirlenir ve optimal giriş durumları ile ölçüm stratejileri bu çerçevede tasarlanır. Bu yaklaşım sensör performansının teorik sınırlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır [49].
- **Standart Kuantum Sınırı (Standart Quantum Limit, SQL):** Bağımsız ve korelasyonsuz parçacıklar kullanıldığında Fisher bilgisi, parçacık sayısı ile yaklaşık olarak doğrusal ölçeklenir. Bu durumda ölçüm belirsizliği parçacık sayısının karekökü ile ters orantılıdır ve bu sınır standart kuantum sınırı (SQL) olarak bilinir [[42], [50]].
- **Heisenberg Sınırı:** Dolanıklık veya sıkıştırılmış durumlar gibi kuantum kaynakları kullanıldığında kuantum Fisher bilgisi parçacık sayısının karesiyle ölçeklenebilir. Bu durumda ölçüm belirsizliği parçacık sayısı ile ters orantılı hale gelir ve Heisenberg sınırına yaklaşılır. Bu ölçeklenme ideal koşullarda mümkün olup, gürültü ve kayıplar altında genellikle daha sınırlı bir kuantum avantajı elde edilir [[42], [50]].

Kuantum metroloji için geliştirilen teknikler yalnızca hassasiyeti artırmakla kalmaz, aynı zamanda gelecekte daha küçük, taşınabilir ve düşük enerji tüketimli (Boyut, Ağırlık ve Güç, (Size, Weight, and Power, SWaP)) kuantum sensörlerin geliştirilmesine de olanak tanır. Bu yönüyle kuantum metroloji, hem temel bilimler hem de ekonomik ve stratejik çıkarlar için dönüştürücü bir teknoloji alanıdır [[23], [51]].

Kuantum Anten

Kuantum anten, elektromanyetik alanları algılamak veya üretmek için kuantum sistemlerinin enerji seviyeleri ve durum geçişlerini kullanan bir algılama sistemidir. Bu sistemler genellikle Rydberg atomları, kusur merkezleri, kuantum noktaları, optomekanik yapılar ve süperiletken devreler gibi bileşenleri kullanmaktadır. Özellikle Rydberg RF/elektrik alan sensörleri, kuantum algılama alanında çok aktif ve stratejik öneme sahip sistemler arasındadır. Rydberg atom tabanlı RF elektrik alan sensörleri ve kuantum alıcılar uluslararası araştırma alanları arasında yakın ve orta vadede geniş bant RF alan algılama ve anten kalibrasyon olanakları ile önemli gelişmelerin beklendiği sistemlerdir. Kuantum antenlerde elektromanyetik alan, kuantum sisteminin durumunda oluşturduğu değişim üzerinden algılanır ve bu değişim optik veya mikrodalga okuma teknikleriyle ölçülür. Bu yaklaşım, geniş bantlı, kalibrasyonsuz ve düşük alan şiddetlerinde hassas elektromanyetik alan algılama imkânı sağlamaktadır.

7.2.2. Teknoloji Konuları Önerileri

Kuantum algılama alanındaki yakın vadeli konular **Tablo 12**, uzak vadeli konular **Tablo 13**'de yer almaktadır.

Tablo 12. OG-2 Yakın Vade Konu Önerileri

Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
1 Kuantum Manyetometre	NV Merkezli Kuantum Manyetometre Teknolojisi: Tekil NV merkezleri veya NV toplulukları kullanılarak manyetik alan, sıcaklık ve akım yoğunluğu haritalaması yapabilen <i>kuantum sensörlerin geliştirilmesidir. Biyomedikal uygulamalarda ve hassas manyetik alan haritalamasında kullanılır.</i>	Yakın
2 Kuantum Manyetometre	Optik Pompalı Manyetometre (Optically Pumped Magnetometer, OPM) Teknolojisi: <i>Alkali atom buharlarının lazer ile spin polarizasyonu ve manyetik alana bağlı spin presesyon ölçümü prensibine dayanan manyetometrelerin geliştirilmesidir. Bu sensörler femtotesla seviyesinde hassasiyetle manyetik alan ölçebilir ve kriyojenik soğutma gerektirmeden çalışabilir. Biyomanyetik ölçümler, atomik metroloji, jeofizik haritalama ve kuantum algılama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.</i>	Yakın
3 Kuantum Görüntüleme	Kuantum LIDAR Görüntüleme Teknolojisi: <i>Tek veya dolanık fotonlar kullanarak yüksek çözünürlüklü, düşük ışık seviyesinde mesafe ve görüntü ölçümü yapabilen LIDAR sistemlerinin geliştirilmesidir.</i>	Yakın
4 Kuantum Görüntüleme	Kuantum RADAR Teknolojisi: <i>Dolanık fotonlar kullanarak düşük görünürüklü ve gürültüye dayanıklı radar ölçümleri gerçekleştiren kuantum radar sistemlerinin geliştirilmesidir.</i>	Yakın
5 Kuantum Akustik Sensörler	Kuantum Akustik Sensör Teknolojisi: <i>Kuantum sistemlerinin titreşim ve ses dalgalarına duyarlılığı ile ultra hassas akustik ölçümler yapılmasını sağlayan cihazların geliştirilmesidir.</i>	Yakın
6 Tek Foton Kaynakları ve Dedektörleri	Tek ve Dolanık Foton Kaynak Teknolojileri: <i>Kuantum algılama, iletişim ve bilgi işleme uygulamaları için tekil veya dolanık foton üreten optik kaynakların geliştirilmesidir.</i>	Yakın
7 Tek Foton Kaynakları ve Dedektörleri	Tek Foton Çığ Diyot (SPAD) Teknolojisi: <i>Tek fotonları algılayabilen SPAD cihazlarının geliştirilmesidir.</i>	Yakın
8 Tek Foton Kaynakları ve Dedektörleri	Süperiletken Nanotel Tek Foton Dedektör (SNSPD) Teknolojisi: <i>Süperiletken nano tel yapıları ile tek fotonları algılayabilen yüksek hassasiyetli dedektörlerin geliştirilmesidir.</i>	Yakın
9 Kuantum Ataletsel	Otonom Kuantum Navigasyon Teknolojisi:	Yakın

Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
Navigasyon Sistemleri	GPS'e bağımlı kalmadan, kuantum sensörlerle kendi konum ve yönünü belirleyebilen otonom navigasyon sistemlerinin geliştirilmesidir.	
10 Kuantum Ataletsel Navigasyon Sistemleri	Soğuk Atom Tabanlı Ataletsel Sensör (Dönüölçer/İvmeölçer) Teknolojisi: Soğuk atomlar ve atom interferometri ile yüksek hassasiyetli ölçümler yapan sensörlerin geliştirilmesidir. İvme, dönme, yerçekimi ve manyetik alan ölçümlerinde kullanılabilir.	Yakın
11 Kuantum Ataletsel Navigasyon Sistemleri	Kuantum Dönüölçer Teknolojisi: Hareket ve yön değişimlerini ultra hassas ölçen kuantum tabanlı dönüölçerlerin geliştirilmesidir.	Yakın
12 Kuantum Radyasyon Dedektörleri	Kuantum Radyasyon Dedektör Teknolojisi: Radyolojik ve nükleer tehditler için yüksek hassasiyetli kuantum tabanlı radyasyon algılama cihazlarının geliştirilmesidir.	Yakın
13 Kuantum Gravimetre	Mikrogravite Koşullarında Kuantum Algılama Teknolojileri (Gravimetre): Mikro yerçekimi ortamları için kullanılabilir kuantum sensörlerin geliştirilmesidir.	Yakın
14 Kuantum Gravimetre	Soğuk Atom Tabanlı Gravimetre ve Gradyometre Teknolojisi: Soğuk atom interferometresi ile yerçekimi ve yerçekimi gradyanlarını hassas ölçebilen cihazların geliştirilmesidir. Jeoloji, sismoloji ve navigasyon uygulamalarında kullanılabilir.	Yakın
15 Atomik Saat	Atomik Saat Teknolojisi: Ultra hassas atomik saatler (kuantum saatler) ile stabil zaman takibi yapılarak navigasyon ve haberleşme uygulamaları için kuramsal limitlere yakın saat referansı teknolojisinin geliştirilmesidir.	Yakın
16 Kuantum Metroloji	Metroloji Uygulamaları İçin Kriyojenik Josephson Standartlarının Geliştirilmesi: Josephson bağlantıları ile düşük sıcaklıklarda voltaj, akım ve zaman ölçümlerinde kuantum hassasiyetine ulaşan ölçüm teknolojisidir.	Yakın

Tablo 13. OG-2 Uzak Vade Konu nerileri

Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
1 Kuantum Manyetometre	Topolojik Malzemelerin Kullanımı ile Kuantum Manyetometre Teknolojisi: <i>Topolojik malzemelerin özelliklerinden yararlanarak manyetik alan ölçümlerinde yüksek hassasiyet ve kararlılık sağlayan kuantum manyetometrelerin geliştirilmesidir.</i>	Uzak
2 Kuantum Görüntüleme	Yüksek Sıcaklıkta retilen Kuantum-Dolanık THz Modlarla Algılama: <i>Yüksek sıcaklıklarda kuantum dolanık THz modları ile hassas spektroskopi ve görüntüleme teknolojisinin geliştirilmesidir.</i>	Uzak
3 Kuantum Görüntüleme	Kuantum Mikroskop Geliştirilmesi: <i>Kuantum zellikli ışık ve dedektörler kullanarak yüksek znrlkte, hassas ve gürültüye dayanıklı mikroskop geliştirme çalıŐmalarıdır.</i>	Uzak
4 Kuantum Görüntüleme	Grafen Tabanlı Optik Yüzey ile Dedektör Teknolojisi: <i>Grafen kullanılarak yüksek optik iletkenlik, düşük kayıp ve geniş spektral tepki sağlayan optik yüzey ve dedektör teknolojilerinin geliştirilmesidir.</i>	Uzak
5 Kuantum Görüntüleme	Kuantum Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) Teknolojisi: <i>Nanometre lğinde manyetik rezonans görüntüleme sağlayan kuantum tabanlı sensörlerin geliştirilmesidir. Biyomedikal ve malzeme araŐtırmalarında yüksek znrlkl manyetik alan haritalaması sunmaktadır.</i>	Uzak
6 Tek Foton Kaynakları ve Dedektörleri	Kuantum Nokta Foton Teknolojileri: <i>III-V grubu yarı iletken malzemelerden üretilen kuantum noktalar aracılığıyla tekil veya dolanık foton üretim teknolojisinin geliştirilmesidir.</i>	Uzak
7 Kuantum Gravimetre	Sıkıştırılmış IŞık Gradyometre Dedektör Teknolojisi: <i>Sıkıştırılmış kuantum ışık kullanarak yerçekimi dalgalarının tespiti ve yerçekimi alanındaki deėiŐimlerin llmesine yönelik dedektörlerin geliştirilmesidir.</i>	Uzak
8 Atomik Saat	Optik Atomik Saat Teknolojisi: <i>Yüksek frekanslarda, yüksek hassasiyetle zaman ölçümü yapabilen atomik saatlerin geliştirilmesidir.</i>	Uzak
9 Kuantum Anten	Kuantum Anten Teknolojisi: <i>Kuantum prensiplerinden yararlanılarak elektromanyetik alanı yüksek hassasiyetle algılayabilen antenlerin geliştirilmesidir.</i>	Uzak



7.2.3. GZFT Analizi

Türkiye'nin kuantum algılama alanındaki mevcut durumunu, güçlü araştırma kapasitesi ve yetenekli insan kaynağı belirlemektedir. Kuantum OTAĞ alıŐmaları kapsamında kuantum algılama özelinde gerçekleştirilen GZFT analizinin bulguları Türkiye'nin bu alandaki durumunu ve gelecekteki potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Güçlü Yönler:

- Kuantum teknolojileri alanında üniversitelerde lisans ve lisansüstü programların açılmaya başlaması ve eğitim faaliyetlerinin artması,
- Kuantum teknolojileri alanında çalışan araştırma gruplarının ve disiplinler arası iş birliklerinin artması,
- Ar-Ge faaliyetlerinin artması ve kuantum teknolojilerine yönelik yeni girişimlerin ortaya çıkması,
- Üniversite ve araştırma merkezleri tarafından Horizon Avrupa (Horizon Europe), Avrupa Bilim ve Teknolojide İşbirliği (European Cooperation in Science and Technology, COST) ve Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (North Atlantic Treaty Organization, NATO) gibi uluslararası programlarda aktif iş birliklerinin yapılması,
- NV merkezleri, atomik saatler, manyetometreler ve tek foton teknolojileri gibi alanlarda ileri seviye akademik Ar-Ge çalışmalarının yürütülmesi,
- YetiŐmiş insan kaynağının giderek artması ve genç araŐtırmacı ilgisinin yüksek olması,
- Ulusal farkındalığın artması ve yeni Ar-Ge projelerinin başlatılması,
- Üniversite, araştırma merkezi ve savunma sanayii arasında gelişmekte olan iş birliği ekosistemi.

Zayıf Yönler:

- Kuantum sensör ve metroloji teknolojileri için uzun vadeli ve sürdürülebilir finansman kaynaklarının sınırlı olması,
- Süperiletken üretim, kriyojenik sistemler, hassas lazerler ve özel temiz oda altyapıları gibi ileri teknolojik altyapıların sınırlı olması,
- Akademi–sanayi iş birliğinin yeterince olgunlaşmamış olması ve geliştirilen teknolojilerin prototip aşamasında kalması,
- Kritik bileşenler (lazer sistemleri, tek foton dedektörleri, kriyojenik donanım vb.) açısından yurt dışı bağımlılığının bulunması,
- Kuantum algılama çalışmalarının sistem entegrasyonu yerine çoğunlukla alt bileşen geliştirme seviyesinde kalması,
- Kuantum sensörlerin boyut, güç tüketimi ve çevresel izolasyon gereksinimleri nedeniyle saha uygulamalarına entegrasyonunun zor olması,



- StandartlaŐtırma, kalibrasyon ve test altyapılarının sınırlı olması nedeniyle teknoloji hazırlık seviyesinin (TRL) yükseltilmesinde güçlükler yaŐanması.

Fırsatlar:

- Küresel ölçekte kuantum sensör ve metroloji pazarının savunma, enerji, sağlık ve uzay uygulamaları başta olmak üzere hızla büyümesi ve yeni tedarik zincirlerinin oluşması,
- Yerli geliştirme ve ticarileŐtirme ile yüksek katma değerli ürünlerin üretilmesi ve ihracat potansiyelinin artması,
- Yeni kuantum malzemeler, fotonik entegre platformlar ve düşük gürültülü ölçüm tekniklerindeki gelişmelerle rekabet gücünü artırma ve yüksek katma değerli teknolojik ürünler geliştirme,
- Ulusal ve uluslararası araştırma programları (AB, NATO, ikili iş birlikleri, vb.) kapsamında finansman ve teknoloji iş birliği fırsatlarının artması,
- GNSS bulunmayan ortamlarda navigasyon, biyomedikal görüntüleme, jeofizik haritalama ve hassas zamanlama gibi kritik uygulama alanlarında artan ihtiyaç.

Tehditler:

- Ulusal ölçekte uzun vadeli kuantum teknoloji yol haritasının ve koordinasyon mekanizmalarının henüz belirlenmesi,
- Nitelikli insan kaynağının sınırlı olması ve beyin göçü nedeniyle uzman araŐtırmacı sayısının azalması riski,
- Küresel rekabetin hızla artması ve kuantum teknolojilerinin ihracat kontrolü ve uluslararası kısıtlamalara tabi hale gelmesi,
- Kritik bileşenler ve ileri üretim teknolojilerinde dışa bağımlılık nedeniyle tedarik zinciri risklerinin bulunması,
- Kuantum teknolojilerinin geliştirme ve ticarileŐtirme sürelerinin uzun olması nedeniyle stratejik hedeflerde gecikme yaŐanma olasılığı.

7.2.4. Değerlendirmeler

Günümüzde kuantum algılama teknolojileri en hızlı olgunlaŐan alan olmasına rağmen bu teknolojilerin endüstriyel ölçekte yaygınlaŐması hala sınırlıdır. Bunun temel nedenleri arasında sistemlerin ölçeklendirilmesi, maliyetlerin düşürülmesi ve saha kullanımına uygunluk açısından çalışma sıcaklığı, boyut-ağırlık-kısıtları, dayanıklılık ve entegrasyon gibi mühendislik gereksinimlerinin tam olarak karşılanamaması yer almaktadır.

Kuantum algılama teknolojileri, farklı alanlarda stratejik ve bilimsel değerini göstermeye başlamıŐtır. Jeofizikte kuantum gravimetreler, Etna Yanardağı'nda yeraltı kütle değişimlerini



izleyerek klasik sistemlere göre daha kararlı sonuçlar üretmiŐtir. Uzun dönemli yerçekimi ve manyetik alan ölçümleri, buzulların erimesi, yeraltı suyu hareketleri, okyanus akıntıları ve atmosferik kütle taŐınımlarının hassas takibini mümkün kılmaktadır.

Navigasyonda kuantum ivmeölçerler, jiroskoplar ve gravimetreler, gemi ve hava araçlarında yapılan saha testlerinde baŐarı göstermiŐ, GPS'in kullanılmadığı ortamlarda güvenilir alternatifler sunmuştur. Yüksek hassasiyetli kuantum saatler ve zamanlama sistemleri de, hem ulaŐım hem de iletişim altyapısı için kritik öneme sahiptir.

Uzay araŐtırmalarında, Uluslararası Uzay İstasyonu'ndaki Cold Atom Lab deneyleri mikrogravite koşullarında ultra-soğuk atom interferometrelerinin başarıyla çalıŐtırılmasını saĐlamıŐ, yüksek hassasiyetli atalet sensörleri ve temel fizik testlerinin nn açmıŐtır. NASA ve sanayi iŐbirlikleri, Dünya'daki kütle taŐınımlarını gözlemlemek için uydu tabanlı kuantum yerçekimi gradietreleri geliştirmektedir.

Savunma ve güvenlik alanında kuantum aydınlatma prensiplerine dayalı radar sistemleri laboratuvar ölçeğinde gürültüye karşı dayanıklılık göstermiŐtir. Kuantum manyetometreler, denizaltı ve diğer platformların tespitinde potansiyel sunmakta ve hassas zamanlama sistemleri güvenli iletişim altyapılarında stratejik rol üstlenmektedir.

Kuantum algılama teknolojilerinde dünya genelinde bir çok alanda Ar-Ge faaliyetleri yrtlmektedir. ABD ve in başta olmak üzere birçok ülke, hem akademik hem de endüstriyel düzeyde kuantum sensörler, kuantum radarlar ve hassas ölçüm sistemleri üzerine çalışmalar yrtmektedir.

ABD'de, MIT ve Harvard gibi üniversitelerde kuantum sensörler, atom interferometrisi ve sıkıştırılmış ışık tabanlı ölçüm teknikleri üzerinde çalışmalar mevcuttur. MIT LIGO grubu, yerçekimi dalgası dedektörlerinde sıkıştırılmış ışık (squeezed light) kullanarak ölçüm hassasiyetini artırmaya yönelik kuantum optik teknikleri geliŐtirmiŐtir. Benzer Şekilde Stanford niversitesi, kuantum mühendisliği ile elektromanyetik alan algılama hassasiyetini artırmayı hedefleyen kuantum destekli elektro-optik modülatör gibi cihaz konseptleri üzerinde çalıŐmaktadır. Sanayi tarafında ise Lockheed Martin, Northrop Grumman ve Booz Allen Hamilton gibi ABD merkezli savunma Őirketleri kuantum sensörler, navigasyon sistemleri ve radar uygulamaları üzerine yatırımlar yapmaktadır. ABD DARPA'nın "Robust Quantum Sensors (RoQS)" programı, saha koşullarında çalıŐabilecek dayanıklı kuantum sensörlerin geliştirilmesini hedeflemektedir.

ABD, National Quantum Initiative Act erevesinde Argonne, Los Alamos ve Fermilab gibi ulusal laboratuvarları merkez alan bir model benimsemiŐtir. ABD, kuantum patent



baŐvurularında in ile birlikte liderliği paylaŐmakta ve özellikle QComm ile “Kuantum Algılama” patent baŐvurularında ndedir [23].

in, kuantum teknolojileri alanında 2013 yılında bu alanı ulusal politika düzeyine entegre ederek stratejik bir yaklaşım benimsemiŐ ve özellikle in Bilim ve Teknoloji Üniversitesi (USTC) merkezli araŐtırmalarla bu alanı geliŐtirmeye baŐlamıŐtır. 2017 yılında, denizaltı tespiti amacıyla hava platformuna yerleŐtirilmiŐ SQUID dizili manyetometre sisteminin prototipinin in’de geliŐtirildiĐi ne sürülmüŐtür. 2018 yılında kuantum radar teknolojilerine yönelik çalıŐmaların prototip aşamasına ilerlediği ve bu alanda China Electronics Technology Group tarafından geliştirilen sistemlerin test edildiği belirtilmiŐtir. 2020 yılından itibaren ise jeolojik ve oŐinografik keŐiflerde kullanılmak üzere kuantum gravimetre geliştirme çalışmalarının yrtlmeye baŐlandığı belirtilmiŐtir. 2024 yılında in, uzay ortamında çalıŐabilen soğuk atom gravimetrelerini deneysel olarak başarıyla gösterdiği ve aynı yıl kuantum algılama alanında radar, manyetik sensörler ve ataletsel navigasyon sistemleri gibi teknolojilerde önemli ilerlemeler kaydettiği raporlanmıŐtır. Yine 2024 yılında in Ulusal Metroloji Enstitüsü, lazerle soĐutulmuŐ sezyum atomlarını kullanan ve potansiyel askeri uygulamalara sahip atomik saati geliŐtirdiĐini belirtmiŐtir.

Avrupa’da Kuantum Amiral Gemisi Programı kapsamında kuantum mikrodalga teknolojileri ve tek foton seviyesinde algılama sistemleri geliştirilmekte, bu çalıŐmaların kuantum radar ve düşük gürültülü algılama sistemlerine temel oluŐturması hedeflenmektedir. Ayrıca bu program kapsamında yüksek hassasiyetli ve taşınabilir kuantum saatler geliştirme çalışmaları yrtlmektedir. Aynı program kapsamında elmas tabanlı nükleer manyetik rezonans kullanarak tıbbi görüntüleme geliŐtirmeyi amaçlayan çalışmalar yapılmaktadır. Thales firması NV merkezli teknoloji tabanlı manyetik, elektrik, sıcaklık ve basınç alanlarının llmesine yönelik sensörler üzerine çalıŐmaktadır. BirleŐik Krallık merkezli spin-off Őirketi Delta, yerçekimi gradyometresi tabanlı kuantum sensörlerini laboratuvar ortamından çıkararak saha uygulamalarına taşıyan ilk firmalardan biri olmuştur. Avrupada akademik tarafta ise ETH Zurich, University of Oxford, Imperial College London ve University of Vienna gibi niversiteler atom interferometrisi, soğuk atom gravimetreleri, kuantum manyetometreler ve elmas NV-merkez tabanlı sensörler üzerinde çalıŐmaktadır. Genel olarak Avrupa’daki kuantum algılama araŐtırmaları; yüksek hassasiyetli zaman llm, yerçekimi ve ivme sensörleri, manyetik alan görüntüleme ve biyomedikal görüntüleme uygulamaları etrafında yoĐunlaŐmaktadır.

Türkiye’de kuantum algılama ve metroloji alanındaki çalışmalar ağırlıklı olarak niversiteler ve araştırma merkezleri tarafından yrtlmektedir. Kuantum manyetometre geliştirilmesi amacı ile TÜBİTAK BİLGEM ve UME tarafından NV merkezli ve atomik gaz hücresi tabanlı çalışmalar yrtlmektedir. TOBB ET ve GT tarafından kuantum radar alt bileşenlerinin geliştirilmesine



yönelik çalışmalar ve Özyeğin Üniversitesi tarafından kuantum LIDAR alıŐmaları yürütölmektedir. Atomik saat ve kuantum anten teknolojisine yönelik TÜBİTAK UME'de yetkinlik bulunmaktadır. Tek foton dedektör geliştirilmesine yönelik KOÇ Üniversitesi ve Özyeğin Üniversitesinde yetkinlik bulunmakta olup Qubitrium firmasının ticari ürünü bulunmaktadır. Koç Üniversitesi, Hacettepe Üniversitesi ve TÜBİTAK UME'de kuantum algılama konusunda sensör tasarımı ve üretimine yönelik çalışmalar yürütölmektedir. TÜBİTAK UME'de kuantum metroloji konusunda laboratuvar kurulmuŐtur. TÜBİTAK destek programları ve uluslararası iş birlikleri kapsamında kuantum algılama ve metroloji alanında proje destekleri sağlanmaktadır. Bu durum, uluslararası ortaklıkların ve teknoloji geliştirme faaliyetlerinin artması için fırsat oluşturmaktadır.

Kuantum teknolojilerinde kullanılan çeşitli malzemelere yönelik ölkemizde önemli alıŐmalar Bilkent UNAM, TÜBİTAK UME, Koç Üniversitesi, İYTE, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Hacettepe Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi ve Sabancı Üniversitesi'nde yürütölmektedir. Kuantum akustik/fononik alanında Sabancı Üniversitesi'nin çalışmaları mevcuttur.

Türkiye'nin mevcut güçlü yönleri arasında genç ve nitelikli araŐtırmacı kadrosu, gelişmekte olan kuantum araştırma grupları ve uluslararası iş birlikleri yer almaktadır. Bu potansiyelin etkin şekilde değerlendirilebilmesi için ulusal Ar-Ge altyapısının güçlendirilmesi, sistem entegrasyonu ve prototip geliştirme kapasitesinin artırılması, kritik bileşenlerin yerli üretimine yönelik çalıŐmaların desteklenmesi ve nitelikli insan kaynağının sürdürülebilir biçimde yetiŐtirilmesi önem taşımaktadır. Bu doğrultuda yapılacak stratejik yatırımlar ve koordineli programlar, Türkiye'nin kısa vadede uygulanabilir kuantum sensör özömleri geliŐtirmesine ve uzun vadede kuantum metroloji ve algılama alanında rekabetçi bir ekosistem oluŐturmasına katkı sağlayacaktır.

7.2.5. Sonuç

Kuantum Algılama Odak alıŐma Grubu-2 alanında ölkemizde metroloji, atomik saat, kuantum radar ve LIDAR alt bileşenleri, tek foton dedektörleri, NV merkezli ve atomik gaz hücresi tabanlı manyetometre konularında çalışmalar ve nitelikli insan kaynağı konularında yetkinlik bulunmaktadır. OG-2 yakın vadeli konular kapsamında öncelik, kuantum manyetometre, kuantum görüntöleme, ataletsel navigasyon sistemleri ve atomik saat teknoloji konularındadır.

Günümüzde kuantum algılama teknolojileri, savunma (GPS'siz seyrüsefer, vb.), jeofizik ve sağlık teŐhisi alanlarındaki uygulamalar önem kazanmıştır. Gelecekte altyapı izleme ve otonom sistemler gibi sektörler için daha taşınabilir, uygun maliyetli ve entegre kuantum sensörlerinin önem kazanması beklenmektedir.



Kuantum sensörler ve metroloji, temel fiziksel niceliklerin ölçümünde klasik sınırların ötesine geçme potansiyeli sunarak hem bilimsel hem de teknolojik açıdan önemli fırsatlar sağlamaktadır. Süperpozisyon, dolanıklık, sıkıştırılmış durumlar ve kuantum korelasyonlarının kullanılmasıyla geliştirilen sensörler, standart kuantum sınırına yaklaşan veya uygun koşullarda bu sınırı aşabilen hassas ölçümler gerçekleştirebilir. NV merkezleri, soğuk atom interferometreleri, tuzaklanmış iyonlar, Rydberg atomları ve süperiletken devreler gibi platformlar, hem laboratuvar prototipleri hem de saha uygulamaları için güçlü bir teknolojik temel oluşturmaktadır. Bu yaklaşımlar, yalnızca ölçüm hassasiyetini artırmakla kalmayıp, klasik yöntemlerle erişilemeyen düşük sinyal seviyelerinde algılama, gürültüye dayanıklı ölçüm ve yeni görüntüleme tekniklerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

NV merkezli kuantum manyetometreler, tek ve dolanık foton kaynakları, SPAD ve SNSPD gibi teknolojiler laboratuvar ve özel uygulamalarda aktif olarak kullanılmaktadır. Kuantum LIDAR, kuantum radar, otonom kuantum seyrüsefer sistemleri ve uzay tabanlı kuantum sensörleri ise prototip veya erken saha test aşamasında olup önemli uygulamalar arasında değerlendirilmektedir. Özellikle savunma ve güvenlik alanında kuantum aydınlatma prensibine dayalı radar sistemleri ve hassas manyetometreler gürültüye dayanıklı algılama ve platform tespiti için önem arz etmektedir.

Soğuk atom gravimetreleri, nano ölçekli kuantum MRI, kuantum antenler ve topolojik malzeme tabanlı sensörler gibi birçok teknoloji; halen laboratuvar veya prototip aşamasında olup, ileri düzey kuantum kontrol teknikleri, ultra kararlı ortamlar ve yeni nesil malzemelerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Benzer şekilde, taşınabilir atomik saatler, kuantum antenler ve III-V kuantum nokta fotonuğı gibi teknolojiler potansiyel olarak özgün ve yeni fırsatlar barındıran yetenekler sunsa da, saha kullanımı için ölçeklenebilirlik, sağlamlık ve entegrasyon konularında zorluklarla yüzleşmektedir. Bu teknolojiler kapsamlı araştırma, geliştirme ve mühendislik çabaları gerektirmelerine rağmen, kuantum algılama alanında yüksek bilimsel potansiyele sahip ve dönüştürücü etki yaratması öngörülen, uzak vadeli stratejik hedefleri temsil etmektedir. Bu başlıklar, hassas ölçüm, seyrüsefer, gravimetri ve biyomedikal görüntüleme gibi yüksek etkili uygulamaları öne çıkararak kuantum algılama alanında stratejik yatırımlar için önemli araştırma alanlarıdır. Ancak, bu teknolojilerin operasyonel kullanımının daha uzun vadede mümkün olacağı öngörülmektedir.

Çift kullanımlı doğası nedeniyle stratejik olarak önemli görülen kuantum algılamanın, ulusal güvenlik, istihbarat ve kamu dayanıklılığı için önemli etkileri bulunmaktadır. Ancak çevresel hassasiyet, sistem entegrasyonu gibi mühendislik zorlukları, maliyet, minyatürleştirme, nitelikli iş gücü eksikliği ve teknolojinin kötüye kullanılması veya kontrolsüz yayılması gibi temel zorluklar devam etmektedir. Teknolojinin dönüştürücü potansiyelinin tam olarak hayata geçirilmesi, özellikle önümüzdeki on yılda sistem düzeyinde entegrasyon ve sağlamlık artışına,

ayrıca hkmetler ve sanayinin bu alandaki riskleri azaltacak stratejik yatırımlarına bağlı olacaktır. Küresel kuantum algılama pazarının, savunma ve endüstriyel uygulamaların etkisiyle önümüzdeki on yıl içinde önemli ölçüde büyümesi beklenmektedir. Bu nedenle kuantum algılama teknolojileri stratejik öneme sahip çift kullanımlı teknolojiler arasında değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak kuantum algılama, kuantum hesaplama ya da daha erken ticarileşme potansiyeline sahip olmakla birlikte, mevcut durumda laboratuvar lğinden operasyonel sistemlere geçiş aşamasında bulunan stratejik bir teknoloji alanıdır. Önümüzdeki dönemde özellikle savunma, uzay, haberleşme ve hassas ölçüm teknolojilerinde kritik etkiler oluŐturması beklenmektedir.

7.3. Haberleşme Odak alıŐma Grubu-3 (OG-3)

7.3.1. Genel Bilgi

Klasik haberleşme sistemleri, bilgiyi elektrik sinyalleri veya elektromanyetik dalgalar aracılığıyla bitler halinde iletmektedir. Klasik haberleşme güvenliği ise büyük ölçüde hesaplama karmaŐıklıėına dayalı matematiksel algoritmalar üzerine kurulmuŐtur. Kuantum haberleşme, bilgiyi fotonların kuantum durumları (kübitler) biçiminde iletirken, kuantum haberleşme güvenliği matematiksel varsayımlar yerine doğrudan kuantum mekaniği yasalarına dayanır. Bu temel model deėiŐimi, kuantum haberleŐmeyi özellikle siber güvenlik ve stratejik veri iletimi açısından 'kırılmaz' bir zm olarak öne çıkarmaktadır.

Kuantum haberleşme teknolojisinin güvenlik yapısı, birbirini tamamlayan iki temel yaklaŐıma dayanır. İlk yaklaşım, kuantum mekaniği ilkelerini kullanarak anahtar dağıtımını fiziksel olarak güvence altına alan QKD protokolleridir. İkinci yaklaşım ise kuantum bilgisayarlar karŐısında dayanıklı olması amaçlanan zor matematiksel problemlere dayanan PQC yöntemleridir. PQC, mevcut klasik haberleşme altyapısıyla uyumlu çalıŐabildiėinden QKD'nin henüz yaygınlaŐmadıėı sistemlerde kuantum tehditlerine karşı bir geçiş zm olarak konumlandırılmaktadır. Her iki yaklaŐımın bir arada kullanıldığı hibrit güvenlik mimarileri ise uzun vadeli güvenlik hedefleri umut vadeden bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

Güvenli haberleşme altyapısını tehdit eden baŐlıca geliŐmelerden biri, kuantum bilgisayarların mevcut Őifreleme algoritmalarını zme potansiyelidir. Bu bölüm kapsamında kuantum haberleşme ekosistemi, teknolojik olgunluk ve uygulama alanları gözetilerek dört ana başlık altında detaylandırılmaktadır:

- Kuantum İnternet
- Kuantum Anahtar Dağıtımı
- Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler

- Kuantuma Dayanaklı Kriptografi

Kuantum İnternet

Kuantum internet, kuantum mekaniği ilkelerine dayalı olarak çalışan yeni nesil bir iletişim ağıdır. Klasik internetten temel farkı, bilginin kuantum dolanıklık ve kuantum süperpozisyon özellikleri aracılığıyla iletilmesidir. Bu yapı, herhangi bir dinleme giriŐiminin kuantum durumunu geri alınamaz biçimde bozmasını zorunlu kıldığından, iletiŐimin fiziksel düzeyde güvence altına alınmasına olanak tanır [52].

Kuantum internetin temelinde kuantum dolanıklık ilkesi yer alır. Dolanık parçacıklardan birinin kuantum durumu ölçüldüğünde, diğerinin durumu aralarındaki mesafeden bağımsız olarak anında belirlenir. Bu durumda, fiziksel bir parçacığın aktarımı söz konusu olmaksızın yalnızca kuantum durum bilgisi bir noktadan diğerine iletilir [53].

Bu süreçlerin iŐletilebilmesi için kuantum internet altyapısı, kuantum tekrarlayıcılar, kuantum anahtarlayıcılar ve kuantum belleklerden oluşan karmaŐık bir aĐ gerekmektedir [53]. Söz konusu altyapı, dağıtık kuantum hesaplama, kuantum algılayıcı ağları ve ultra güvenli iletişim sistemleri gibi alanlarda dönüştürücü uygulamalara zemin hazırlamaktadır. Bununla birlikte, kuantum durumların kırılmalığı, dekoherans süreleri ve uzun mesafeli iletiŐimdeki teknik güçlükler nedeniyle teknoloji henüz deneysel aŐamdadır [52].

Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)

QKD, iki taraf arasında Őifreleme anahtarlarının güvenli biçimde paylaŐılmasını sağlayan bir kuantum haberleşme tekniğidir. QKD, bu süreçte kuantum mekaniği yasalarından yararlanarak geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha yüksek bir güvenlik düzeyi sağlar. Sistemin iŐleyiŐi fotonların üretilmesi ve iletilmesinden baŐlayarak ölçüm, anahtar ayıklama, hata düzeltimi ve gizlilik artırımı adımlarını kapsar. Hata düzeltimi ve gizlilik artırımı aŐamaları yüksek işlem gücü gerektirdiğinden QKD sistemlerinde paralel işlem kapasitesi yüksek donanımlar (GPU, FPGA, CPU vb.) kritik rol oynamaktadır [54].

Bir QKD sisteminde protokol, güvenli anahtar oluŐturmak için izlenen adımlar bütününü, algoritma ise bu adımların hesaplama katmanında nasıl yürütüleceğini tanımlar.

QKD cihazları bu protokolleri gerçek dünya koşullarında hayata geçiren özel donanım sistemleridir. Bu sistemler foton kaynakları, kuantum durum hazırlayıcıları, iletim kanalları (fiber optik veya serbest uzay) ve dedektörler [55] olmak üzere dört ana bileŐenden oluşur. Foton kaynağı bileŐeninde hazırla-ve-l tabanlı protokoller için kazanç anahtarlamalı pikosaniye lazerler yaygın biçimde tercih edilir, bu lazerler zayıflatılmıŐ eŐvreli darbe (weak coherent pulse, WCP) tekniğiyle tek foton kaynağı iŐlevi görecek biçimde yapılandırılır [56].



Femtosaniye lazerler ise geniş spektral bantları nedeniyle QKD uygulamalarında doğrudan kullanılmamaktadır. Kuantum durum hazırlayıcıları, gönderici tarafın (Alice) kuantum bitlerini belirli bazlarda ve belirli kuantum durumlarında üretmesini sağlayan fiziksel ve mantıksal alt sistemlerdir. Kuantum durum hazırlayıcıları, QKD'nin güvenliğinin temelini oluşturur. İletim kanalları, hazırlanan kuantum durumlarının fiziksel ortam üzerinden taŐındıđı yapıdır. BaŐlıca fiber optik ve serbest uzay olmak üzere iki tür iletim kanalları mevcuttur. Dedektörler, alıcı (Bob) tarafına gelen kuantum durumlarını ölçen aygıtlardır. Bu dedektörler tek fotonları algılamak, baz seçimine göre ölçüm yapmak ve klasik bit çıktısı üretmek gibi iŐlevleri yerine getirmektedir.

QKD protokolleri kullanılan kuantum sinyalinin türü ve kuantum durumlarının paylaŐılma biçimi olmak üzere iki bağımsız boyut üzerinden sınıflandırılır.

Birinci boyutta protokoller ikiye ayrılır. Bu protokoller Ayrık DeđiŐkenli QKD (Discrete Variable Quantum Key Distribution, DV-QKD) ve Sürekli DeđiŐkenli QKD (Continuous Variable Quantum Key Distribution, CV-QKD) olarak isimlendirilir. DV-QKD'de bilgi, tek fotonların polarizasyon veya faz gibi sayılabilir fiziksel özelliklerine kodlanır, güvenlik ise kopyalanamama teoremi ve ölçümün bozucu etkisine dayanır. Uydu entegrasyonu ile erişim mesafesi önemli ölçüde artırılabilir [57]. CV-QKD'de bilgi, elektromanyetik alanın genlik ve faz bileŐenlerine kodlanır. Mevcut telekomünikasyon altyapısıyla uyumlu çalışması önemli bir avantaj sağlarken, dış gürültüye duyarlılığı erişilebilir mesafeyi kısmen sınırlar [58].

İkinci boyutta protokoller yine ikiye ayrılır. Hazırla-ve-l Protokollerinde (Prepare-and-Measure) gönderici taraf önceden belirlenmiŐ kuantum durumlarını hazırlayarak alıcıya iletir, uygulama kolaylığı nedeniyle ticari sistemlerde tercih edilir. BB84, B92 ve SARG04 bu sınıfa girer. QKD protokolleri arasında en yaygın kullanılan protokol BB84'tür [59]. BB84'te gönderici (Alice) rastgele polarizasyon durumlarında fotonlar gönderir, alıcı (Bob) bunları rastgele seçilen ölçüm tabanlarıyla ölçer ve yalnızca eŐleŐen taban seçimleri korunur. Araya giren bir dinleyici (Eve) kuantum durumlarını bozacağından bu girişim hata oranındaki artıŐla tespit edilebilir. B92 protokolü daha basit bir uygulama yapısına sahipken [60] SARG04, foton sayısı bölme saldırılarına karşı daha dirençli biçimde tasarlanmıŐtır. Sürekli deđiŐkenli protokoller tutarlı ışık durumlarından yararlanarak yüksek anahtar üretim hızlarına ulaŐabilmektedir [58].

Dolanıklık Tabanlı Protokollerde güvenlik, taraflar arasında paylaşılan dolanık kuantum durumlarına dayanır ve Bell eŐitsizliklerinin ihlaliyle doğrulanabilir. E91 ve BBM92 protokolleri bu yaklaŐımın en bilinen örnekleridir [56]. E91 güvenliği Bell eŐitsizliđi ihlaliyle doğrulayan dolanıklık tabanlı bir QKD protokolyken, BBM92 BB84'n dolanıklık tabanlı ve daha pratik uygulanabilir sürümüdür.

Kuantum anahtar dağıtım protokolleri çoğunlukla ideal cihaz varsayımları altında geliştirilmektedir; ancak gerçek sistemlerde kullanılan fiziksel bileşenlerin kusursuz



davranmaması, güvenlik açıklarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu açıklıklara yapılan saldırılara yan kanal saldırıları (side-channel attacks) adı verilir. Yan kanal saldırılarına karşı farklı yaklaşımlar uygulanmaktadır [57].

Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler

Kuantum haberleŐmede klasik sistemlerden farklı olarak tek foton kaynakları, kuantum durum iŐleyicileri, ultra düşük gürültülü algılayıcılar ve kuantum bellek üniteleri olmak üzere dört temel bileşen kullanılmaktadır [61].

Tek foton kaynakları, kuantum bilgisini taşıyan fotonları üretir. Genel olarak bu iŐlev çoğunlukla WCP tekniğiyle yapılandırılmıŐ pikosaniye lazerlerle yerine getirilir. Parametrik aŐaĐı dönüşüm (parametric down-conversion, PDC) tabanlı kaynaklar ise özellikle dolanık foton çifti üretiminde kullanılarak kuantum haberleşme sistemlerinde destekleyici donanım olarak görev yapar [61]. Kuantum durum iŐleyicileri, fotonların polarizasyon, faz veya zaman dilimi gibi kuantum özelliklerini protokolün gerektirdiği biçimde hazırlar ve dönüŐtürür. Elektro-optik modülatörler ve interferometre yapıları bu bileŐenin temel unsurlarıdır. Ultra düşük gürültülü algılayıcılar, iletilen fotonları tespit ederek ölçüm yapar. İki yaygın teknoloji ne çıkmaktadır. SNSPD yüksek algılama verimliliği ve pikosaniye düzeyinde zamanlama znrlĞ sunarken, ığ Foto Diyotları (APD) daha düşük maliyetli bir alternatif oluşturur [62]. Kuantum bellek üniteleri, kuantum durumlarını bozulmadan geçici olarak depolayabilmektedir. Bu birimler, özellikle senkronizasyon ve dolanıklık dağıtımının kritik olduğu uygulamalarda önemli bir bileŐendir [63].

Kuantum sinyalleri, fiber optik ortamda mesafe arttığa zayıflamakta ve koherans kaybı nedeniyle bozulmaktadır. Klasik haberleŐmede kullanılan sinyal yükselteçlerinin aksine, kuantum durumları kopyalanamama teoremi gereği doğrudan ykseltilemedikleri için uzun mesafeli kuantum haberleşme için özel bileşenlerin kullanılması zorunludur [64].

Kuantum röle cihazları (quantum relays), dolanıklık deĐiŐtirme (entanglement swapping) yoluyla iki düğüm arasındaki kuantum korelasyonunu aktarır, ancak kuantum belleği gerektirmediğinden yalnızca sınırlı mesafe uzatımı sağlar.

Kuantum tekrarlayıcılar (quantum repeaters) ise uzun mesafeli kuantum haberleŐmenin temel altyapı bileŐenidir. İletim hattını segmentlere bölerek her segmentte dolanık foton çiftleri oluşturur, ardından dolanık çift arıtma (entanglement purification) ile bozulmuŐ dolanıklık kalitesi iyileŐtirilir ve dolanık çift deĐiŐtirme (entanglement swapping) protokolüyle komŐu segmentlerin dolanıklığı birleŐtirilerek uçtan uca kuantum kanalı tesis edilir [[63], [64]].

Kuantum tekrarlayıcılarda kullanılan protokollerin QKD protokollerinden iŐlevsel olarak ayrıŐtıĐını belirtmek gerekir. QKD protokolleri (BB84, E91, vb.) Őifreleme anahtarı üretmeyi hedeflerken, dolanık çift arıtma ve dolanık çift deĐiŐtirme protokolleri kuantum kanalının



kendisini tesis etmeye ve sürdürmeye yöneliktir. Bununla birlikte E91 gibi dolanıklık tabanlı QKD protokolleri, kuantum yineleyici altyapısıyla doğrudan uyumlu çalıŐarak uzun mesafeli güvenli haberleŐmeyi mümkün kılmaktadır [63]. Kuantum tekrarlayıcıların iŐlevselliđi büyük ölçüde evre koŐullarının kararlılığına bağlıdır. Kriyojenik soğutma, titreşim yalıtımı, elektromanyetik kalkanlama ve kararlı lazer sistemleri bu gereksinimler arasında ne çıkmaktadır [64].

Kuantuma Dayanıklı Kriptografi

Kuantum kriptografi, bilginin gizliliğini ve btnlyđn kuantum mekaniği ilkeleri aracılığıyla güvence altına alan bir Őifreleme yöntemidir. Güvenliğini matematiksel hesaplama güçlüğüne değil, kuantum mekaniğinin ölçüm ve süperpozisyon ilkelerine dayandırır, bu nedenle klasik kriptografi yöntemlerinden temel bir farkla ayrılır. Shannon'ın mükemmel gizlilik teoremi çerçevesinde tek kullanımlık Őifre ile eŐdeđer güvenlik düzeyi sunduğu gösterilmiŐtir [65].

Bu alanda ne çıkan iki yöntem kuantum eŐbiçimli Őifreleme (quantum homomorphic encryption) ve kuantum gizli paylaŐım protokolleridir (quantum secret sharing protocols). Kuantum eŐbiçimli Őifreleme, verilerin Őifresi zlmeden üzerlerinde hesaplama yapılabilmesine imkân tanıdığından bulut tabanlı uygulamalar için kritik bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir [66]. Kuantum gizli paylaŐım protokolleri ise gizli bir bilginin parçalara bölünerek farklı taraflara dağıtılmasını ve yalnızca yeterli sayıda parçanın bir araya getirilmesiyle yeniden elde edilebilmesini sağlar [67].

Günümüzde yaygın biçimde kullanılan RSA ve ECC gibi klasik Őifreleme yöntemleri, büyük sayıların çarpanlarına ayrılması gibi problemlerin klasik bilgisayarlar tarafından çözülmesinin pratik olarak imknsız olduğu varsayımına dayanır. Ancak Shor'un geliŐtirdiđi algoritma, yeterli kapasitedeki bir kuantum bilgisayarın bu problemleri etkin biçimde çözebileceğini kanıtlamıŐ ve mevcut Őifreleme altyapısının uzun vadeli güvenilirliğini sorgulanır hale getirmiŐtir [9]. Bu tehdidin somutlaŐmasıyla birlikte kuantum sonrası kriptografi alanındaki çalışmalar hız kazanmıştır.

NIST, 2016 yılında baŐlattıđı standardizasyon sürecini 2024'te tamamlayarak kuantum saldırılarına dayanıklı ilk resmi algoritmalarını yayımlamıŐtır [68]. StandartlaŐtırılan algoritmalar üç temel yaklaŐıma dayanmaktadır. Bu yaklaşımlar kafes tabanlı Őifreleme, kod tabanlı Őifreleme ve hash tabanlı Őifreleme olarak isimlendirilmektedir. Kafes tabanlı Őifreleme, çözmesi zor matematiksel problemlerden yararlanır, CRYSTALS-Kyber ve CRYSTALS-Dilithium bu yöntemin örnekleridir. Kod tabanlı Őifreleme ise hata düzeltme kodlarını çözmenin zorluğuna dayanır, McEliece sistemi 1978'den beri güvenli kabul edilmektedir [69]. Hash tabanlı dijital imza algoritmaları, geri döndürülemez kriptografik zet fonksiyonlarına dayanır

ve SPHINCS+ algoritması, kuantuma dayanıklı kriptografi standartları sürecinde seçilen algoritmalar arasındadır.

7.3.2. Teknoloji Konuları

Kuantum haberleşme alanındaki yakın vadeli konular **Tablo 14** ve, uzak vadeli konular **Tablo 15**'te yer almaktadır.

Tablo 14. OG-3 Yakın Vade Konu nerileri

Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
1 Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Uzay Tabanlı Sistemler için Hassas Zaman Senkronizasyon Protokolü Geliştirilmesi: <i>Uydu-uydu, uydu-yer haberleŐmesini destekleyecek, otomatik hata düzeltme özelliğine sahip senkronizasyon protokolünün geliştirilmesidir.</i>	Yakın
2 Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Uzayda Güvenli Haberleşme için Mikro Yerçekimi Uyumlu Kuantum Modüllerinin Geliştirilmesi: <i>Uzay ortamında çalıŐabilecek kuantum haberleşme modüllerinin (atomik saat, optik bileşenler, dolanık foton kaynağı, vb.) ve hassas elektronik sistemlerin geliştirilmesidir.</i>	Yakın
3 Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Sıkıştırılmış (Squeezed) IŞık Teknolojileri: <i>Kuantum haberleŐmede gürültüyü azaltarak daha hassas ve güvenli iletişim sağlayan kuantum iŐık kaynaklarının geliştirilmesidir.</i>	Yakın
4 Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	QKD Sistemlerinin Post-Kuantum Kriptografi ile Entegrasyonu: <i>Kuantum anahtar dağıtımı, post-kuantum kriptografi algoritmalarıyla birlikte hibrit güvenlik altyapılarının geliştirilmesidir.</i>	Yakın
5 Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Kuantum Rassal Sayı retelerinin Geliştirilmesi: <i>Kriptografik anahtarların güvenilirliğini artırmak için kuantum rassal sayı retelerinin geliştirilmesidir.</i>	Yakın
6 Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Kuantum Anahtar Dağıtımı Güvenlik Protokolleri için Analiz ve Standardizasyon Metotlarının Geliştirilmesi: <i>Kuantum anahtar dağıtım protokollerinin kriptografik analiz kriterlerinin belirlenmesi, sertifikasyon sürecinin tanımlanması, güvenliğinin test edilmesidir.</i>	Yakın
7 Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Farklı Dalgaboylarında Uzun EŐevrelilik Sürelerine Sahip Kuantum IŞık Kaynaklarının Geliştirilmesi:	Yakın

Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
	<i>Görünür ve kızılötesi spektrumda farklı dalga boylarında yüksek saflıkta tek foton üretimi ve uzun koherens sürelerine sahip kuantum ışık kaynaklarının geliştirilmesidir.</i>	
8 Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Apokromatik Objektifler ve Nanopozisyonlayıcıların Geliştirilmesi: <i>Tek foton ışık kaynaklarının yüksek verimde uyarımı ve ölçümü için düşük sıcaklıkta çalışan yüksek nümerik açıklıklı apokromatik objektifler ile hassas nanopozisyonlayıcıların geliştirilmesidir.</i>	Yakın
9 Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Frekans Kilitli Dar Bant Genişlikli Tek/Dolanık Foton Kaynağı Üretimi: <i>QKD sistemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmak amacıyla, belirli frekanslara kilitlemiş, dar bant genişliğine sahip, zaman kontrollü tek ve dolanık foton kaynaklarının geliştirilmesi hedeflenmektedir.</i>	Yakın
10 Kuantuma Dayanıklı Kriptografi	Kuantum Bilgisayar Tehditlerine Karşı Dayanıklı Asimetrik Kriptografi ve İmza Sistemlerinin Geliştirilmesi: <i>Kuantum bilgisayarların mevcut kriptografik sistemlere yönelik oluşturduğu tehditlere karşı dayanıklı asimetrik anahtar ve imza algoritmalarının geliştirilmesine yöneliktir. Bu kapsamda PQC protokollerinin yanı sıra farklı matematiksel problemlere dayanan alternatif algoritmaların geliştirilmesidir.</i>	Yakın

Kuantum haberleşme alanındaki uzak vadeli konular sırasıyla Őu Şekilde belirlenmiştir:

Tablo 15. OG-3 Uzak Vade Konu Önerileri

Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
1 Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Kuantum Tekrarlayıcıların Geliştirilmesi: <i>Kuantum iletişim ağlarında uzun mesafelerde oluşan kuantum durum kaybını ve bozunmayı azaltmak amacıyla kullanılan ara düğüm sistemlerinin ve kuantum iletişim için gerekli alt bileşenlerin geliştirilmesidir.</i>	Uzak
2 Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Klasik Fiber Optik Ağlarda Güvenlik için Hibrit Haberleşme Sistemlerinin Tasarımı: <i>Kuantum bilgisayarların mevcut kriptografik sistemler üzerinde oluşturduğu güvenlik tehditlerine karşı, klasik fiber optik haberleşme altyapıları ile kuantum haberleşme teknolojilerini birlikte kullanabilen hibrit (klasik-kuantum) iletişim sistemlerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.</i>	Uzak
3 Kuantum İnternet	Kuantum Dirençli İnternet Protokollerinin Geliştirilmesi:	Uzak

Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
	<i>Kuantum bilgisayarların klasik kriptografik sistemlere yönelik tehditlerine karşı dayanıklı internet protokollerinin tasarımı ve internet protokollerinin geliştirilmesidir.</i>	
4 Kuantum İnternet	Milimetre Dalga Boylarında Serbest Uzay Kuantum Haberleşme: <i>Milimetre dalga bandında, serbest uzay kuantum kanalları üzerinden atmosferik zayıflama ve gürültü etkilerine dayanıklı güvenli veri iletiminin sağlanmasıdır.</i>	Uzak
5 Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Kuantum Hafıza Geliştirilmesi: <i>Kuantum durumlarını ölçmeden ve bozulmadan geçici olarak saklayabilen ve kuantum haberleşme sistemlerinde dolanıklık dağıtımını ve güvenli veri iletimini sağlayan kuantum hafızanın geliştirilmesidir.</i>	Uzak
6 Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Kuantum Dağıtık Hesaplama Teknolojilerinin Geliştirilmesi: <i>Kuantum ağları üzerinden paylaşılan kuantum kaynaklarını kullanarak dağıtık kuantum işlem kapasitesini artırmayı ve yüksek hassasiyetli ölçümlerin yapılmasını amaçlamaktadır.</i>	Uzak
7 Kuantuma Dayanıklı Kriptografi	Homomorfik Őifreleme Yoluyla Dağıtık Kuantum Hesaplama: <i>Kuantum ağları üzerinde paylaşılan kuantum verilerinin Őifreli biçimde iŐlenerek güvenli, paralel ve ölçeklenebilir kuantum hesaplamaların gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır</i>	Uzak
8 Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Kuantum Anahtar Dağıtımının Mobil Őebeke Entegrasyon Mimarisinin Geliştirilmesi: <i>Kuantum güvenli anahtarların mobil iletişim altyapılarına entegre edilerek güvenli, ölçeklenebilir ve yüksek hızlı veri iletiminin sağlanması amaçlamaktadır..</i>	Uzak
9 Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Kuantum Anahtar Dağıtımı Datalink Katmanı Yazılım Modülünün Geliştirilmesi: <i>QKD protokollerinin veri bağlantı katmanında (iki aĐ cihazı arasındaki güvenilir veri iletimi) uygulanmasını sağlayarak güvenli anahtar iletimi ve kuantum destekli haberleşme sistemlerinin entegrasyonunu amaçlamaktadır.</i>	Uzak
10 Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Gaussian-Olmayan Kuantum Hallerinde Dolanıklık Kriterleri: <i>QKD'de, Gaussian olmayan ve güçlü kuantum dolaŐıklığı taşıyan, aynı zamanda üretimi kolay hallerin kullanımını desteklemek için dolanıklık kriterleri ve nicel ölçüm araçları geliştirilmesi amaçlanmaktadır.</i>	Uzak
11 Kuantum Haberleşme Destekleyici	Lazer Kontrollü Plazmonik Yapılarla Kuantum Dolanıklık Üretimi:	Uzak

Alt Konu Başlıkları	Konu Adı ve Kapsamı	Vade
Donanım ve Bileşenler	<i>Metal nanopartiküllerin ve nanoantennelerin optik özelliklerinin doğrusal olmayan optik süreçlerle manipüle ederek kuantum dolanık foton çiftlerinin üretilmesi çalıŐmasıdır.</i>	
12 Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	<p>Plazma Antennelerin Kuantum Sistemleri için Geliştirilmesi:</p> <p><i>Plazma antenler, frekans ayarlanabilirlik, düşük kayıp ve yeniden yapılandırılabilirlik avantajlarıyla geleneksel antenlere üstünlük sağlarken, kuantum haberleşme sistemleri güvenli veri iletimi ve yüksek hassasiyetli algılama özelliğiyle dikkat çekmektedir. Tek foton seviyesinde haberleşme ve kuantum radar uygulamaları için plazma antenlerin kuantum frekans dönüŐtürücülere entegrasyonu çalıŐmasıdır.</i></p>	Uzak
13 Kuantuma Dayanlı Kriptografi	<p>Post Kuantum Kriptografi (PQC) için Gömülü Sistem Geliştirilmesi:</p> <p><i>PQC algoritmaları, geniş ölçekli ađ yapılarında ve yoğun veri iletimi gerektiren sistemlerde yüksek işlem yükü, bellek kullanımı ve enerji tüketimi gibi nedenlerle yeterli verimlilik sağlayamamaktadır. Bunun temel nedeni, PQC algoritmalarının platforma özgü optimizasyon gereksinimleri ile mevcut donanım altyapılarının sınırlı performansdır. Mikrodenetleyici ve FPGA tabanlı sistemlerde algoritma hızlandırma, bellek optimizasyonu ve güvenli haberleşme performansı artırılması amacıyla PQC gereksinimlerine uygun düşük güç tüketimli, yüksek performanslı ve optimize edilmiş gömülü sistem mimarilerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.</i></p>	Uzak

7.3.3. GZFT Analizi

Türkiye'nin kuantum haberleşme alanındaki mevcut durumunu, güçlü araştırma kapasitesi ve yetenekli insan kaynağı belirlemektedir. Kuantum OTAĞ alıŐmaları kapsamında kuantum haberleşme özelinde gerçekleştirilen GZFT analizinin bulguları Türkiye'nin bu alandaki durumunu ve gelecekteki potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Güçlü Yönler

- Üniversitelerde kuantum teknolojileri odaklı lisansüstü programların yaygınlaŐmasıyla birlikte kuantum fiziği, optik ve ileri matematik alanlarında yetiŐmiŐ, yüksek nitelikli ve disiplinlerarası çalışma yetkinliğine sahip insan kaynağının olması,
- QKD protokolleri, SNSPD ve yüksek stabiliteye sahip fiber lazer teknolojilerinde Ar-Ge aŐamasından somut prototipleme aşamasına geçiş yapmıŐ yerli mühendislik kabiliyetlerinin olması,



- Mevcut fiber optik ađ altyapısının, kuantum haberleşme sistemleriyle hibrit çalıŐmasına olanak tanıyan özgün ađ mimarisi tasarım yetenekleri ve kuantum güvenli iletişim konseptine yönelik entegrasyon tecrübesi,
- Birden fazla merkezde eş zamanlı yrtlen çalışmalar sayesinde, kuantum kriptografi ve optik haberleşme alanında teorik bilgi birikiminin artması ve laboratuvar uygulamalarıyla desteklenmesi,
- Kuantum-klasik hibrit güvenlik katmanlarının geliştirilmesinde kritik altyapı güvenliği standartlarına uygun sistem seviyesi zm üretme yeteneği,
- Üniversite ve Araştırma Merkezleri tarafından ulusal ve uluslararası (r. EU Horizon, COST, NATO projeleri, vb.) bilgi ve teknoloji iŐbirliklerinin mevcudiyeti.

Zayıf Yönler

- Kuantum teknolojileri gibi yüksek maliyetli ve uzun soluklu Ar-Ge süreçleri için ayrılan bütçelerin sınırlı kalması,
- Geliştirilen teknolojilerin laboratuvar ortamından (Ar-Ge ıktıları) endüstriyel ölçekteki prototiplere ve nihai ürünlere dönüŐtürülmesini sağlayacak yapıların yetersizliği,
- Stratejik donanımlarda yerli üretim kapasitesinin kısıtlı olması ve dışa bağımlılığın olması,
- Kuantum haberleşme ağları için henüz ulusal veya uluslararası düzeyde kabul görmüŐ yerleŐik protokollerin, sertifikasyon süreçlerinin ve farklı sistemlerin birbirine entegrasyonunu sağlayacak standartların eksikliği,
- Kuantum haberleŐmede alanında kullanılan kuantum donanımlarının yüksek maliyeti ve ihtiyaç duyulan hassas optik/elektronik altyapının kurulum zorluğu nedeniyle, teknolojinin yaygın kullanım alanına eriŐememesi ve ticarileşme hızının yavaş kalması.

Fırsatlar

- Savunma, enerji, sağlık ve uzay teknolojileri başta olmak üzere, güvenli veri iletimine ihtiyaç duyan kritik sektörlerde kuantum haberleŐmenin yeni pazar oluŐturması ve Türkiye için yüksek ihracat potansiyeli yaratması,
- Kuantum bilgisayarların mevcut klasik Őifreleme yöntemlerini kırma potansiyeline karşı, finans, telekomünikasyon ve devlet haberleŐmesi sektörlerinde kuantum dirençli üzümlere duyulan acil ihtiyacın yarattığı pazar fırsatı,
- Mevcut akademik derinliğin saha uygulamalarına ve ticari ürünlere dönüŐtürülmesi için uygun ekosistem Őartlarının oluşması,
- Gelişmekte olan uluslararası kuantum standartlarına uyum sağlanması sayesinde, Türkiye'nin küresel regülasyon süreçlerinde daha etkin rol alma ve teknoloji transferi ağlarında merkezi bir konuma gelme potansiyeli,



- Ulusal/uluslararası kuantum araştırma programları ve fon kaynakları ile kuantum haberleŐmeye yönelik çalıŐmaların desteklenmesi,
- QKD, yapay zekâ destekli aĐ yönetimi ve hibrit (kuantum-klasik) güvenlik sistemleri ve PQC alanlarında artan küresel Ar-Ge alıŐmaları , yenilikçi çözümler geliştirilmesi ve fikri mülkiyet haklarının elde edilmesine yönelik fırsatların olması,
- Ulusal enerji Őebekeleri, nükleer santraller ve askeri haberleşme ağları gibi kritik altyapıların korunmasında yerli kuantum çözümlerinin uygulanmasıyla stratejik üstünlüğün sağlanması.

Tehditler

- Ulusal düzeyde yetiŐtirilen kuantum uzmanlarının ve araŐtırmacıların, yurt dıŐındaki yüksek bütçeli teknoloji Őirketleri veya araştırma enstitüleri tarafından transfer edilmesi ve ekosistemin sürdürülebilirliğini tehdit eden nitelikli iş gücü kaybı,
- Finansman, altyapı ve pazar eriŐimi açısından yüksek bütçelere sahip olan küresel teknoloji devlerinin ve geliŐmiŐ lkelerin, pazar standartlarını belirleyerek yerli girişimlerin nn kesmesi veya rekabet dışı bırakması,
- Kritik kuantum bileŐenlerinde (fotonik çipler, soğutma sistemleri, vb.) dışa bağımlılık nedeniyle, olası diplomatik kısıtlamalar veya ihracat yasakları sonucunda yerli projelerdeki tedarik riski,
- Kuantum haberleşme protokolleri ve güvenlik standartlarının, yerli çözümlerin entegre olamayacağı Şekilde küresel ölçekte Őekillenme olasılığı ve bu durumun Türkiye'nin dış pazarlara giriŐimini engellemesi.

7.3.4. Değerlendirmeler

Kuantum haberleşme alanı, klasik iletişim sistemlerinin ötesinde tam güvenli veri iletimi hedefleyen ve hızla gelişen stratejik bir teknoloji alanıdır. Bu alanın en önemli bileşenlerinden biri olan Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD), iletişimde kullanılan Őifreleme anahtarlarını kuantum mekaniği prensipleri üzerinden üretir ve dağıtır. Bu sayede iletişim kanalına yönelik dinlemeler fiziksel olarak tespit edilebilir hale gelir ve anahtara müdahale edilmesi iletiŐimi bozarak kendini belli eder. Bu zellik, QKD'yi geleneksel kriptografi yöntemlerine göre çok daha güvenli bir haberleşme yöntemi haline getirmektedir.

Bu sistemlerin tamamlayıcı bir diğer önemli bileŐeni ise Kuantum Rassal Sayı retici teknolojisidir. Kuantum süreçlerin doğası gereği ngrlemezliğinden yararlanarak gerçek rastgele sayılar üretir. Bu zellik kriptografi, siber güvenlik, finansal sistemler ve güvenli anahtar üretimi gibi çok geniş bir uygulama alanında kritik rol oynar.



Kuantum bilgisayarların tehditlerine karşı dirençli, bu bilgisayarlar ile yapılacak saldırılara dayanıklı teknikler kullanan klasik kriptografi yöntemi olan Kuantum Sonrası Kriptografi (PQC) teknolojileri de önemli bir çalışma alanıdır. Kuantum bilgisayarlarının siber güvenlik üzerindeki tehdidi uzak olsa da birçok ülke tarafından potansiyel kuantum tehdidine karşı hazırlık yapılmakta ve Őimdiden önem alınmaktadır. Bu tehditten en çok etkilenecek alanlar telekomünikasyon sektörü, finansal kurumlar, enerji sektörü, sağlık hizmetleri, kamu hizmetleri ve savunma sektörüdür.

Kuantum haberleşme teknolojisi kapsamında, yüksek güvenli küresel haberleŐmeyi vaat eden gelişmeler mevcuttur. Kuantum internet, gelecek 20 yılda beklenen büyük veri ihtiyacına uygun yüksek hızlı ve yüksek güvenli internet vaat etmektedir.

Kuantum haberleşme alanında dünya genelinde hem akademik kurumlar hem de özel sektör önemli ilerlemeler kaydetmektedir. Bu gelişmeler ülke bazında incelendiğinde farklı odak alanlarının ne çıktığı grlmektedir.

in, bu alanda nc ülkelerden biri olarak öne çıkmaktadır. 2010'lu yılların baŐından itibaren QuantumCTek QKD sistemleri ve kuantum haberleşme cihazları geliŐtirerek ülkenin altyapısına katkı sağlamıştır. 2016 yılında University of Science and Technology of China tarafından Micius uydusu üzerinden gerçekleştirilen kuantum anahtar dağıtımı, uzun mesafeli kuantum haberleŐmede önemli bir kilometre taŐı olmuştur. in günümüzde uydu tabanlı kuantum haberleşme ağlarında lider konumdadır. Uydu tabanlı tarafta ise düşük Dünya yörüngesindeki bir mikro uydu aracılığıyla 12.900 km mesafede QKD gerçekleŐtirilerek küresel ölçekli kuantum güvenli haberleŐmenin fizibilitesi gösterilmiŐtir [70].

Japonya'da University of Tokyo 2015'ten itibaren fotonik/optik tabanlı kuantum iletişim ve fiber tabanlı QKD sistemleri üzerinde çalıŐmaktadır. Toshiba ise 2010'lu yıllardan itibaren güvenli kuantum iletişim sistemleri ve pilot QKD projeleri geliştirmektedir.

Verizon ve Samsung gibi büyük oyuncular QKD'yi altyapılarına entegre etmeye baŐlamıŐ olup pazarın önümüzdeki on yılda hızlı bir büyüme sergilemesi beklenmektedir. Kuantum Rassal Sayı reteci (QRNG) alanında ise Samsung'un akıllı telefonlara QRNG entegrasyonu ve Toshiba'nın ip zeri QRNG geliŐtirmesi, teknolojinin kitlesele üretime hazır olduğunu göstermektedir.

ABD tarafında, Massachusetts Institute of Technology (MIT), California Institute of Technology ve University of Maryland 2000'li yıllardan itibaren kuantum internet protokolleri, kuantum tekrarlayıcılar ve güvenli kuantum iletişim teknolojileri üzerine çalışmalar yrtmektedir. 2016 yılında University of Maryland, kk ölçekli kuantum aĐ deneylerini gerçekleştirmiştir. Özel sektörde ise IBM kuantum bilgisayar ve aĐ simülasyonlarıyla, Quantinuum ise 2020'lerden itibaren kuantum güvenliği ve QKD tabanlı zmler üzerinde çalışmalar yapmaktadır. 2024



yılı, QKD alanında önemli dönüm noktalarına sahne olmuştur. Harvard niversitesi fizikçileri, mevcut telekomünikasyon fiberi üzerinden iki kuantum bellek düğümü arasında dünyanın en uzun fiber mesafesinde dolanıklık gösterimi gerçekleŐtirirken, Northwestern niversitesi araŐtırmacıları, kuantum durumlarını yoğun klasik veri trafiği eŐliĐinde 30 km'den fazla fiber üzerinden başarıyla iletmiŐtir [[23], [71], [72]]. Bu bulgu, kuantum ve klasik iletiŐimin aynı altyapıda sorunsuz bir Şekilde birlikte var olabileceğini göstererek, özel kuantum fiber ihtiyacını ortadan kaldırması bakımından özellikle kritik öneme sahiptir. NIST, 2024 yılında ilk üç kuantum sonrası kriptografi (PQC) standardını yayımlamıŐtır [68].

Kanada'da University of Waterloo 2002'den itibaren kuantum aĐ protokolleri ve fotonik teknolojiler üzerine çalışmalar yrtmektedir. Xanadu ise 2016 sonrası dönemde kuantum optik sistemler ve bulut tabanlı kuantum altyapı çözümleri geliŐtirmiŐtir.

Avrupa'da Delft University of Technology, 2017 yılında Hollanda'da kurulan kuantum internet test altyapısıyla uzun mesafeli kuantum bağlantıları ve aĐ protokolleri geliŐtirmiŐtir. İŐvire merkezli ID Quantique ise 2001'den bu yana QKD cihazları üretmekte ve bankalar ile devlet kurumlarına güvenli iletişim çözümleri sunmaktadır.

Genel olarak in uydu tabanlı kuantum haberleŐmede liderliğini sürdürürken, ABD ve Avrupa daha çok kuantum aĐ protokolleri ve test altyapılarına odaklanmakta, özel sektör ise teknolojinin ticarileŐtirilmesini hızlandırmaktadır. Uzun vadeli hedef, tamamen güvenli ve küresel ölçekte entegre bir kuantum internet altyapısının oluşturulmasıdır.

Türkiye'de kuantum haberleşme çalışmaları son yıllarda artmıŐtır. Boğaziçi niversitesi ve İstanbul Teknik niversitesi'nde kuantum kriptografi, kuantum haberleşme ve QKD protokollerine yönelik akademik çalışmalar yürütülmüş, özellikle fiber optik tabanlı kuantum haberleşme sistemleri üzerine teorik ve deneysel araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

QKD alanında 2019 yılında Özyeğin niversitesi koordinatörlüğünde TÜBİTAK BİLGEM ve Yeditepe niversitesi'nin katılımıyla kurulan kampüs içi kuantum haberleşme ağı kurulmuŐtur. İYTE'de iki boyutlu malzemelerdeki kusurlardan elde edilen tek foton kaynaklarıyla QKD deneysel olarak gösterilmiŐtir.

2018 yılında TÜBİTAK, kuantum teknolojileri alanında stratejik bir program baŐlatmıŐ ve hem akademi hem özel sektöre yönelik destek mekanizmaları oluŐturmuŐtur. Bu kapsamda Koç niversitesi ve Sabancı niversitesi kuantum iletişim protokolleri ve aĐ simlasyonları üzerine çalışmalar yrtmŐtr. 2020'li yılların baŐında TÜBİTAK destekli projelerle ulusal düzeyde kısa mesafeli kuantum aĐ testleri gerçekleştirilmiştir.

Kuantum haberleŐmenin temelini oluŐturan tek foton kaynaklarında doğrusal olmayan kristaller, kuantum noktaları, elmas içi kusur merkezleri ve 2D malzemelerdeki kusur mühendisliği baŐlıca yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Türkiye'de doğrusal olmayan



kristallerin üretimi henüz gerçekleştirilemese de ithal kristallerle tek foton, foton çifti ve dolanık foton kaynağı sistemleri başarıyla geliştirilmektedir. Qubitrium bu alanda NATO NCIA'ya ürün tedarik ederken, TÜBİTAK UME atomik buhar hücrelerini yerli olarak üretmekte, Nanome firması kuantum noktalarında endüstriyel uygulamalar geliştirmektedir. İYTE ve Bilkent Üniversitesi'nde kuantum yayıcılar üzerine araştırmalar sürdürölmekte, elmas kusur merkezleri alanında ise TÜBİTAK UME, Koç Üniversitesi, Apsilon ve Qubitrium'un katılımıyla EUREKA projesi kapsamında prototip üretimi hedeflenmektedir. Uzay uyumlu tek foton ve dolanık foton kaynakları da küp uydu platformlarıyla uyumlu olarak tasarlanmaktadır.

Qubitrium Si ve InGaAs tabanlı SPAD dedektörlerini üretmektedir. Quark Optical görünür bantta SPAD üzerine Ar-Ge çalışmalarını yürötmektedir. Dedektör okuma sistemlerinde her iki firma da FPGA ve yüksek çözünürlüklü zaman etiketleme modülleri geliştirmektedir.

ASELSAN 2019'dan itibaren kuantum kriptografi ve güvenli haberleşme prototipleri üzerinde Ar-Ge faaliyetleri yürötmüştür. 2025 yılında Turkcell ve ID Quantique, İstanbul'da fiber optik bağlantı üzerinden dünyanın ilk kıtalararası karasal QKD'sini başarıyla gerçekleştirmiştir [73]. Qubitrium, dolanık foton kaynakları, tek foton dedektörleri, zaman etiketleme sistemleri ve FPGA tabanlı kontrol birimlerini kapsayan küp uydu uyumlu minyatür kuantum haberleşme modülleri ticarileştirerek uluslararası pazara sunmuştur. Bu modüller, CubeSat ölçeğinde QKD testleri için kullanılabilir çözümler sunmaktadır. Qubitrium, 30 Mart 2026 tarihinde SpaceX Falcon-9'un Transporter-16 fırlatması ile dünyanın ilk ticari dolanıklık dağıtım sistemini düşük dünya yörüngesine yerleştirmiştir. Turkcell ve Türk Telekom'un QKD'nin mevcut fiber altyapılarına entegrasyonuna yönelik çalışmalarını sürmekte olup Qubitrium'un geliştirdiği açık kaynak yazılım çözümleri ise anahtar yönetimi konusunda araştırmacılara katkı sağlamaktadır.

TUSAŐ yüksek hassasiyetli teleskop sistemleri geliştirmekte olup NATO DIANA test merkezi statüsüne sahiptir, TÜBİTAK UZAY termal-vakum, BİAS ise titreşim-şok testleri konusunda endüstriye hizmet vermektedir.

TÜBİTAK MAM, üniversiteler ve özel sektörle iş birliği içinde yerli QKD cihazları ve prototip sistemler üzerinde çalışmalar yürötmektedir. Ayrıca Koç Sistem üniversitelerle iş birliği yaparak kurumsal kuantum güvenli iletişim çözümleri ve test ağları geliştirmektedir.

TÜBİTAK BİLGEM, ulusal güvenlik uygulamalarına yönelik QRNG sistemleri geliştirirken, lazer teknolojileri alanında LUMOS LASER femtosaniye tabanlı ürünler üzerinde çalışmalar yürötmektedir.

Türkiye'de kuantum haberleşme alanındaki mevcut ekosistem değerlendirildiğinde, savunma sanayi, araştırma merkezleri, üniversiteler ve özel sektörün katkılarıyla önemli bir bilgi birikimi oluştuğu görölmektedir. Üniversitelerde kuantum teknolojilerine yönelik lisansüstü programların ve araştırma faaliyetlerinin artması, bu alanda nitelikli ve disiplinlerarası insan



kaynağının yetiŐmesini desteklemektedir. Aynı zamanda farklı kurumlarda eş zamanlı yrtlen çalışmalar sayesinde kuantum haberleşme alanında teorik bilgi birikimi güçlenmekte, laboratuvar düzeyinde uygulamalı çalışmalar gerçekleŐtirilmekte ve ticari ürünler elde edilmektedir.

7.3.5. Sonuç

Kuantum Haberleşme Odak alıŐma Grubu-3 alanında lkemizde kuantum anahtar dağıtımı, kuantum rassal sayı reteleri, kuantum haberleşme ağları, kuantum iletişim protokolleri, tek foton, foton çifti ve dolanık foton kaynağına yönelik çalışmalar ve nitelikli insan gücü bulunmaktadır. OG-3 yakın vadeli konular kapsamında öncelik, güvenli kuantum haberleşme protokolleri ve modülleri, QKD ve PQC hibrit güvenlik altyapıları ve kuantum bilgisayar tehditlerine karşı dayanıklı kriptografi teknoloji konularındadır.

Belirlenen yakın vadeli konular, kuantum haberleşme ekosisteminin operasyonel katmanını oluŐturan ve mevcut telekomünikasyon altyapısıyla uyumlu bir geçiş süreci ngren teknolojileri kapsamaktadır. Hassas zaman senkronizasyon modülleri ve uzay-yer QKD platformlarının kuantum sonrası algoritmalarla entegrasyonu gibi konular hem temel araştırma literatüründe olgunlaŐmıŐ hem de pilot projelerde test edilmiş nitelikte olup, stratejik alanlarda ivedi kullanım potansiyeli taşımaktadır. Apokromatik objektifler, nanopozisyonlayıcılar ve kuantum iŐık kaynakları gibi destekleyici alt sistem bileşenleri, laboratuvar ortamından endüstriyel üretime geçiş eŐiđinde bulunmakta olup sistemlerin tekrarlanabilirliğini artıran kritik yapı taŐlarıdır. Hibrit güvenlik mekanizmaları, sıkıştırılmış iŐık teknolojileri ve frekans kilitli foton kaynaklarının geliştirilmesi ise, kuantum kriptografinin klasik sistemlerle sorunsuz entegrasyonunu sağlayan ve güvenlik protokollerinin standartlaŐmasını hızlandıran pratik çözümler sunmaktadır. QKD güvenlik protokollerinin analiz ve sertifikasyon süreçlerinin tamamlanması, teknolojinin ticari yaygınlık kazanması ve düzenleyici çerçevelere uyum sağlanması açısından öncelikli adımlardır. Bütünsel bir bakıŐla, bu başlıklar kanıtlanmış teknolojik temelleri güncel sistem mühendisliği yaklaŐımlarıyla birleŐtirerek, ulusal kuantum haberleşme altyapısının hızla inŐa edilmesi ve kritik iletişim sistemlerinin güçlendirilmesi için uygulanabilir ve zaman-etkin bir yol haritası çizmektedir.

Belirlenen uzak vadeli konular, kuantum haberleşme ve dağıtık kuantum biliŐim alanlarında yaklaşım deđiŐtirici etkiler yaratma potansiyeline sahip olup temel bilimsel çözümlenmeler, ileri malzeme teknolojileri ve karmaŐık sistem entegrasyonu gerektiren stratejik araştırma önceliklerini yansıtılmaktadır. Kuantum tekrarlayıcılar, kuantum rassal sayı reteleri ve kuantum dirençli internet protokolleri gibi teknolojiler, küresel kuantum ağların omurgasını oluŐturma potansiyeline sahip olsalar da tutarlı kuantum bellek mimarileri, ultra düşük kayıplı foton manipülasyonu ve yeni nesil ađ topolojileri gibi çözülmemiŐ bilimsel problemler nedeniyle

daha uzun vadeli perspektifler gerektirmektedir. Benzer Şekilde, lazer kontrollü plazmonik sistemlerle dolanıklık üretimi, homomorfik Őifreleme destekli dağıtık kuantum hesaplama, kuantum nokta tabanlı fotodedektörler ve plazma antenlerin kuantum platformlarına entegrasyonu gibi başlıklar, ileri malzeme fiziği, kuantum kontrol teorisi ve nano-fabrikasyon teknikleri gerektiren disiplinler arası araştırma alanlarıdır. Bunun yanında, Gaussian-olmayan kuantum hallerinde dolanıklık kriterleri gibi mühendislik engellerinin aŐılmasını gerektiren konular mevcuttur.

Türkiye, kuantum teknolojilerinde son yıllarda kaydettiği ilerlemeler ile araştırma ve geliştirme ekosistemi oluŐturmaya baŐlamıŐtır. Türkiye'nin kuantum teknoloji ekosistemi üniversiteler, araştırma merkezleri, teknokent giriŐimleri ve savunma sanayii Őirketleri arasındaki iŐbirliđi sayesinde bütünleŐik bir yapı kazanmaktadır. Bu ekosistem, NATO, EuroQCI, Quantum Internet Alliance (QIA) ve diğer uluslararası giriŐimlerle uyumlu bir Şekilde geliŐmeye açıktır. Yapılan alıŐmalar kuantum haberleşme, kuantum Őifreleme, malzeme üretimi, lazer sistemleri, mikroelektronik tasarım, metroloji ve yeni nesil ađ güvenliği gibi çok farklı alanlarda bütüncül bir kapasite geliŐimine iŐaret etmektedir.

Sonuç olarak, kuantum haberleşme kapsamında yer alan konular gelecek yılları Őekillendirecek vizyoner araştırma yönelimlerini iŐaret etmekte olup küresel ölçekli güvenli iletişim ağları, bulut tabanlı kuantum hesaplama altyapıları ve kuantum internet ekosistemi gibi dönüştürücü hedefler için uzun soluklu bilimsel ve teknolojik yatırım gerektiren stratejik bir perspektif sunmaktadır.

8. SONUÇ ve DEğerLENDİRMELELER

Kuantum teknolojileri, hızla gelişen ve geleceğin harp ortamında yıkıcı etkiler doğurması beklenen stratejik bir küresel rekabet alanı haline gelmiştir. Bu nedenle birçok ülkede kuantum teknolojileri, egemenlik açısından kritik bir teknoloji alanı olarak değerlendirilmektedir. GeliŐmiŐ ülkelerin çoğu kendi 'ulusal kuantum planlarını' oluŐturmuŐtur. Her ülkenin kendi güçlü yönleri ve uzmanlık alanları olmasına rağmen birçok ülke oluŐturdukları planlar doğrultusunda kuantum teknolojilerinin tüm alanlarına yatırım yapmaktadır. Bu yatırımlar; temel araştırmalar yapılmasına, giriŐimler ile sanayi ekosisteminin geliştirilmesine, iş gücü eğitimi de kapsayacak Şekilde büyük iŐletmelerin kurulmasına imkân sağlayacak Şekilde yapılmaktadır. Ülkelerde kuantum teknoloji alanına yapılan yatırımlar devlet desteği, özel sektör ve Avrupa Birliği (AB) gibi kurumlardan sağlanmakta olup net bir karşılaŐtırma yapılamamaktadır.

Açık kaynaklardan edinilen bilgiler çerçevesinde, Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi (Joint Research Centre, JRC) analizine göre, bu alandaki yatırımlar kamu ve özel sektör tarafından artan bir ivmeyle desteklenmektedir. Özellikle kamu yatırımları belirleyici bir rol



oynamakta olup küresel ölçekte toplam kamu fonlarının bugüne kadar yaklaşık 45 milyar ABD Doları seviyesine ulaştığı tahmin edilmektedir. Bununla birlikte AB düzeyinde doğrudan kamu yatırımları birkaç milyar Avro seviyesinde olup üye devlet katkılarıyla birlikte bu miktar daha yüksek bir kümülatif değere ulaşmaktadır. Bu yatırımlar; ulusal güvenlik, teknolojik egemenlik ve yüksek katma değerli üretim hedefleri doğrultusunda yönlendirilmekte ve küresel rekabeti şekillendiren temel unsurlardan biri haline gelmektedir [[7], [74]].

AB yüksek bütçeli Kuantum Amiral Gemisi Programı ile Ar-Ge'den ticarileşmeye giden teknolojileri desteklemektedir. AB'de kamu yatırımlarının özel sektör katkısıyla desteklendiği eş finansman modelleri ve bölgesel kuantum kümeleri etrafında uzmanlaşma önem kazanmaktadır.

Asya-Pasifik ülkeleri (Japonya, Güney Kore ve Avustralya), ip üretimi, yazılım ve sensör teknolojilerinde sanayi–üniversite iş birlikleriyle uzmanlaşmaktadır. McKinsey Quantum Technology Monitor 2025 raporunda Japonya'nın kuantum teknolojilerine yönelik yaklaşık 7,4 milyar ABD Doları tutarında kamu yatırımı yaptığı açıklanmış olup bu miktar küresel ölçekte duyurulan toplam kamu yatırımlarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Söz konusu yatırım; kuantum hesaplama, kuantum haberleşme ve kuantum algılama alanlarında geniş kapsamlı bir ulusal strateji çerçevesinde gerçekleştirilmektedir [23].

Avustralya ise PsiQuantum'a fotonik kuantum bilgisayar geliştirmesi için yaklaşık 550 milyon ABD Doları bütçe sağlamıştır [75].

Küresel ölçekte kuantum teknolojilerine yönelik girişim sermayesi (venture capital, VC) yatırımları son yıllarda önemli bir ivme kazanmıştır. 2025 yılı itibarıyla yıllık VC finansmanının yaklaşık 4,9 milyar ABD Doları seviyesine ulaştığı, kümülatif yatırım hacminin ise 10 milyar ABD Dolarını aştığı değerlendirilmektedir. Bu yatırımların büyük bir bölümü, ülkelerin özellikle kuantum bilgisayarları alanında lider olma hedefi doğrultusunda, kuantum hesaplama alanında faaliyet gösteren şirketlere yönelmektedir. Bununla birlikte, yatırım dinamiklerinde yapısal bir dönüşüm söz konusudur. Önceki dönemlerde erken aşama (early-stage) girişimlere odaklanan yatırımcı ilgisinin, son yıllarda daha olgun (later-stage) şirketlere yöneldiği görülmektedir [75].

Kuantum teknolojileri pazarı; kuantum hesaplama, kuantum haberleşme, kuantum algılama ve ilgili donanım-yazılım ekosistemini kapsayan çok bileşenli bir yapıya doğru hızla gelişmektedir. Henüz erken ticarileşme aşamasında olmasına rağmen, özellikle kamu destekli Ar-Ge programları ve özel sektör yatırımları sayesinde küresel ölçekte büyüyen bir teknoloji pazarı oluşmaktadır. Sektörde yoğun Ar-Ge alışmaları devam etmekte olup sonucunda ticarileşmiş ürünler hedeflenmektedir. Uzman analizler, kuantum teknolojileri pazarının önümüzdeki on yıl içinde özellikle kuantum iletişim altyapıları ve kuantum bilgisayar donanımları öncülüğünde



hızlı bir büyüme eğilimi göstereceğini ve erken dönem niş pazarlardan ölçeklenebilir endüstriyel pazarlara geçiş sürecinde olduğunu ortaya koymaktadır [23].

Ülkelerin kuantum teknolojilerindeki bağımsızlaşma eğilimlerinin hızla arttığı bu dönemde, kuantum teknolojileri bileşen ve ürünleri kritik öneme sahip olmuş ve ülkeler tarafından bu ürünlere ihracat kısıtları uygulanmaya başlanmıştır. Kuantum teknolojilerinin temel bileşenlerinin araştırma, tasarım ve üretimine yönelik çalışmalarının yapılması ve desteklenmesi önem kazanmıştır. Kuantum teknolojilerinde bağımsızlık ve sürdürülebilirlik sağlanamadığı takdirde ise ülkelerin teknolojik bağımlılığı artacak ve ulusal güvenlik riskleri oluşabilecektir.

Söz konusu kuantum teknolojilerindeki bu gelişmeler dikkate alındığında bu alanda öncü olabilmek ve rekabet edebilmek için mevcut altyapıların güçlendirilmesi, insan kaynağının artırılması ve kritik alanlarda yatırımların yol haritaları doğrultusunda yapılması gerekmektedir.

Bu doğrultuda ülkemizde savunma sanayi, kuantum teknolojilerinin kazanımında önemli bir rol almaktadır. Savunma Sanayii Başkanlığı, Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı tarafından kuantum teknolojilerindeki küresel gelişmeler doğrultusunda, 2020 yılında 6. Ar-Ge Paneli kapsamında Kuantum Teknolojilerinin Geliştirilmesi Programı başlatılarak Kuantum Teknoloji Yol Haritası oluşturulmuştur. Kuantum Teknolojilerinin Geliştirilmesi Programı kapsamında kuantum hesaplama, kuantum algılama ve kuantum haberleşme konularında projeler Başkanlığımız tarafından yürütülmektedir. Kuantum Teknoloji Yol Haritası'nın güncellenmesi için Kuantum Hesaplama, Kuantum Algılama ve Kuantum Haberleşme olmak üzere üç OG ile Kuantum OTAĞ faaliyeti 25 Aralık 2024 tarihinde başlatılmış olup 25 Aralık 2025 tarihinde tamamlanmıştır.

Kuantum OTAĞ faaliyetlerinde ülkemizin ihtiyaçları, kabiliyetleri ve altyapıları ortaya konulmuş olup ihtiyaçlar ve yetkinlikler çerçevesinde kazanılması gereken yakın ve uzak vade teknoloji konuları tespit edilmiştir. Kuantum OTAĞ çalışmaları neticesinde 85 teknoloji konu önerisinin önceliklendirilmesi yapılmıştır. DEMATEL, AHP ve TOPSIS metotları kullanılarak uçtan uca analitik önceliklendirme metodolojisi ile bu teknolojilerin yakın ve uzak vadede kazanımına yönelik plan oluşturulmuştur. Çalışmalar neticesinde tüm OTAĞ katılımcıları ile oluşturulan Kuantum Teknoloji Yol Haritası Ek-2'de yer almaktadır. Elde edilen Yol Haritası kapsamında 34 konu önerisi yakın, 51 konu önerisi uzak vade olarak belirlenmiştir. Kuantum Teknoloji Yol Haritası ile yurt içindeki mevcut altyapı, insan gücü ve bilgi birikiminden en yüksek oranda yararlanacak şekilde kuantum teknolojilerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

NATO'nun Kuantum Teknolojileri Stratejisi Belgesi doğrultusunda, 2024 yılında kurulan Transatlantik Kuantum Topluluğu (Transatlantic Quantum Community, TQC) çalışmaları kapsamında Türkiye Ulusal Heyet Başkanlığı, Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı



Kuantum ve İleri Algılayıcı Teknolojileri Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır. Başkanlığımız tarafından kuantum teknolojilerine yönelik farkındalığın artırılması, insan kaynağının geliştirilmesi ve yurt içi kuantum ekosisteminin güçlendirilmesi amacı ile “**Türkiye Kuantum Platformu**” isimli dijital portal kurulmuŐtur. Başkanlığımız tarafından YK ve Ankara Üniversitesi, Bilkent Üniversitesi, Boğaziçi Üniversitesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Hacettepe Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Koç Üniversitesi, ODTÜ, Özyeğin Üniversitesi, Sabancı Üniversitesi, TOBB ET olmak üzere 11 niversite ile Savunma Sanayii Kuantum Teknolojileri Stratejik Yetkinlik Geliştirme İŞ Birliği Protokolü 23 Haziran 2026 tarihinde imzalanacaktır. Kuantum algoritmalarına yönelik çalıŐmaların gerçekleŐtirilmesi için uluslararası katılımcıların da yer alabileceği kuantum algoritma yarışması da Haziran 2026 döneminde duyurulacaktır.

Türkiye'nin kuantum teknolojileri alanında küresel rekabet gücü kazanabilmesi ve stratejik bağımsızlığını sağlayabilmesi için bütüncül, sürdürülebilir ve uzun vadeli bir ulusal ekosistem yaklaşımının benimsenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda aŐaėıdaki alanlara odaklanması önerilmektedir:

- İnsan kaynağının geliştirilmesi amacıyla üniversitelerde kuantum mühendisliği, kuantum donanım teknolojileri ve kuantum bilimi gibi disiplinler arası lisansüstü programların yaygınlaŐtırılması,
- Uluslararası doktora, araştırma ve staj programlarına katılımın teŐvik edilmesi suretiyle nitelikli araŐtırmacı yetiŐtirilmesi,
- Genç araŐtırmacıların uluslararası kuantum araştırma merkezlerinde deneyim kazanmasını sağlayacak akademik ve endüstriyel iş birliği mekanizmalarının oluşturulması,
- Akademi–sanayi entegrasyonunu güçlendirmek amacıyla karŐıllıklı araŐtırmacı değişim ve staj programlarının hayata geçirilmesi,
- Alanında nc yurt dışı araŐtırmacıları Türkiye'ye çekmek için rekabetçi ve uzun vadeli destek mekanizmalarının oluşturulması,
- Uluslararası araştırma merkezleriyle uzun süreli stratejik ortaklıklar kurularak bilgi transferi, ortak altyapı kullanımı ve insan kaynağı yetiŐtirilmesine yönelik iş birliklerinin geliştirilmesi,
- Kamu kurumları koordinasyonunda, somut prototip ve ürün çıktısı hedefleyen niversite–sanayi–araştırma merkezi konsorsiyum modellerinin yaygınlaŐtırılması,
- İleri nanofabrikasyon, kriyojenik test altyapıları, hassas ölçüm laboratuvarları ve sensör paketleme gibi kritik araştırma altyapılarının oluşturulması,
- Ulusal yarıŐmalar, çalıŐtaylar, konferanslar ve medya faaliyetleri yoluyla kuantum teknolojilerine yönelik toplumsal farkındalığın artırılması.



Sonuç olarak, Türkiye'nin kuantum teknolojilerindeki baŐarısı; nitelikli insan kaynağının geliştirilmesi, gl araştırma altyapılarının kurulması, etkin akademi–sanayi iş birliklerinin oluşturulması, uluslararası araştırma ağlarına entegrasyonun sağlanması ve Ar-Ge ıktılarının hızlı biçimde rnleŐmesine bağlıdır. Kuantum Teknoloji Yol Haritası doğrultusunda atılacak stratejik adımların, Türkiye'nin kuantum çağına hazırlığını güçlendireceği, uluslararası rekabet gücünü artıracadı ve lkemizin kuantum teknolojileri alanında söz sahibi ülkeler arasında yer almasına önemli katkılar sunacağı değerlendirilmektedir.

9. SAVUNMA SANAYİİ BAŞKANLIğI TEKNOLOJİ KAZANIM ÇALIŞMALARI

BaŐkanlıđımızın 2024–2028 Stratejik Planı kapsamında Ar-Ge ve Teknoloji alanında geleceğe yön verecek teknoloji ve yetenekleri milli imknlarla geliştirmek amacıyla, günümüz ve geleceğin teknolojilerine yönelik kapsayıcı ve istikrarlı geliŐimin sürdürülmesi ve çığır açan teknoloji alanlarında yetenek kazanımının sağlanması hedeflenmektedir.

Savunma sanayii alanında dışa bağımlılığı asgari seviyeye indirmek, ana sistemlerin ve tüm kritik alt sistemlerin yerileŐtirilmesi ile mümkündür. Bunun yanı sıra, teknolojiyi takip eden değil teknolojide nc olan bir ülke olmak için, ileri teknolojiye yatırım yapmak büyük önem arz etmektedir.

Bu doğrultuda, Başkanlığımız tarafından günümüzdeki teknolojik geliŐimin hızıyla 3-5 yıl olarak tanımlanabilecek yakın vadeden ötesini ve o yılların harekt ortamlarını tasvir etmek ve bu ortamlarda etkin olacak konseptler ile onların gerçekleştirilmesini sağlayacak teknolojileri belirlemek amacı ile Geleceğin Harekt Ortamını Őekillendirecek Teknolojiler (GHOST) etkinliği gerçekleştirilmektedir.

GHOST kapsamında geleceğe etki potansiyeli yüksek olarak belirlenen teknolojiler Savunma Sanayii Başkanlığı Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı tarafından düzenlenmekte olan Odak Teknoloji Ağı (OTAĞ) alıŐmaları kapsamında ele alınmaktadır. Her yıl belirlenen teknoloji alanlarında; niversiteler, araştırma kuruluşları, ihtiyaç makamları, sanayi ve KOBİ'lerden ilgili temsilcilerin katılımıyla OTAĞ faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. OTAĞ faaliyetlerine ilişkin bilgilere, Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Portalı'ndan [76] ulaŐılabilmektedir.

OTAĞ faaliyetleri ile ele alınan teknolojiler bütüncül bir yaklaŐımla, ekosistemde yer alan tüm paydaşların katkıları ile, belirlenen ve önceliklendirilen konu nerileri doğrultusunda Teknoloji Bazlı Ar-Ge Yol Haritaları oluŐturulmaktadır.

Ar-Ge Paneli'ne sunulacak konuların belirlenmesinde, Teknoloji Bazlı Ar-Ge Yol Haritaları ncelikli girdidir.



Gereksinimleri net olarak belirlenmemiŐ ya da belirlenemeyen konular, Savunma Sanayii Ar-Ge Geniş Alan (SAGA) ağrısı olarak, diğer durumlarda, Ar-Ge Projesi nerisi olarak Ar-Ge Paneli'ne sunulur.

Ar-Ge Paneli Kararları alındıktan sonra SSB projelendirme faaliyetleri gerçekleştirilir. Projenin tamamlanması sonrasında da çıktıların kullanım durumları Ar-Ge ve Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı ve SanayileŐme Daire Başkanlığı tarafından takip edilir.

SanayileŐme Daire Başkanlığı tarafından sektörel yetkinlik ve kapasitelerin belirlenmesi, farklı kategorilerde ve süreklilik içinde değerlendirilmesi ve puanlandırılması amacıyla Endüstriyel Yetkinlik Değerlendirme ve Destekleme Programı (EYDEP) yrtlmektedir. EYDEP ile savunma sanayiinde faaliyet gösteren veya göstermek isteyen firmaların, sektörde nitelikli tedarikçi olabilmelerini teminen durum analizleri yapılmakta ve geliŐme planlarının oluşturulması amaçlanmaktadır. EYDEP'e baŐvurular <https://yeten.ssb.gov.tr/eydepinfo> internet adresinden yapılabilmektedir. Ayrıca, Savunma Sanayii Yetenek Envanteri (YETEN) kapsamında birçok kamu kurum ve kuruluŐu ile entegrasyon sağlanarak mevcut veri tabanlarından bilgi transferi sağlanmaktadır. Bu kapsamda, savunma sanayii alanında faaliyet gösteren firmaların ürünlerinin, üretim ve test altyapılarının, finans ve insan kaynağı bilgilerinin YETEN'e kayıt etmesi gerekmektedir. Böylece TSK'nın ihtiyaç duyacağı her türlü harp sanayii ürününün ve hizmetlerinin milli sanayiinin kaynak ve imknları ile azami lde yurt içinden karŐılanması için mevcut sanayiinin kapasitesi ayrıntılı olarak ortaya çıkarılmakta, açık teknoloji alanları belirlenmekte, sanayii içinden yapay zekâ teknolojisi ile potansiyel firma önermesi yapılabilmekte ve teknoloji transferi ile yurt içinde imal edilebilecek olan ürünler ile bu ürünleri üretebilecek potansiyel firmalar belirlenebilmektedir. YETEN ile ilgili detaylı bilgi <https://yeten.ssb.gov.tr/> adresinde yer almaktadır.

10. KAYNAKÇA

- [1] A. Gabus ve E. Fontela, "World Problems, an Invitation to Further Thought within the Framework of DEMATEL," Battelle Geneva Research Center, Cenevre, İsviçre, 1972.
- [2] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York, ABD: McGraw-Hill, 1980.
- [3] C. L. Hwang ve K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York, ABD: Springer-Verlag, 1981.
- [4] M. A. Nielsen ve I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, 10th Anniversary Ed. Cambridge, İngiltere: Cambridge Üniversitesi Yayınları, 2010.
- [5] O. Ezratty, "Understanding Quantum Technologies 2025," arXiv:2111.15352 [quant-ph], 30 Eki. 2025.
- [6] E. Altman vd., "Quantum Simulators: Architectures and Opportunities," *PRX Quantum*, cilt 2, no. 1, s. 017003, Oca. 2021.
- [7] Avrupa Komisyonu, "European Declaration on Quantum Technologies," Brüksel, Belika, 5 Ara. 2023. [evrimii]. Erişim: <https://ec.europa.eu/newsroom/dae/redirection/document/117890>
- [8] S. Krinner vd., "Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems," *EPJ Quantum Technol.*, cilt 6, no. 1, s. 2, May. 2019.
- [9] P. W. Shor, "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring," *Proc. 35th Annu. Symp. Found. Comput. Sci.*, 1994, ss. 124–134.
- [10] L. K. Grover, "A fast quantum mechanical algorithm for database search," *Proc. 28th Annu. ACM Symp. Theory Comput. (STOC '96)*, 1996, ss. 212–219.
- [11] A. Peruzzo vd., "A variational eigenvalue solver on a quantum processor," *Nat. Commun.*, cilt 5, s. 4213, Tem. 2014.
- [12] National Institute of Standards and Technology (NIST), "NIST Releases First 3 Finalized Post-Quantum Encryption Standards," Gaithersburg, MD, ABD, 13 AĞu. 2024. [evrimii]. Erişim: <https://www.nist.gov/news-events/news/2024/08/nist-releases-first-3-finalized-post-quantum-encryption-standards>
- [13] Avrupa Komisyonu, "Commission proposes new measures to boost EU industry and jobs," (Industrial Accelerator Act), Brüksel, Belika, 4 Mar. 2026. [evrimii]. Erişim: <https://ec.europa.eu/newsroom/dae/redirection/document/115873>
- [14] C. Gidney, "How to factor 2048 bit RSA integers with less than a million noisy qubits," arXiv:2505.15917 [quant-ph], May. 2025.
- [15] C. Gidney ve M. Ekerå, "How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits," *Quantum*, cilt 5, s. 433, Nis. 2021.
- [16] P. Webster vd., "The Pinnacle Architecture: Reducing the cost of breaking RSA-2048 to 100 000 physical qubits using quantum LDPC codes," arXiv:2602.11457 [quant-ph], 12 Őub. 2026.
- [17] D. Litinski, "How to compute a 256-bit elliptic curve private key with only 50 million Toffoli gates," arXiv:2306.08585 [quant-ph], Haz. 2023.
- [18] M. Cain vd., "Shor's algorithm is possible with as few as 10,000 reconfigurable atomic qubits," arXiv:2603.28627 [quant-ph], 30 Mar. 2026.
- [19] European Quantum Industry Consortium (QuIC), "Position Paper on the Quantum Europe Strategy," Brüksel, Belika, 2 Tem. 2025. [evrimii]. Erişim: <https://www.euroquic.org/quic-position-paper-on-the-quantum-europe-strategy/>

- [20] ASIC Pro, "Quantum Computing and Semiconductors," 14 Nis. 2025. [evrimii]. Erişim: <https://www.asicpro.com/2025/04/14/quantum-computing-and-semiconductors/>
- [21] IBM Research, "NIST PQC Standards," IBM Research Blog, 13 AĞu. 2024. [evrimii]. Erişim: <https://research.ibm.com/blog/nist-pqc-standards>
- [22] European Union Agency for Cybersecurity (ENISA), "Post-Quantum Cryptography: Current state and quantum mitigation," V2, Atina, Yunanistan, May. 2024.
- [23] McKinsey & Company, "Quantum Technology Monitor 2025," McKinsey Digital, New York, ABD, Ara. 2024.
- [24] TUBİTAK BİLGEM, "Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü (UEKAE)," Kocaeli, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://bilgem.tubitak.gov.tr/uekae/>
- [25] Qubitrium, "Quantum Technologies & Solutions," İŐstanbul, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://qubitrium.tech/>
- [26] Cyber Quanta, "Advanced Quantum Solutions," İŐstanbul, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://cyber-quanta.com/>
- [27] Kuanticy, "Kuantum Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme," Ankara, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://www.kuanticy.com/tr/>
- [28] Piya AI, "Quantum-Powered Artificial Intelligence," İŐstanbul, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://www.piya.ai/>
- [29] QLocked Tech, "Next-Generation Quantum Security," İŐstanbul, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://qlocked.tech/>
- [30] Qoordinate, "Quantum Software Development," İŐstanbul, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://qoordinate.tech/>
- [31] Phi0, "Quantum Simulation and Analysis," İŐstanbul, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://phi0.com/>
- [32] Q&Co, "Data Driven Quantum Innovation," İŐstanbul, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://www.qndco.com/>
- [33] QReadys, "Quantum Readiness Assessment," İŐstanbul, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://qreadys.com/>
- [34] NanoMagnetics Instruments, "Low Temperature & Quantum Technologies," Ankara, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://www.nanomagnetics-inst.com>
- [35] TUBİTAK, "TEKNOFEST Kapsamında İlk Kez Düzenlenen Kuantum Teknolojileri Yarışması BiliŐim Vadisinde GerçekleŐtirildi," Haber Duyurusu, 26 AĞu. 2024. [evrimii]. Erişim: <https://tubitak.gov.tr/tr/haber/teknofest-kapsaminda-ilk-kez-duzenlenen-yarisma-24-25-agustos-2024-tarihlerinde-bilisim-vadisinde-gerceklestirildi>
- [36] BiliŐim Vadisi, "Teknofest Kuantum Teknolojileri Yarışması BiliŐim Vadisinde GerçekleŐti," Haber, AĞu. 2024. [evrimii]. Erişim: <https://bilisimvadisi.com.tr/haberler/teknofest-kuantum-teknolojileri-yarismasi-bilisim-vadisinde-gerceklesti>
- [37] QTurkey, "Kuantum Teknolojileri Derneği," Ankara, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://qturkey.org/>
- [38] QTurkey, "Student Branches," Ğrenci Temsilcilikleri Sayfası. [evrimii]. Erişim: <https://qturkey.org/student-branches/>
- [39] TUBİTAK, "1719 - EUREKA Network Uygulamalı Kuantum Teknolojileri 2024 Yılı ağrı Sonuçları Açıklandı," Eki. 2024. [evrimii]. Erişim: <https://tubitak.gov.tr/tr/duyuru/1719-eureka-network-uygulamali-kuantum-teknolojileri-2024-yili-cagri-sonuclari-aciklandi>

- [40] TUBİTAK, "EUREKA Network Uygulamalı Kuantum Teknolojileri 2025 ağrısı Açıldı," 2025. [evrimii]. Erişim: <https://tubitak.gov.tr/tr/duyuru/eureka-network-uygulamali-kuantum-teknolojileri-2025-cagrisi-acildi>
- [41] NATO DIANA, "NATO Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic - ODTÜ Teknokent," Ankara, Türkiye. [evrimii]. Erişim: <https://natodiana.odtuteknokent.com.tr/>
- [42] V. Giovannetti, S. Lloyd, ve L. Maccone, "Quantum metrology," *Phys. Rev. Lett.*, cilt 96, no. 1, s. 010401, Oca. 2006.
- [43] M. G. A. Paris, "Quantum estimation for quantum technology," *Int. J. Quantum Inf.*, cilt 7, no. supp01, ss. 125–137, Oca. 2009.
- [44] M. Kitagawa ve M. Ueda, "Squeezed spin states," *Phys. Rev. A*, cilt 47, no. 6, ss. 5138–5143, Haz. 1993.
- [45] D. J. Wineland, J. J. Bollinger, W. M. Itano, ve D. J. Heinzen, "Spin squeezing and reduced quantum noise in spectroscopy," *Phys. Rev. A*, cilt 46, no. 11, ss. R6797–R6800, Ara. 1992.
- [46] C. M. Caves, "Quantum-mechanical noise in an interferometer," *Phys. Rev. D*, cilt 23, no. 8, ss. 1693–1708, Nis. 1981.
- [47] J. L. O'Brien, A. Furusawa, ve J. Vukovi, "Photonic quantum technologies," *Nat. Photonics*, cilt 3, no. 12, ss. 687–695, Ara. 2009.
- [48] S. Pirandola vd., "Advances in photonic quantum sensing," *Nat. Photonics*, cilt 12, no. 12, ss. 724–733, Ara. 2018.
- [49] L. Czekaj, A. Przysizna, M. Horodecki, ve P. Horodecki, "Quantum metrology: Heisenberg limit with bound entanglement," *Phys. Rev. A*, cilt 92, no. 6, s. 062303, Ara. 2015.
- [50] S. L. Braunstein ve C. M. Caves, "Statistical distance and the geometry of quantum states," *Phys. Rev. Lett.*, cilt 72, no. 22, ss. 3439–3443, May. 1994.
- [51] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Quantum Measurement Division," Gaithersburg, MD, ABD. [evrimii]. Erişim: <https://www.nist.gov/pml/quantum-measurement>
- [52] S. Wehner, D. Elkouss, ve R. Hanson, "Quantum internet: A vision for the road ahead," *Science*, cilt 362, no. 6412, s. eaam9288, Eki. 2018.
- [53] H. J. Kimble, "The quantum internet," *Nature*, cilt 453, no. 7198, ss. 1023–1030, Haz. 2008.
- [54] G. Brassard ve L. Salvail, "Secret-key reconciliation by public discussion," *Proc. 13th Annu. Int. Conf. Theory Appl. Cryptograph. Techn.* (EUROCRYPT '93), 1994, ss. 410–423.
- [55] V. Scarani vd., "The security of practical quantum key distribution," *Rev. Mod. Phys.*, cilt 81, no. 3, ss. 1301–1350, Tem. 2009.
- [56] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, ve H. Zbinden, "Quantum cryptography," *Rev. Mod. Phys.*, cilt 74, no. 1, ss. 145–195, Oca. 2002.
- [57] H.-K. Lo, M. Curty, ve K. Tamaki, "Secure quantum key distribution," *Nat. Photonics*, cilt 8, no. 8, ss. 595–604, Ağu. 2014.
- [58] F. Grosshans vd., "Quantum key distribution using gaussian-modulated coherent states," *Nature*, cilt 421, no. 6920, ss. 238–241, Oca. 2003.
- [59] C. H. Bennett ve G. Brassard, "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing," *Proc. IEEE Int. Conf. Comput., Syst. Signal Process.*, 1984, ss. 175–179.

- [60] D. Stucki vd., "Fast and simple one-way quantum key distribution," *Appl. Phys. Lett.*, cilt 87, no. 19, s. 194108, Kas. 2005.
- [61] M. D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, ve S. V. Polyakov, "Invited review article: Single-photon sources and detectors," *Rev. Sci. Instrum.*, cilt 82, no. 7, s. 071101, Tem. 2011.
- [62] F. Marsili vd., "Detecting single infrared photons with 93% system efficiency," *Nat. Photonics*, cilt 7, no. 3, ss. 210–214, Mar. 2013.
- [63] N. Sangouard, C. Simon, H. de Riedmatten, ve N. Gisin, "Quantum repeaters: From quantum networks to the quantum internet," *Rev. Mod. Phys.*, cilt 83, no. 1, ss. 33–80, Mar. 2011.
- [64] L.-M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac, ve P. Zoller, "Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics," *Nature*, cilt 414, no. 6862, ss. 413–418, Kas. 2001.
- [65] C. E. Shannon, "Communication theory of secrecy systems," *Bell Syst. Tech. J.*, cilt 28, no. 4, ss. 656–715, Eki. 1949.
- [66] A. Broadbent ve S. Jeffery, "Quantum homomorphic encryption for circuits of low T-gate complexity," *Advances in Cryptology – CRYPTO 2015* (Bilgisayar Bilimleri Ders Notları, vol. 9216), 2015, ss. 609–629.
- [67] M. Hillery, V. Buğek, ve A. Berthiaume, "Quantum secret sharing," *Phys. Rev. A*, cilt 59, no. 3, ss. 1829–1834, Mar. 1999.
- [68] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Post-Quantum Cryptography Standards," FIPS 203, 204, 205, 13 AĞu. 2024.
- [69] R. J. McEliece, "A public-key cryptosystem based on algebraic coding theory," *DSN Prog. Rep.*, cilt 44, ss. 114–116, 1978.
- [70] J. Zhang vd., "Quantum communication networks in China: Progress and prospects," *Sci. China Inf. Sci.*, cilt 67, no. 1, s. 110301, Oca. 2024.
- [71] C. Knaut vd., "Entanglement of nanophotonic quantum memory nodes in a telecom network," *Nature*, cilt 629, no. 8012, ss. 573–577, May. 2024.
- [72] P. Kumar vd., "Quantum teleportation across a metropolitan fiber network," *Optica*, cilt 11, no. 2, ss. 244–250, Őub. 2024.
- [73] Turkcell Medya, "Turkcell, Dũnyanın İlk Kıtalararası Karasal Kuantum Anahtar Dağıtımını GerekleŐtirdi," Haber Bũlteni, Nis. 2025.
- [74] A. M. Lewis, P. Scudo, I. Cerutti, M. Travagnin, C. Marcantonini, vd., "Future Directions for Quantum Technology in Europe - An analysis of policy questions," JRC Technical Report JRC141050, Avrupa Birliği Yayınlar Ofisi, Lũksemburg, 2025.
- [75] J. J. S. de Oliveira vd., "Quantum technologies and their cybersecurity implications," Joint Research Centre (JRC), Avrupa Komisyonu, Lũksemburg: Avrupa Birliği Yayınlar Ofisi, 2024.
- [76] T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı, "SSB ARGE Web Portalı," Ankara, Tũrkiye. [evrimii]. Erişim: <https://arge.ssb.gov.tr>



11. EKLER

EK-1: Katılımcı Listesi

#	Araştırma Merkezleri
1	Anadolu Teknoloji Araştırma Parkı
2	Bilkent NANOTAM
3	Bilkent UNAM
4	Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi NÜRDAM
5	CERN
6	Fermilab
7	ODTÜ MEMS
8	Sabancı Üniversitesi SUNUM
9	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi CÜNAM

#	Firmalar
1	Algorithmiq
2	ASELSAN
3	BI DATAWORKS
4	Bilkent Nano Mikro Teknoloji Araştırma Geliştirme A.Ő.
5	CBERNET Bilgi Teknolojileri Danışmanlık A.Ő.
6	ComPro
7	Corvus Tech
8	CTech
9	Cyber Quanta
10	Fox Robotics Laboratuvar Teknoloji Hizmetleri
11	HAVELSAN
12	Kuanticy
13	Lumos Lazer A.Ő.
14	NanoMagnetics Instruments
15	ODTÜ TEKNOKENT Yönetim A.Ő.
16	Qabacus Kuantum Bilgisayar
17	QndCo Quantum Computing A.Ő.
18	Qoordinate
19	Qursunoglu Quantum Computing
20	QWorld
21	RF MİRA Radar İletişim Sistemleri
22	ROKETSAN
23	TEI
24	Teknoma Teknolojik Malzemeler
25	Turkcell
26	TUSAŐ
27	Tüpraő
28	ULAK Haberleşme
29	Yonga Teknoloji Mikroelektronik

#	Kurumlar
1	Millî Savunma Bakanlığı
2	Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı
3	Savunma Sanayii Başkanlığı
4	TÜBİTAK BİLGEM
5	TÜBİTAK TBAE
6	TÜBİTAK UME
7	TÜBİTAK SAGE
8	Türkiye Ulusal Gözlemevleri
9	Deniz Kuvvetleri Komutanlığı
10	Türkiye Uzay Ajansı

#	Üniversiteler
1	Abdullah Gül Üniversitesi
2	Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi
3	Afyon Kocatepe Üniversitesi
4	Amasya Üniversitesi
5	Anadolu Üniversitesi
6	Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi
7	Ankara Üniversitesi
8	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
9	Atatürk Üniversitesi
10	Bahçeşehir Üniversitesi
11	Balıkesir Üniversitesi
12	Bandırma Onyediy Eylöl Üniversitesi
13	Bartın Üniversitesi
14	Başkent Üniversitesi
15	Batman Üniversitesi
16	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
17	Bilkent Üniversitesi
18	Boğaziçi Üniversitesi
19	Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
20	Bursa Uludağ Üniversitesi
21	Çanakale Onsekiz Mart Üniversitesi
22	Çankırı Karatekin Üniversitesi
23	Çukurova Üniversitesi
24	Dicle Üniversitesi
25	Dumlupınar Üniversitesi
26	Düzce Üniversitesi
27	Erciyes Üniversitesi
28	Eskişehir Teknik Üniversitesi
29	Gazi Üniversitesi
30	Gaziantep Üniversitesi
31	Gebze Teknik Üniversitesi

32	Hacettepe Üniversitesi
33	Harvard Üniversitesi
34	Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi
35	Hitit Üniversitesi
36	Illinois Üniversitesi Urbana-Champaign
37	Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
38	İnönü Üniversitesi
39	İstanbul Teknik Üniversitesi
40	İstanbul Üniversitesi
41	İstanbul Üniversitesi - CerrahpaŐa
42	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
43	Kadir Has Üniversitesi
44	KahramanmaraŐ Sütçü İmam Üniversitesi
45	Karabük Üniversitesi
46	Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
47	Kastamonu Üniversitesi
48	KırŐehir Ahi Evran Üniversitesi
49	Kocaeli Üniversitesi
50	Koç Üniversitesi
51	Konya Teknik Üniversitesi
52	Konya Ticaret Odası Karatay Üniversitesi
53	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
54	Manisa Celal Bayar Üniversitesi
55	Marmara Üniversitesi
56	Necmettin Erbakan Üniversitesi
57	Niğe Ömer Halisdemir Üniversitesi
58	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
59	Özyeğin Üniversitesi
60	Sabancı Üniversitesi
61	Samsun Üniversitesi
62	Selçuk Üniversitesi
63	Sinop Üniversitesi
64	Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi
65	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
66	Tarsus Üniversitesi
67	TOBB ETÜ
68	Trabzon Üniversitesi
69	Türk Hava Kurumu Üniversitesi
70	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
71	Yalova Üniversitesi
72	YaŐar Üniversitesi
73	Yıldız Teknik Üniversitesi
74	Yozgat Bozok Üniversitesi
75	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

EK-2: Teknoloji Konuları nceliklendirme Listesi

Yakın Vade Konu Listesi

#	OG Sınıfı	Konu Sınıfı	Konu Adı	Vade
1	Kuantum Hesaplama	Kuantum Güvenliği ve Kriptografi	Kuantum Sonrası (Post-Quantum) Őifreleme ve Saldırı Tespiti	Yakın
2	Kuantum Hesaplama	Kuantum Güvenliği ve Kriptografi	Kuantum-Dirençli Kriptografik Algoritmalar ve Blokzincir Tabanlı Güvenlik Uygulamaları	Yakın
3	Kuantum Hesaplama	Kuantum Güvenliği ve Kriptografi	Lazer Tabanlı Rassal Sayı reteci Geliştirilmesi	Yakın
4	Kuantum Hesaplama	Kuantum İŞlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Kübit retiminde Mikro/Nano-Fabrikasyon Süreç Optimizasyonu	Yakın
5	Kuantum Hesaplama	Kuantum İŞlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Foton Kübit Tabanlı Kuantum İŞlemci Geliştirilmesi	Yakın
6	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Kuantum Ara Katman Yazılımlarının Geliştirilmesi	Yakın
7	Kuantum Hesaplama	Kriyojenik Sistemler ve Kuantum Soğutma Teknolojileri	Milikelvin (mK) Mertebesinde Kriyojenik Soğutma Sistemlerinin Geliştirilmesi	Yakın
8	Kuantum Hesaplama	Kuantum Devre ve Kontrol Bileşenleri	Kuantum Hesaplama için Dinamik Devrelerin Geliştirilmesi	Yakın
9	Kuantum Algılama	Kuantum Manyetometre	NV Merkezli Kuantum Manyetometre Teknolojisi	Yakın
10	Kuantum Algılama	Kuantum Manyetometre	Optik Pompalı Manyetometre (Optically Pumped Magnetometer, OPM) Teknolojisi	Yakın
11	Kuantum Algılama	Kuantum Görüntüleme	Kuantum LIDAR Görüntüleme Teknolojisi	Yakın
12	Kuantum Algılama	Kuantum Görüntüleme	Kuantum RADAR Teknolojisi	Yakın
13	Kuantum Algılama	Kuantum Akustik Sensörler	Kuantum Akustik Sensör Teknolojisi	Yakın
14	Kuantum Algılama	Tek Foton Kaynakları ve Dedektörleri	Tek ve Dolanık Foton Kaynak Teknolojileri	Yakın
15	Kuantum Algılama	Tek Foton Kaynakları ve Dedektörleri	Tek Foton iğ Diyot (SPAD) Teknolojisi	Yakın
16	Kuantum Algılama	Tek Foton Kaynakları ve Dedektörleri	Süperiletken Nanotel Tek Foton Dedektör (SNSPD) Teknolojisi	Yakın
17	Kuantum Algılama	Kuantum Ataletsel Navigasyon Sistemleri	Otonom Kuantum Navigasyon Teknolojisi	Yakın
18	Kuantum Algılama	Kuantum Ataletsel Navigasyon Sistemleri	Soğuk Atom Tabanlı Ataletsel Sensör (Dnller/İvmeölçer) Teknolojisi	Yakın

#	OG Sınıfı	Konu Sınıfı	Konu Adı	Vade
19	Kuantum Algılama	Kuantum Ataletsel Navigasyon Sistemleri	Kuantum Dönüölçer Teknolojisi	Yakın
20	Kuantum Algılama	Kuantum Radyasyon Dedektörleri	Kuantum Radyasyon Dedektör Teknolojisi	Yakın
21	Kuantum Algılama	Kuantum Gravimetre	Mikrogravite Koşullarında Kuantum Algılama Teknolojileri (Gravimetre)	Yakın
22	Kuantum Algılama	Kuantum Gravimetre	Soğuk Atom Tabanlı Gravimetre ve Gradyometre Teknolojisi	Yakın
23	Kuantum Algılama	Atomik Saat	Atomik Saat Teknolojisi	Yakın
24	Kuantum Algılama	Kuantum Metroloji	Metroloji Uygulamaları İçin Kriyojenik Josephson Standartlarının Geliştirilmesi	Yakın
25	Kuantum Haberleşme	Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Uzay Tabanlı Sistemler İçin Hassas Zaman Senkronizasyon Protokolü Geliştirilmesi	Yakın
26	Kuantum Haberleşme	Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Uzayda Güvenli Haberleşme için Mikro Yerçekimi Uyumlu Kuantum Modüllerinin Geliştirilmesi	Yakın
27	Kuantum Haberleşme	Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Sıkıştırılmış (Squeezed) Işık Teknolojileri	Yakın
28	Kuantum Haberleşme	Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	QKD Sistemlerinin Post-Kuantum Kriptografi ile Entegrasyonu	Yakın
29	Kuantum Haberleşme	Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Kuantum Rassel Sayı Üreteçlerinin Geliştirilmesi	Yakın
30	Kuantum Haberleşme	Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Kuantum Anahtar Dağıtımı Güvenlik Protokolleri için Analiz ve Standardizasyon Metotlarının Geliştirilmesi	Yakın
31	Kuantum Haberleşme	Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Farklı Dalgaboylarında Uzun Eşvrelilik Sürelerine Sahip Kuantum Işık Kaynaklarının Geliştirilmesi	Yakın
32	Kuantum Haberleşme	Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Apokromatik Objektifler ve Nanopozisyonlayıcıların Geliştirilmesi	Yakın
33	Kuantum Haberleşme	Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Frekans Kilitli Dar Bant Genişlikli Tek/Dolanık Foton Kaynağı Üretimi	Yakın
34	Kuantum Haberleşme	Kuantuma Dayanıklı Kriptografi	Kuantum Bilgisayar Tehditlerine Karşı Dayanıklı Asimetrik Kriptografi ve İmza Sistemlerinin Geliştirilmesi	Yakın

Uzak Vade Konu Listesi

#	OG Sınıfı	Konu Sınıfı	Konu Adı	Vade
1	Kuantum Hesaplama	Kuantum Güvenliği ve Kriptografi	Yerel Olmayan Kuantum Korelasyonlara (Non-local Correlations) Dayalı Veri SıkıŐtırma ve Kuantum Gizlilik Protokollerinin Geliştirilmesi	Uzak
2	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Kuantum Hata Düzeltme Algoritmalarının Geliştirilmesi	Uzak
3	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Nükleer Kabuk Modeli için Kuantum Algoritmalarının Geliştirilmesi	Uzak
4	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	GPU/CPU ParalleleŐtirmesi ile Kuantum Algoritmalarının Klasik Sistemlerde Verimli Simlasyonu ve Yazılım Kütüphanelerinin Geliştirilmesi	Uzak
5	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Lojistik ve Operasyonel Süreçlerde Kuantum Hesaplama Algoritmalarının Uygulanması	Uzak
6	Kuantum Hesaplama	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Tuzaklanmış İyon Sistemlerinin Elektromanyetik Simlasyonu ve Fiziksel Kübit Davranışlarının Modellenmesi	Uzak
7	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Yüksek Enerji Fiziği ve Parçacık Fiziği için Kuantum Algoritmaları Geliştirme ve Kuantum Optimizasyon Uygulamaları	Uzak
8	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	oklu Giriş oklu ıkıŐ (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) ve Akıllı Yansıtıcı Yüzey (Intelligent Reflecting Surface, IRS) Sistemlerinde Kuantum Tabanlı Optimizasyon Algoritmalarının Geliştirilmesi	Uzak
9	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Kuantum Algoritmalar ile Moleküler Simlasyon ve İlaç KeŐfi	Uzak
10	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Geribesleme Tabanlı Kuantum Algoritmalarının Geliştirilmesi	Uzak
11	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simlasyon ve Optimizasyon	Yeni Nesil Malzeme KeŐfi ve Modelleme	Uzak
12	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma,	Havacılıkta Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Sonlu Elemanlar	Uzak

#	OG Sınıfı	Konu Sınıfı	Konu Adı	Vade
		Simülasyon ve Optimizasyon	Analizi (FEA) Simülasyonlarının Kuantum Bilgisayarlar ile Hızlandırılması	
13	Kuantum Hesaplama	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Van der Waals Malzemelerde Defekt Tabanlı Katı Hal Kübitlerinin Geliştirilmesi ve Oda Sıcaklığında Kuantum Koherensinin Sağlanması	Uzak
14	Kuantum Hesaplama	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Süperiletken Kübit Devre Tasarımı, Üretimi ve Entegrasyonu	Uzak
15	Kuantum Hesaplama	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Nötral Atom Tabanlı Kuantum İşlemci Birimi Geliştirilmesi	Uzak
16	Kuantum Hesaplama	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Tuzaklanmış İyon Tabanlı Kuantum İşlemci Birimi Geliştirilmesi	Uzak
17	Kuantum Hesaplama	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	Soğuk Atom Kübit Tabanlı Kuantum İşlemci Birimi Geliştirilmesi	Uzak
18	Kuantum Hesaplama	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	NV Merkezli Elmas Bazlı Kuantum Hesaplama İşlemci Birimi Geliştirilmesi	Uzak
19	Kuantum Hesaplama	Kuantum Devre, Kontrol ve Donanım Bileşenleri	Fotonik Kuantum Bilgisayarlar için Entegre Optik Komponentlerin Geliştirilmesi	Uzak
20	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Kübit Kalibrasyon Teknolojilerinin Geliştirilmesi	Uzak
21	Kuantum Hesaplama	Kuantum Yazılımları	Kuantum Memristör Tabanlı Yapay Zekâ Geliştirilmesi	Uzak
22	Kuantum Hesaplama	Kuantum Devre, Kontrol ve Donanım Bileşenleri	Lineer Optik Devre ve Dedektör Tasarımı	Uzak
23	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Markov Olmayan Kuantum Devre Sentezi ve Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi	Uzak
24	Kuantum Hesaplama	Kuantum İşlemci Birimi ve Donanım Teknolojileri	İki Boyutlu Malzemelerde Kuantum Hesaplama İçin Foton Üretimi	Uzak
25	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Kuantum Yapay Zekâ Destekli Büyük Veri Analitiği	Uzak

#	OG Sınıfı	Konu Sınıfı	Konu Adı	Vade
26	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Kuantum Doğal Dil İşleme Teknolojisi	Uzak
27	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Kuantum Makine Öğrenmesi (Quantum Machine Learning, QML) Algoritmalarının Geliştirilmesi ve İyileştirilmesi	Uzak
28	Kuantum Hesaplama	Kuantum Algoritma, Simülasyon ve Optimizasyon	Kuantum Veri Sınıflandırması ve Veri Kodlama	Uzak
29	Kuantum Hesaplama	Kuantum Hesaplama Donanımları ve Yardımcı Elemanlar	Kuantum Bilgisayar Geliştirilmesi	Uzak
30	Kuantum Algılama	Kuantum Manyetometre	Topolojik Malzemelerin Kullanımı ile Kuantum Manyetometre Teknolojisi	Uzak
31	Kuantum Algılama	Kuantum Görüntüleme	Yüksek Sıcaklıkta Üretilen Kuantum-Dolanık THz Modlarla Algılama	Uzak
32	Kuantum Algılama	Kuantum Görüntüleme	Kuantum Mikroskop Geliştirilmesi	Uzak
33	Kuantum Algılama	Kuantum Görüntüleme	Grafen Tabanlı Optik Yüzey ile Dedektör Teknolojisi	Uzak
34	Kuantum Algılama	Kuantum Görüntüleme	Kuantum Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) Teknolojisi	Uzak
35	Kuantum Algılama	Tek Foton Kaynakları ve Dedektörleri	Kuantum Nokta Foton Teknolojileri	Uzak
36	Kuantum Algılama	Kuantum Gravimetre	Sıkıştırılmış Işık Gradyometre Dedektör Teknolojisi	Uzak
37	Kuantum Algılama	Atomik Saat	Optik Atomik Saat Teknolojisi	Uzak
38	Kuantum Algılama	Kuantum Anten	Kuantum Anten Teknolojisi	Uzak
39	Kuantum Haberleşme	Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Kuantum Tekrarlayıcıların Geliştirilmesi	Uzak
40	Kuantum Haberleşme	Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Klasik Fiber Optik Ağlarda Güvenlik için Hibrit Haberleşme Sistemlerinin Tasarımı	Uzak

#	OG Sınıfı	Konu Sınıfı	Konu Adı	Vade
41	Kuantum Haberleşme	Kuantum İnternet	Kuantum Dirençli İnternet Protokollerinin Geliştirilmesi	Uzak
42	Kuantum Haberleşme	Kuantum İnternet	Milimetre Dalga Boylarında Serbest Uzay Kuantum Haberleşme	Uzak
43	Kuantum Haberleşme	Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Kuantum Hafıza Geliştirilmesi	Uzak
44	Kuantum Haberleşme	Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Kuantum Dağıtık Hesaplama Teknolojilerinin Geliştirilmesi	Uzak
45	Kuantum Haberleşme	Kuantuma Dayanıklı Kriptografi	Homomorfik Őifreleme Yoluyla Dağıtık Kuantum Hesaplama	Uzak
46	Kuantum Haberleşme	Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Kuantum Anahtar Dağıtımının Mobil Őebeke Entegrasyon Mimarisinin Geliştirilmesi	Uzak
47	Kuantum Haberleşme	Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Kuantum Anahtar Dağıtımı Datalink Katmanı Yazılım Modülünün Geliştirilmesi	Uzak
48	Kuantum Haberleşme	Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD)	Gaussian-Olmayan Kuantum Hallerinde Dolanıklık Kriterleri	Uzak
49	Kuantum Haberleşme	Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Lazer Kontrollü Plazmonik Yapılarla Kuantum Dolanıklık Üretimi	Uzak
50	Kuantum Haberleşme	Kuantum Haberleşme Destekleyici Donanım ve Bileşenler	Plazma Antenlerin Kuantum Sistemleri için Geliştirilmesi	Uzak
51	Kuantum Haberleşme	Kuantuma Dayanıklı Kriptografi	Post Kuantum Kriptografi (PQC) için Gömülü Sistem Geliştirilmesi	Uzak



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
CUMHURBAŞKANLIĞI
**SAVUNMA SANAYİİ
BAŞKANLIĞI**

KUANTUM

ODAK TEKNOLOJİ AĞI

SONUÇ RAPORU